

接触式舵角トルクセンサの開発

Development of a Contact-Type Sensor for Steering Angle and Torque

野口 晃*
Akira Noguchi

山脇康介*
Kosuke Yamawaki

山本敏郎*2
Toshiro Yamamoto

虎谷智明*2
Tomoaki Toratani

概要 近年、地球環境に対する関心の高まりから自動車分野でも環境保全技術の開発が求められており、従来の油圧式パワーステアリングから電動式パワーステアリングシステム (EPS) へのニーズが広がっている。このEPS用の舵角トルクセンサは、接触式によるセンシングを行うため、導電性樹脂と検出用ブラシの摺動摩擦による応答性の遅れ、機械的摺動音などが問題となっている。今回、ロータ部と各摺動部の構造を検討することにより、電気特性に優れた低摺動音センサを開発できた。

1. はじめに

車両操舵時の快適性と安全性の要求が高い昨今、停止時、低速・高速走行時など、如何なる時でもステアリングへのアシスト力が調整可能なパワーステアリングシステムは、必要不可欠なものとなっている。従来パワーステアリングの制御方式として適用されていた油圧式は、油圧ポンプを常時駆動させる必要があるため、常時4～5馬力程度のエネルギー損失が発生し、燃費にして約3%のロスが発生する。電動式パワーステアリングシステム (EPS) ではステアリング操作時のみアシストモータを駆動するため、エネルギーロスが少なく、また、構造が簡素化されているので省スペース化できるなどのメリットがあり、今後、急速にその需要拡大が見込まれる分野である。

EPSでは、ステアリング操舵時にシャフトのトーションバー部に加わる回転トルクと、ステアリングの舵角(回転角度)を検出し、アシストモータの回転力を制御する電子コントロールユニット (ECU) に、その制御量を決定するためのトルク・舵角信号を出力するセンサが必要となる。舵角トルクセンサは、これらの背景に基づいて開発・設計を進めてきたものである。

2. 要求仕様

本センサのトルク・舵角センシング構造を図1、図2に示す。本センサは、コラム側ロータと一体となって回転する抵抗素子基板の片面にトルクセンシング側、もう片方に舵角センシング側パターンが印刷されている。トルク側はステア側ロータに配設されているブラシ、舵角側はセンサ筐体側出力基板に配設されたブラシと接触・摺動する構造となっており、運転中にトーションバーの振れ、及び、ステアリング回転する際、ブラシの基板面との接点位置の変化により抵抗が変動し、要求仕様に従ったトルク・舵角信号を出力するものである。ここで、本セ

ンサで必要不可欠な特性として下記の3特性が挙げられる。

- (1) 操舵性…運転中、ステアリングに快適な操舵フィーリングを与えるべく、応答性の良い高精度の信号出力を供給する。
- (2) 耐久性…数十万km走行に亘って、出力信号をノイズレスで安定して供給する。

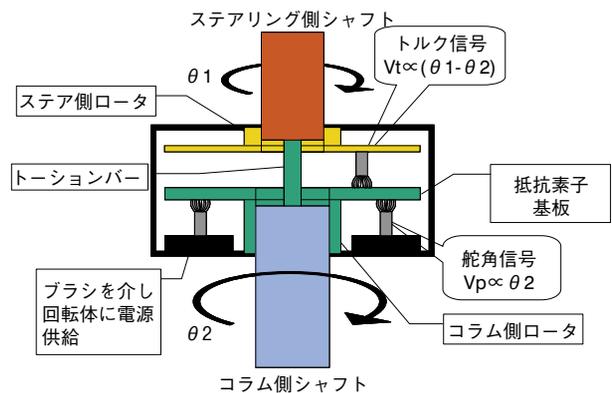


図1 舵角トルクセンサセンシング構造(1)
Torque and position sensing mechanism (1)

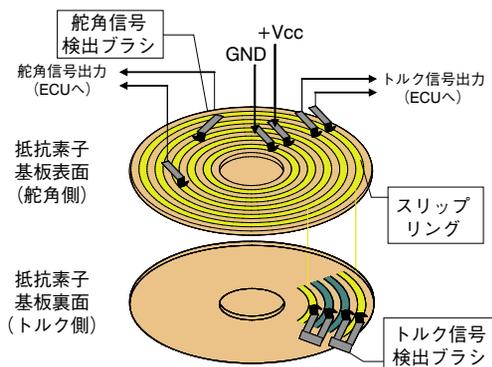


図2 舵角トルクセンサセンシング構造(2)
Torque and position sensing mechanism (2)

