

圧粉コア部品を適用した電動パワーステアリング用非接触式トルクセンサの開発

Development of Non-Contact-Type Torque Sensor for Electric Power Steering Using Green Compact Component

酒井善郎 Y. SAKAI 加奥貴史 T. KAOKU

In response to the recent requirement of improvement in performance for diversified controls and cost of non-contact-type torque sensor for electric power steering, a green compact* has been adopted as a new material with new processing method for the torque sensor. Consequently, torque sensitivity improved by approx. 30% and cost reduced by approx. 50% due to cutting down on material cost, processes and number of parts as compared to the conventional torque sensor.

*A green compact is obtained by allowing a complex soft magnetic material by insulating iron powder to be added and mixed with a resin binder to mold the material to subsequently heat (cure) the material, thereby melting the resin binder to fixate the material.

Key Words: electric power steering, torque sensor, green compact, complex soft magnetic material, coil assembly

1. はじめに

当社は、1989年から電動パワーステアリング（以下EPSと称す）用として非接触式トルクセンサを量産中である。その非接触式トルクセンサは、接触式のトルクセンサと比べ耐摩耗性など耐久性に優れることから、現在ほとんどのEPSに採用されつつある。

しかし近年、制御の多様化に伴い、さらなるトルクセンサの性能向上やコスト低減が求められるようになってきた。

これらのニーズに応えるために、既存の構造をもとに、非接触式トルクセンサ部品として新材料、新工法である圧粉コア*を使用した部品の開発を進めてきた。2002年には、圧粉コアを用いたコイルアセンブリを開発しEPSトルクセンサ用に量産を開始、2005年からは検出リングにも同様の圧粉コアを採用するまでに至っている。

本報では、これら圧粉コア部品を採用したEPS用非接触式トルクセンサについて紹介する。

*圧粉コアとは、絶縁被覆鉄粉による複合軟磁性材料に樹脂バインダを添加混合して成型を行い、その後加熱（キュア）し、樹脂バインダを溶融して固化したものをいう。

2. EPS用非接触式トルクセンサの概要

2.1 EPSシステムの構造

EPSシステムの構造は図1に示すようにトルクセンサ、車速信号（センサ）、コントロールユニット、モータおよび減速機で構成される。

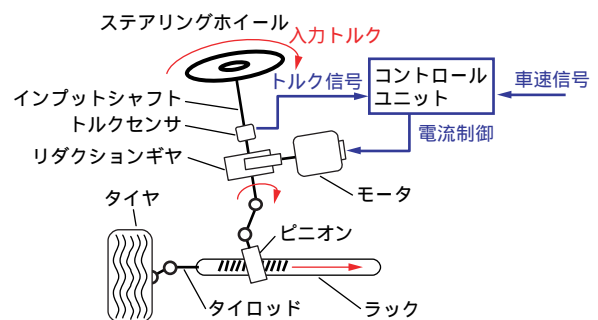


図1 EPSシステムの構造

Structure of EPS system

ステアリングホイールからの操舵力は、トルクセンサで検出され、そのトルク信号がコントロールユニットに送られる。トルク信号と車速信号に応じてモータが電流制御され、操舵力のアシストを行う。

2.2 トルクセンサの動作原理

非接触式トルクセンサの構造例を図2に示す。トルクセンサは入力軸と出力軸を連結しているトーションバー、検出リング部およびコイル部で構成される。

検出リング部は、入力軸に固定された2個の検出リングと出力軸に固定された1個の検出リングから構成される。

入力トルクがゼロの状態では、検出リング(1)と検出リング(2)の歯は互いにある一定の対向面積をもった位相で固定されている。入力軸にトルクが加わると、入出力軸間に接続されたトーションバーにねじれが発生し、検出リング(1)、(2)の対向する各検出リングの歯部面積が変化する。