* 自動車部品事業部 電装部品工場 機能部品技術部

*2 設備部 生産技術開発センター

(3) 静粛性…センサから発生するメカニカルノイズ(摺動音)の低音化を図る。

本報では、操舵性と静粛性の開発・改善内容について述べる。

3. 要求仕様に対する解決手段・結果

3.1 操舵性

3.1.1 操舵性に対する狙い

EPSはセンサの出力信号を基にアシスト力を調整しているため、センサのセンシング機能はEPSのシステム全体において非常に重要なファクターとなる。車両走行時におけるシャフトの回転・揺動に対する信号応答性が悪いと運転時のスムーズな操作感を出すことができず、場合によってはステアリングに引っかかり感が発生する。信号応答性は、シャフト回転・トーションバーの捩れが発生した時の基板上的のスリップリング上を摺動回転するブラシの追従性の度合によって決まり、特にステアリングが揺動する周波数が高くなるにつれ応答性が悪くなるので、高い周波数帯でシャフトを回転揺動の際、如何に信号応答性を保つかが大きな課題であった。

信号応答性の低下の要因として次の4項目が挙げられる。

- (1) 構成部品同士で形成される軸受部のガタ
 - (2) ステアリング側ロータとコラム側ロータ軸受部の摺動摩擦
 - (3) 回転によって発生する慣性
 - (4) ステアリング側ロータなど、構成部品自体の剛性の低下
- これらの観点から、試作品を製作・評価し、設計の最適化を図ることとした。

3.1.2 信号応答性向上に対する施策

前述の構成部品同士のガタと摺動摩擦については、これを完全に無くすことができれば信号の遅れは発生しないと考えられるが、センサもステアリングシャフトも機構部品である以上、全くゼロとすることはできない。実際には、金型のチューニングをすることにより各構成部品の寸法精度・公差をより厳しくして軸受部のガタを可能な限り小さくし、また、金型の軸受部を細かく磨くことにより軸受摺動面の表面粗さを極力小さくして摩擦を減らし、それによってセンサ単体での信号の応答性はあるレベルまで改善された。

回転によって発生する慣性の影響については、ステア側ロータの重量・体積を可能な限り削減して対応を図ったが、ある程度まで削減するとそれ以上の効果は見込めない。

構成部品の剛性低下に関しては、ステアリング側シャフトとの嵌合部分から実際のセンシング部分まですべてバネ性の無い剛体で連結されていれば、信号の応答性は格段に向上する。ただし、前述のシャフト構造では、ステアリング側シャフトとコラム側シャフトの間にX-Y方向の軸ズレ・角度ズレが生じる。そのため、ステアリング側ロータがすべて剛体であると、シャフト間の軸ズレが発生した場合センサの軸受に高負荷がかかり、逆に摺動摩擦が大きくなってしまいう上に軸受の耐久性にも影響を及ぼす可能性がある。

そこで、シャフトと嵌合するロータとセンシング部の間に金属バネ材のカップリングを設けることとした。図3にカップリング構造を示す。このカップリングは、ロータが嵌合するシャフトがX-Y方向に偏芯しても摺動摩擦が増大することなく、