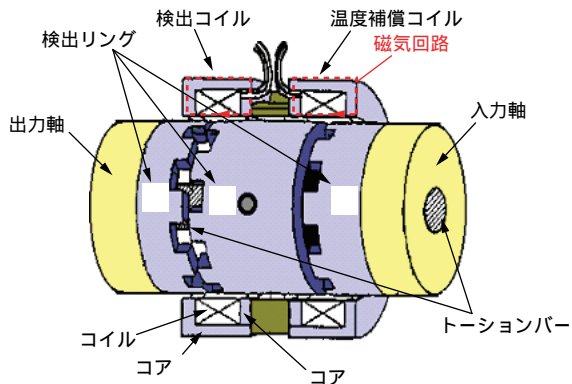


図2 トルクセンサの構造

Structure of torque sensor

入力軸と出力軸間で対向する各検出リングの面積に変化が生じると、検出コイル側の磁気回路の総磁束が増減し、検出コイルのインピーダンスが変化する。一方、温度補償コイルは検出リングと、検出リングが同じ軸に固定されているため相対変移が生じず、入力トルクに関係なく、常に同一の状態を保つ。

コイル部はボビンに巻かれたコイルとそれを取り巻くように設置された磁性体のコアで構成され、トルク検出用と温度補償用の2個のコイルアセンブリがハウジング内に設置される。

各コイルは、ボビンに沿って円周方向に巻回され、その周りをコアが取り囲んでいるため、コイルに電流が流れると破線で示す磁気回路が発生する。入力軸間に相対変位が生じると、検出側の磁気回路の総磁束数が増減し、検出側のインピーダンスが変化する。一方、補償コイル側の磁気回路の総磁束数に変化はなく、インピーダンスも変化しない。

温度補償コイルと検出コイルの間の電位差を検出することにより、環境温度に影響されず入力トルクに比例した出力信号を検出することができる。

3. 圧粉コア(複合軟磁性材料)について

3.1 開発目的

E P S用トルクセンサの磁心材料としては、高周波領域での高い透磁率と高い寸法精度を持ちその上、振動や衝撃に耐える強度が求められる。従来トルクセンサの開発にあたりKoyoでは、センサを構成する軟磁性材料のコアならびに検出リングを開発し適用してきた。E P Sの応答性向上のためには、さらに高い周波数領域で透磁率の高い軟磁性材料が求められるが、一般的に軟磁性材料は周波数の増加とともに渦電流が増大し、透磁率

が低下するため、固有抵抗の高い材料が求められる。しかしながら、複合軟磁性材料は固有抵抗が高く高周波域において高い透磁率を示し、しかも軟磁性材料に比べ安価である。したがって本研究では、このトルクセンサ部に複合軟磁性材料の適用を検討した。

3.2 複合軟磁性材料の特徴

絶縁被覆鉄粉による複合軟磁性材料の構造を図3に示す。

高い圧縮性を有する鉄粉の表面に化学処理により数100 という極めて薄い無機系絶縁皮膜を形成させた粉末と、樹脂バインダ粉末が添加混合されている。この原料粉を一般の粉末冶金と同様に金型成形して製品形状にし、その後絶縁皮膜を熱分解しない500 以下の温度で加熱(キュア)しバインダを溶融、固化することで成形体の強度を高める。この成形体の周波数と鉄損の関係を開い素鋼板と比較して図4に示す。複合軟磁性材料は成形時に導入されたひずみが残されたままであり、圧延後焼鈍されたけい素鋼板に比べヒステリシス損が大きく、低周波数領域では鉄損が高い。しかし周波数が増加するとけい素鋼板の渦電流損失は急激に増大し、数kHzを超えると複合軟磁性材料の鉄損はけい素鋼板より小さくなり優位となる。また複合軟磁性材料は構造上異方性が無く、3次元形状の磁気回路設計が可能で部品設計の自由度が高いという特徴がある。

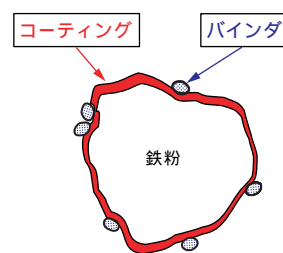


図3 絶縁被覆鉄粉の構造

Structure of insulating iron powder

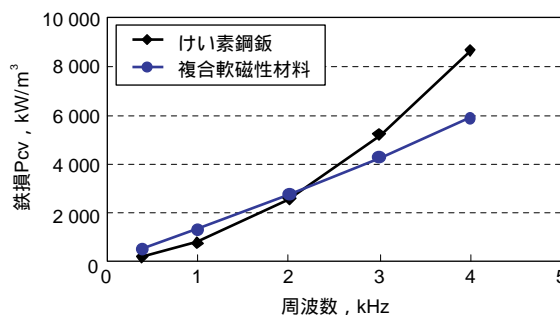


図4 周波数と鉄損の関係

Relation between frequency and iron loss

表1 複合軟磁性材料の特性

Characteristics of complex soft magnetic material

| 原料粉 | 母粉 | 絶縁処理 | バインダ | 熱処理温度 K | 密度 g/cm ³ | 透磁率 | 抗折強度 MPa |
|-----|------------|----------|------|------------|-------------------------|------|-------------|
| 新材 | Fe | 無機コーティング | 有機系 | 500以下(大気中) | 約7 | 70以上 | 80以上 |
| 従来材 | Fe - 13%Cr | - | - | 約1400(真空中) | 約7 | 約65 | - |

3.3 複合軟磁性材料の選定

表1に本開発にあたり検討した原料粉の交流透磁率と成形体強度の例を示す。トルクセンサの磁心としては、必要透磁率以上、強度は製造工程中で破壊しない最低必要強度を目標とした。これらの中から最もすぐれ、その上トータルコストの安い表1の新材をもとにした粉末を使用することとした。

3.4 従来品との比較

3.4.1 性能

図5にはこの原料粉による成形体の透磁率と周波数の関係を、従来材の軟磁性材料と比較して示す。複合軟磁性材料は成形時のひずみが残留しているため直流電流における透磁率は小さい値を示すものの、絶縁皮膜の効果により渦電流損失が小さいため100kHz以上の高周波領域までフラットな透磁率を示す。一方、従来材の軟磁性材料は周波数の増加とともに渦電流損失が増大し、透磁率が急激に低下する。その結果、トルクセンサの駆動周波数である数kHzでは複合軟磁性材料の透磁率は従来材より高い値が得られる。

また成形体のまま使用することから、高い寸法精度の確保が可能である。

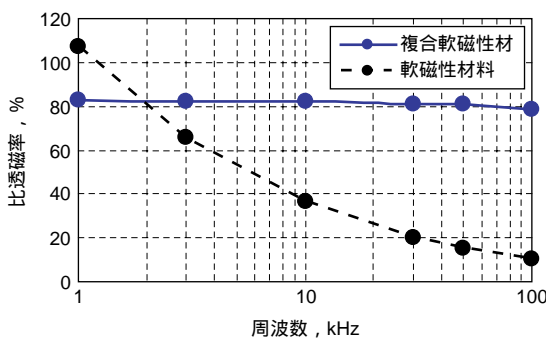


図5 センサ材料の透磁率と周波数の関係

Relation between magnetic permeability and frequency of sensor materials

図6に成形体の密度とキュア後の抗折強度および透磁率の関係を示す。必要透磁率以上、最低必要強度を目標に密度を決定した。

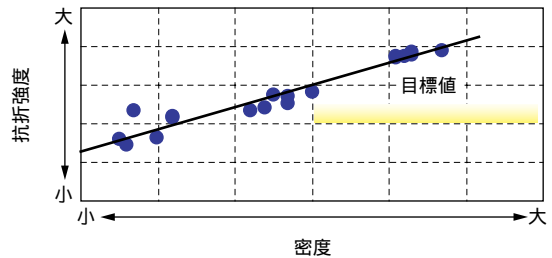
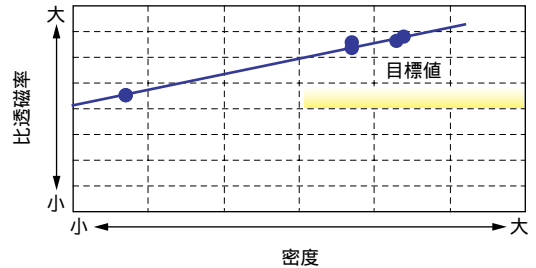


図6 キュア後の成形体の透磁率、および抗折強度と密度の関係

Relation between compact magnetic permeability, defecting strength and compact density after curing

こうして得られたトルクセンサ用コイルアッセンプリの出力感度と周波数の関係を従来材と比較し、図7に示す。コイルの駆動周波数数kHzにおいて、開発品は従来品に比べ約30%トルク感度を向上させた。また、開発品は駆動周波数を10kHzまで増加させても従来材のセンサと同レベルのトルク感度が得られることから、周波数の増加により応答性を向上させることができた。