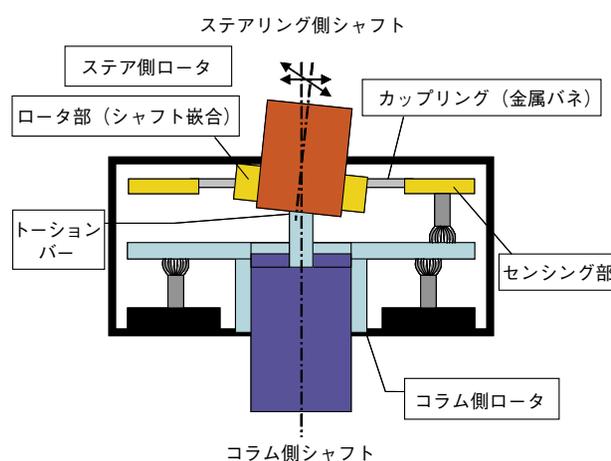


図3 カップリング構造
Coupling structure

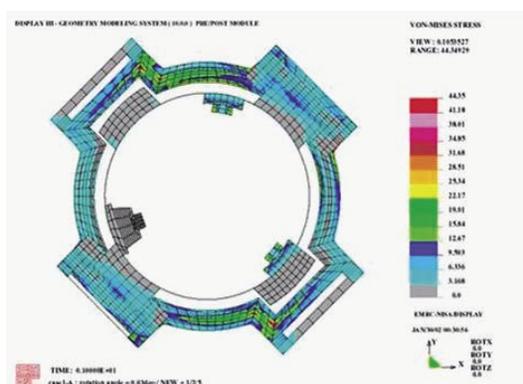


図4 FEM解析過程
Result of FEM analysis

このシャフト間の軸ズレを吸収することを目的としている。ただし、このカップリング構造を織り込んだ試作品を製作し、シャフトに組み込んだ状態で信号応答性を確認したが、十分な結果が得られなかったため、急遽、原因究明し対策を検討した。

3.1.3 ステア側ロータ(カップリング)の設計

剛性の観点から信号の応答性を満たすべくステアリング側ロータの最適構造を検討するに当たって、2つの要素を考慮する必要があった。1つは、ステアリング側シャフトとコラム側シャフトの軸ズレを吸収するために、X-Y方向についての撓みを持たせること、もう1つは、回転方向に対しては十分な剛性を持たせ、ステアリング側ロータの剛性不足による応答遅れを防ぐこと、この2点である。

そのため、FEM解析(歪解析、応力解析)を行い、この2要素を同時に満足させる最適形状の解析を行った。

まず、部材の材料特性・設計形状を設定、ステアリング側ロータがシャフトから受けるトルクや応力を入力し、その時にロータ全体の歪み及び応力を解析、その解析結果を基に現設計からの設計変更箇所の検討を行った。図4にその解析過程を示し、図5、写真1にFEM解析に基づくカップリングの設計変更形状を示す。

このFEM解析結果から、X-Y方向の撓みについては、R形状部4箇所大きく肉抜きを設けて、R部が柔軟に撓む様にした。その結果、両シャフト間に偏芯が発生しても部材間の摺

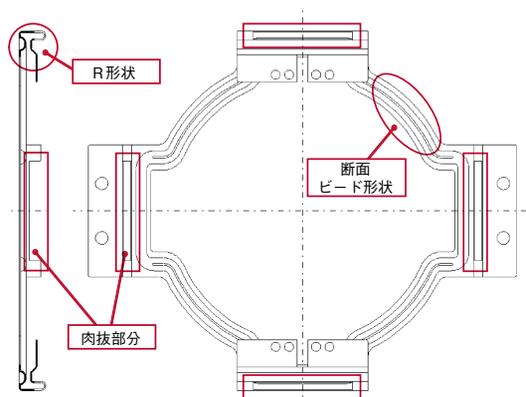


図5 カップリング設計変更図
Design change of coupling

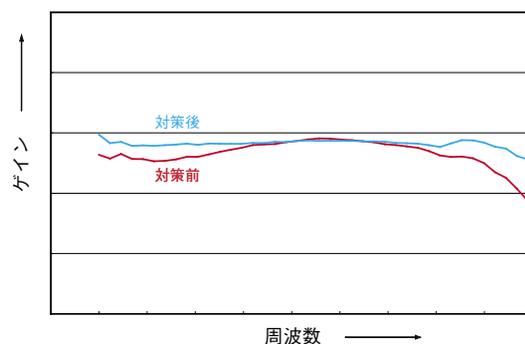


図6 対策前後での信号振幅低下比較
Amplitude plot before and after design change

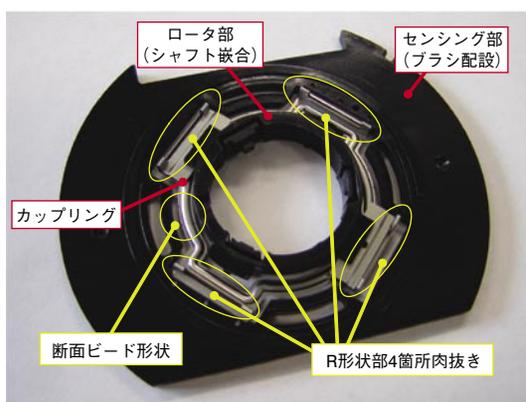


写真1 ステアリング側ロータ設計変更品
Steering-side rotor after design change

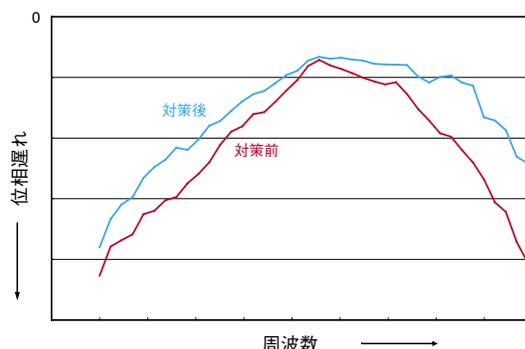


図7 対策前後での信号位相遅れ比較
Phase plot before and after design change

動摩擦が大きくなることなく、ガタを吸収できる構造となった。また、回転方向についてはビードを設けることでカップリング全体の剛性をアップさせたところ、シャフト回転に対してセンシング部に配設したブラシの追従性が向上し、シャフト間に高周波数の揺動を印加した場合の信号応答性が改善した。図6、図7にシャフト揺動時の回転周波数に対する信号応答性の振幅低下と位相遅れの改善効果を示す。また、カップリングだけでなく、それに付随するロータ部の肉厚を増す等、ステアリング側ロータ全体で設計改善を行った。また、設計変更後のセンサ試作品を試験車両に搭載し、実際に車両操作時のフィーリングを確認した。その結果、ステアリング回転時の引っかかり感もなく、操舵フィーリングも充分満足いくものとなった。

3.2 静粛性

3.2.1 静粛性に対する狙い

昨今、各カーメーカーでは車両全体の静粛性の向上に力を入れており、車両の各構成部品一つ一つに対する要求も非常に厳しくなっている。接触式舵角トルクセンサについても、センサ自体が発生する騒音の低減を開発当初から強く要求された。特に一番問題となる音は、JIS C 1513で定義されている1/3オクターブバンドでの中心周波数3150 Hz帯域に高いピーク音圧が発生している点である。そのため、この3150 Hzのピーク音圧の要因を調べる必要があった。

センサの発生する騒音としては、ステアリング回転時に接点であるブラシと基板間の摺動音や、センサの回転軸受・筐体

形成する樹脂成型品ハウジング同士の摺動音等がある。特にブラシと基板の摺動音は、ブラシと基板表面が共に金属同士の摺動であり、非常に耳障りな音が発生する。前述の3150Hzピーク音圧が、ブラシ基板間の摺動音ではとの疑いがあり、ブラシと基板間の摺動音の発生原因・対策の検討を重点的に進めた。

3.2.2 摺動音低減に対するブラシ設計について

まずは、ブラシ設計の観点から検証を進めた。

第一に、ステアリングが回転し、ブラシが基板と摺動する際のブラシの固有振動数を測定するため、直接基板と接触するブラシが外部から視認可能なセンサを試作し、センサ外部からレーザ式振動測定計を用いて、センサ回転時のブラシの振動数を測定した。その測定模式図を図8に示す。

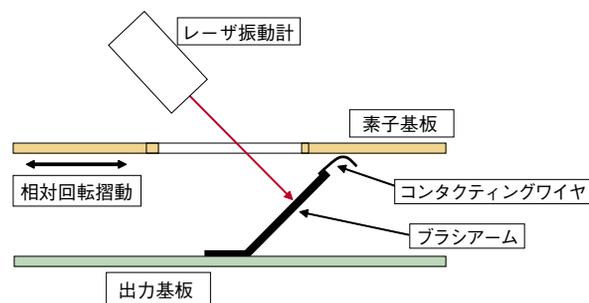


図8 ブラシ振動測定模式図
Principle of vibration frequency measurement

その結果、本センサに搭載のブラシ総てに3150 Hzに非常に近い振動が確認された。

また、上記検証と同時にFEM解析を行い、ブラシが摺動する時に出現し易い振動モードを幾つか検証した。その中で一番出現しやすい振動モードを図9で示す。この振動モードは、ブラシ先端に配設され、実際の摺動面となるコンタクティングワイヤが基板表面との摺動時に全体で横に振動するモードであり、このモードでの振動数3157 Hzは、前述の3150 Hzと非常に近似している。また、この振動モードではブラシアーム自体の大きな振動は見られなかったが、別の振動モードでブラシが上下に振れるモードも確認されている。