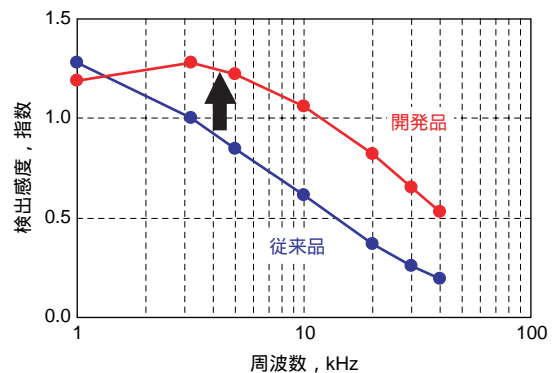


図7 出力感度と周波数の関係

Relation between output sensitivity and frequency

3.4.2 コスト

従来材の軟磁性材料は窒素を含む雰囲気では焼結時窒化しやすいことから真空炉で焼結し、高い寸法精度を確保するためサイジングと機械加工、および磁気特性改善のための焼鈍が必要であり、コストが高いという問題があった。これらの製造工程を図8に示す。

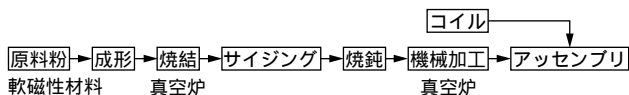


図8 従来材のトルクセンサ部品の製造工程

Manufacture processes of conventional material for torque sensor component

図9に開発した圧粉コアコイルアッセンブリ製造工程を示す。原料粉をコア(1)とコア(2)の形状に金型成形し、それぞれ大気中でキュアを行う。次にコイルを挿入したコア(1)2組とコア(2)を組み合わせたものを、射出成形機でインサートモールド工法により樹脂で被覆一体化する。図10に開発したコイルアッセンブリの構造を従来品と比較して示す。従来品はコイルを挿入したコア(1)にコア(2)を圧入した構造である。しかし複合軟磁性材の開発品では強度が低いためコア(1)、コア(2)の端面をつき合わせ、インサートモールドにより被覆一体化することで加工工程を不要とした。

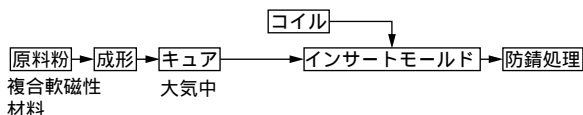


図9 コイルアッセンブリの製造工程

Manufacture processes of coil assembly

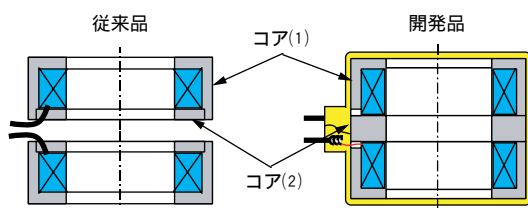


図10 開発したコイルアッセンブリの構造

Structure of developed coil assembly

また、開発品は検出コイルと補償コイルのコア(2)の磁気回路を共有化することにより、コア(2)の部品点数を2個から1個に削減している。

E P S センサの機能上、検出コイルと温度補償コイルのインピーダンスの差を小さくすることが求められている。そこであらかじめコア(1)にコイルを組み込んだ状態でインピーダンスを計測して

おき、2組のコアのインピーダンスが規格の半分以下になるよう層別して組み付ける工程とした。その結果図11に示すようにインピーダンス差の要求値以下を確保することができた。

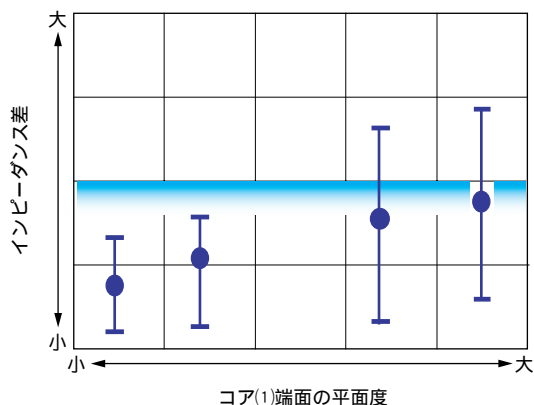


図11 インピーダンス差とコア(1)平面度の関係 (アッセンブリ前の検出コイルと補償コイルのインピーダンス差が規格の半分以下のとき)

Relation between impedance error and core (1) flatness (Provided that the impedance error of detection coil and compensating coil before assembly is below half of standard)

開発したトルクセンサのコイルアッセンブリのコストは 原料粉の低コスト化 工程、設備の削減 部品点数の削減 により従来品に比べ約半分に低減出来た。

さらに、検出コイルと補償コイルの一体化により、E P S ユニットへの組付けが容易となった。

3.5 圧粉コアコイルアッセンブリのハウジングへの組み付け

コイルアッセンブリはトルクセンサのアルミ製ハウジングに圧入して組み立てられるが、ハウジングに対するコア(1)、(2)の同軸度が必要とされる。

本開発では、射出成形金型の心棒を基準軸としてコア(1)、(2)を固定し射出成形することにより、コア(1)、(2)単体の同軸度の影響を受けることなく、コイルアッセンブリの状態を外径に対するコア(1)、(2)の同軸度を確保した。また、コイルアッセンブリのハウジングへの圧入において、圧入しるが大きくなるとコアの内径にクラックが入ることが確認された。そこで図12に示すようにコイルアッセンブリの外周部に突起を設け、コアへの応力を緩和することとし、突起の形状、位置および本数についてF E M解析を行い、その最適設計を行った。その結果、この突起はコイルアッセンブリとハウジングの線膨張係数の違いから環境温度変化により生ずるコアへの応力変動も緩和するこ

とができ、安定した出力特性が得られるようになった。



図12 ハウジング組み付け状態
Status of housing assembly

3.5.1 FEM解析と実験結果

開発時圧粉コアコイルアセンブリをハウジングに圧入する際、圧入しすぎるとコア(1)内径にクラックが生じることが判明した。そこで、コアの破壊に及ぼす外径突起の寸法と設定位置の影響について、FEM解析による対策案の検討を行い、その結果をもとにサンプルを用い効果の確認を行った。

図13、14の状態を想定し、コア(1)およびコア(2)の外周に、4か所、6か所、および7か所から荷重を負荷したFEMモデル用いて、それぞれの第1主応力を求め、対策案検討の指標とした。



図13 圧粉コアを用いたコイルアセンブリ
Coil assembly using green compact core

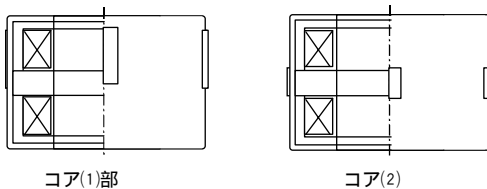


図14 突起形状
Projections shape

FEM解析より、外径から多軸の圧縮荷重を負荷した時、内径側に生ずる第1主応力は軸数が多いほど減少する。ただし、軸を均等に配分しない場合、応力集中により第1主応力は著しく増大するので、突起7か所は採用できない。また、突起

は現状のコア(1)部に設けた場合に比べ、コア(2)部に設けたほうが内径の第1主応力は約1/3に減少する。

したがって、対策形状は、コア(2)の部位に、6か所の突起を均等に配置することとした。

実際の対策サンプルを用いた圧入試験を行い、圧入すると割れの関係について確認した。また、対策形状については、さらにコア密度下限超過品でも評価を行った。ハウジングに圧入勘合する外径突起部をコア(2)の部位に設定することにより、密度下限品においてもコアは破壊しなかった。