上記の振動測定結果及び振動解析より、問題となっている3150 Hzの音が下記のメカニズムで発生することを確認した。

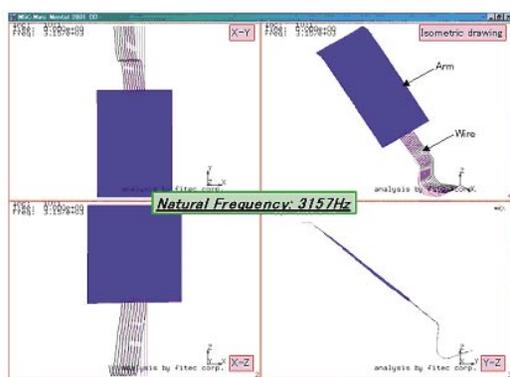


図9 FEM解析でのブラシ摺動時振動モード
Vibration mode of brushes based on FEM analysis

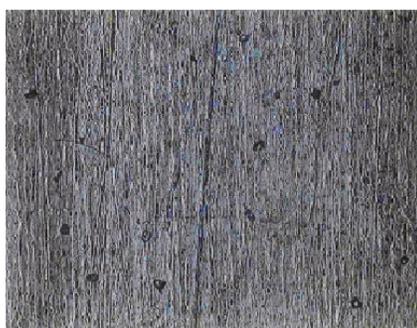


写真2 音圧高品のめっき表面写真(×250)
Gold plated surface of high audible noise sample



写真3 音圧低品のめっき表面写真(×250)
Gold plated surface of low audible noise sample

- ・ ブラシ先端のコンタクティングワイヤが基板表面を摺動する際、ワイヤ長手方向に対して左右方向に往復運動する
 - ・ その振動がブラシアームに伝わり、ワイヤとブラシアームが全体的に振動し3150 Hzの振動を持つ
 - ・ ブラシアームが振動を増幅して、甲高い音を発生させる。
- この検証結果に基づいて、量産対応も考慮した実現可能な音対策設計案を検討した。

3.2.3 摺動音低減に対する基板(めっき面)について

ブラシ設計の検証と平行して、基板設計についても検証を進めた。

素子基板表面と出力基板側に設置されたブラシとが摺動し、前述の3150 Hzバンドでの音圧が発生することが前項で判明したが、更なる問題として、基板のロット毎にめっき状態のばらつきが発生し、ロットによっては10 dB程度のばらつきが発生した。そのため、めっき面の組成、及び、めっき面表面状態について音圧の高いものと低いものとでその違いを比較・検証した。

まず音圧の高いものと低いものとめっき面の表面状態を示した写真を写真2、写真3に示す。音圧の高いサンプル写真2の表面状態が全体的に粗いものに対して、写真3の音圧の低いサンプルはめっき表面が細かいことが確認できた。そこで、めっき面の表面状態を数値化できる要素を検討した。当初、平均粗さ(R_a)や最大粗さ(R_{max})などの数値で相関が取れると考えたが、音圧との相関は見られなかった。そのため、別の要素で音圧との相関を取ることが可能であるか検証を行い、その結果ブラシとの摺動摩擦力との相関に注目することとした。

以下に、素子基板めっき面とブラシの摩擦力の測定結果を図10に示す。フォースゲージと回転ステージを組合せた専用のブラシ基板間回転摩擦力測定器を製作し、摩擦力を測定したところ、音圧の低い素子基板めっき面はブラシとの摺動摩擦力も低い結果となった。そこで、音圧低減の対策案としてブラシとの摺動摩擦力の小さい表面処理方法を調査することとした。

3.2.4 実施対策案について

上記のブラシ設計とめっき表面処理方法の検証結果から前述3150 Hz対策案を検討し、下記の案を対策案として実施することとした。

まず、ブラシ設計の検証結果に基づき、コンタクティングワイヤやブラシアームの形状変更を検討したところ、ブラシの質量を増加する設計変更が最も効果的であることが判明し、設計