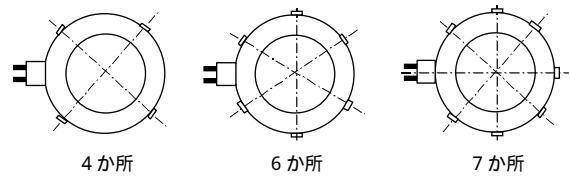


図15 突起数
Projections number

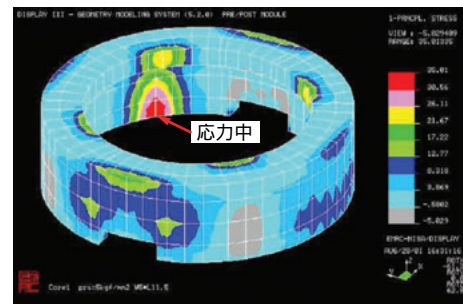


図16 解析結果1
突起部コア(1)4か所

Analytical results 1
Core (1) at projection sections, 4 points

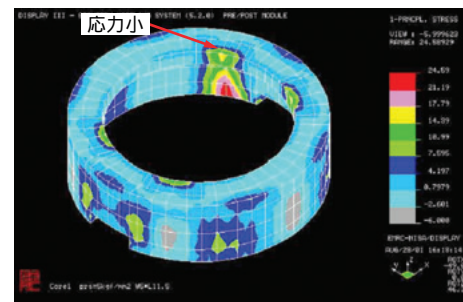


図17 解析結果2
突起部コア(1)6か所

Analytical results 2
Core (1) at projection sections, 6 points

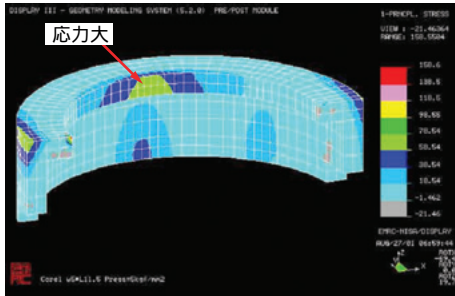


図18 解析結果3
突起部コア(1)7か所
Analytical results 3
Core (1) at projection sections, 7 points

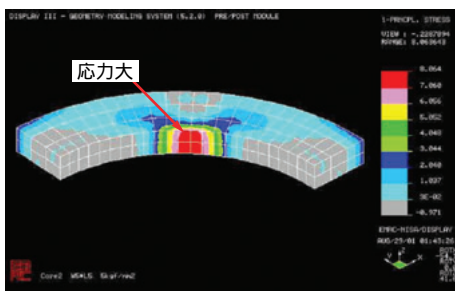


図19 解析結果4
突起部コア(2)4か所
Analytical results 4
Core (2) at projection sections, 4 points

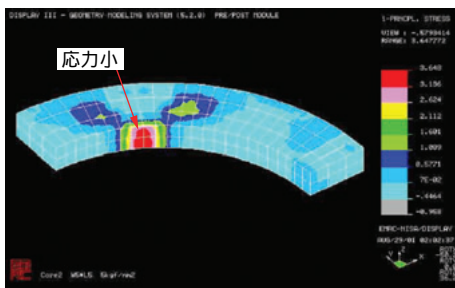


図20 解析結果5
突起部コア(2)6か所
Analytical results 5
Core (2) at projection sections, 6 points

コア(1)部突起の場合の第1主応力

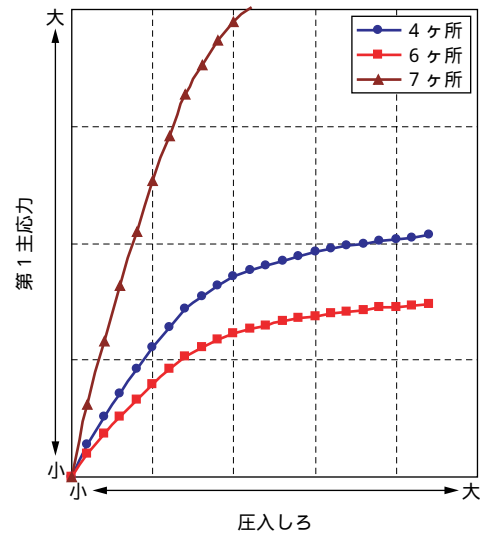


図21 解析結果6
Analytical results 6

コア(2)部突起の場合の第1主応力

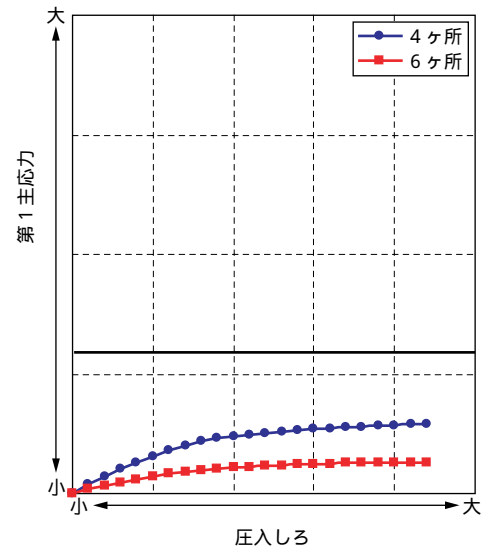


図22 解析結果7
Analytical results 7

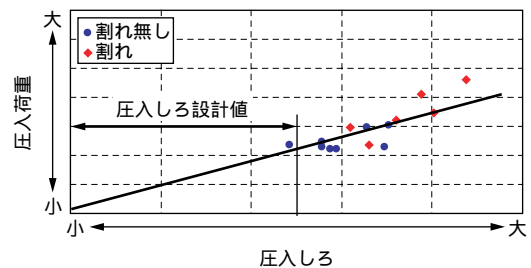


図23 実験結果
コア(1)部突起の圧入しりと圧入荷重

Experiment results
Press-fitting interference and load of projections at core (1)

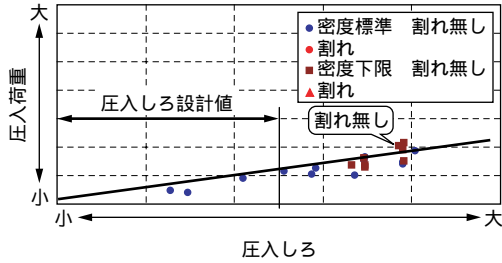


図24 実験結果
コア(2)部突起の圧入しると圧入荷重

Experiment results
Press-fitting interference and load of projections at core (2)

3.5.2 耐久性能

実車搭載時の種々の環境条件をもとにして表2に示す耐久性能評価を実施した結果、すべての評価項目に合格し、良好な結果を示している。

表2 信頼性試験結果
Experiment results of reliability

(: 仕様に合格)

| No | 試験項目 | 試験方法・条件 | 結果 | |
|----|-----------|---|---------|------|
| | | | センサ出力傾き | 中点変動 |
| 1 | 高温放置試験 | 120 150h | | |
| 2 | 低温放置試験 | - 40 96h | | |
| 3 | 高温高湿試験 | 85 85%RH 1000h | | |
| 4 | 熱衝撃試験 | - 40 ~ +120 500サイクル | | |
| 5 | 温度サイクル試験 | - 40 ~ +120 30サイクル | | |
| 6 | 温湿度サイクル試験 | - 10 ~ +60 90%RH 10サイクル | | |
| 7 | 耐振試験 | 振動加速度 ・ 5 ~ 17.3Hz : 10mmp-p以下 (変位量) ・ 17.3 ~ 100Hz : 58.5m/s ² ・ 100 ~ 200Hz : 14.7m/s ² 振動方向: X, Y, Z 3方向 各 8 hr | | |

3.6 まとめ

おもな結果を要約する。

- 開発したコイルアセンブリを組み込んだトルクセンサは、従来の軟磁性材料に比べ約30%のトルク感度の向上が得られた。そして電動パワーステアリング用センサに求められるすべての性能試験、耐久試験をクリアした。
- 開発したコイルアセンブリのコストは 原料コストの低減 大幅な工程の削減 磁気回路の共有化による部品点数の削減により約半

分に低減することができた。

- 3) インサートモールドによる検出コイル，補償コイルの一体化により，ユニットへの組付け性が改善された。

4. おわりに

絶縁被覆された鉄粉による複合軟磁性材料の成形体を磁心に用い，インサートモールド工法で成形体を樹脂で一体化することにより，安価で高性能なEPS非接触式トルクセンサの開発を行い，自動車への搭載を可能にすることができた。

今後，非接触式トルクセンサの検出リングについても同様に，この絶縁皮膜鉄粉による複合軟磁性材料の圧粉コアの採用を展開し，製品の高性能化，安価化に向けて取組中である。

参考文献

- 1) 谷口 学，永野英信：Koyo Engineering Journal, no137 (1990) 69.
「電動パワーステアリング用非接触式トルクセンサの開発」
- 2) 株式会社 ファインシタ 山本章章
第10回粉末冶金開発事例発表会講習テキスト，「絶縁被膜鉄粉による複合軟磁性材料の応用例」

筆者



酒井善郎*
Y. SAKAI



加奥貴史**
T. KAOKU

* 株式会社ファーベス 電子技術部

** ステアリング事業本部 ステアリング実験部