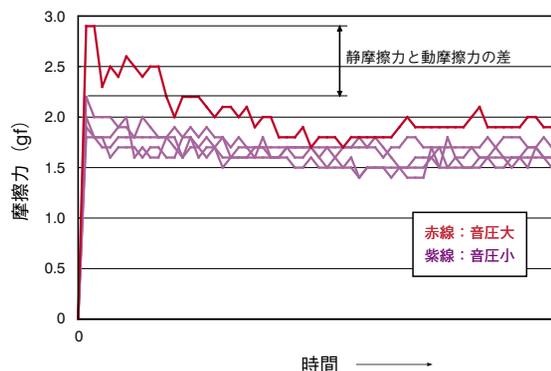


図10 めっき面とブラシの摩擦力測定結果
Friction between plated surface and brush

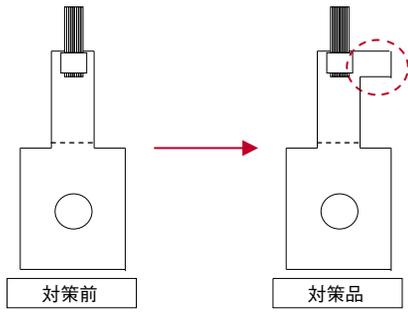


図11 ブラシ変更形状
Design change of brush

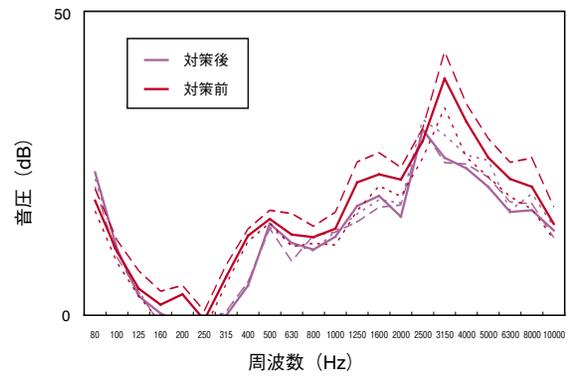


図12 摺動音対策品音データ
Audible noise data of countermeasure product

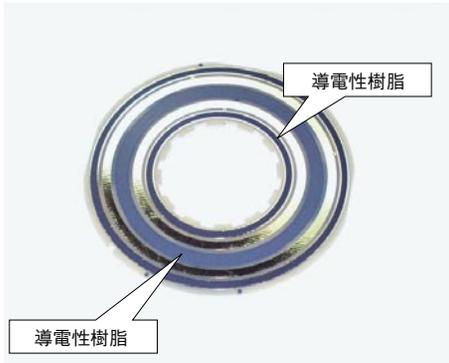


写真4 導電性樹脂オーバーコート付素子基板
Element substrate coated with conductive resin



写真6 接触式舵角トルクセンサ外観
Appearance of steering torque and position sensor

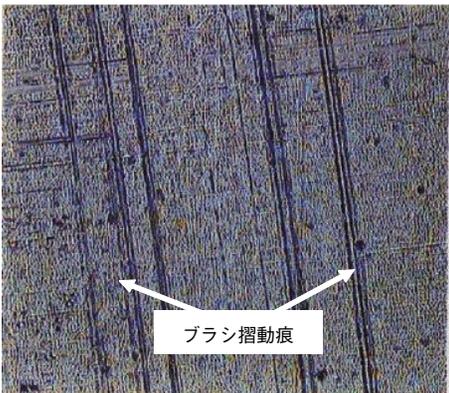


写真5 金めっき面表面写真(×250)
Gold plated surface of countermeasure product

変更として織り込むこととした。

図11にブラシの変更形状を示す。ブラシの配置スペースと今までのブラシ接点の接触信頼性の保持を鑑みて、ブラシの重量増分を、ブラシアームを非対称形状にすることで対応した。

また、ブラシとの摺動摩擦力の小さい表面処理方法として、めっき表面の導電性樹脂でのコーティングとめっき表面処理方法の変更で対応した。写真4に示すように導電性樹脂コーティングした素子基板を採用することで、仮にめっき面の表面が粗くても、磨き面の目に導電性樹脂が入り込み、平滑な摺動面を形成することができる。また、コーティングで対応できないめっき表面については、低摩擦力のめっき処理方法を採用することとした。新めっき工程では、Ni・Auめっき前処理で化学研磨処理を多くすることにより、物理的な研磨で発生していた研磨

の粗さばらつきや深浅の差が抑制可能であり、写真5で示すようなめっき表面の円滑さを出すことができる。

これにより、3150 Hzで発生した高いピーク音圧を大きく低減することができた。対策前後での1/3オクターブ周波数測定の結果を図12に示す。

4. 今後の展開について

本センサは前述の客先要求である、操舵性・耐久性・静粛性の改善を達成し、2003年4月から量産を開始した。本センサの外観を写真6に示す。今後、更に操舵性、静粛性の向上を図る。

5. おわりに

接触式舵角トルクセンサの開発に際しては、従来のセンサ以上に高度な性能が必要であり、乗り越えなければならない問題が多々あったが、関係者が一丸となって量産に漕ぎ着けることができた。今後、EPSシステムの需要増加予測を鑑みると、本センサの需要も更に増加することが予想される。

最後に、本センサを開発するにあたりご協力頂いた東京コスモス電機株式会社殿、その他関係者の方々に厚く御礼申し上げます。