

電動パワーステアリング用操舵センサの開発

Development of Steering Sensor for Electric Power Steering

須田 均*	三重野 敏幸*	川越 浩行*
Hitoshi Suda	Toshiyuki Mieno	Hiroyuki Kawagoe
滝沢 純*	土方 久美子*	北沢 浩一*
Jun Takizawa	Kumiko Hijikata	Hirokazu Kitazawa

要 旨

電動パワーステアリング用として、操舵トルクと操舵回転速度をセンシングできる操舵センサを開発した。

操舵トルクは、トーションバーによる相対捩れ角を、可動鉄芯のカム機構によって軸方向変位に変換し、その変位を差動トランスで検知している。その結果容易に故障検知でき、かつ温度特性・リニアリティ・感度の良好なトルクセンサを、実現できた。

また操舵回転速度は、演算を必要とせず直ちに出力できる7極DCタコジェネレータを用いて、検知している。従って、応答性・リップル率の良好な回転速度センサを、得ることができた。

そして、トルクセンサ・回転速度センサ・インタフェイス回路を内蔵した一体型の構造とすることにより、コンパクトな操舵センサを実用化することができたので、ここに報告する。

ABSTRACT

A new steering sensor has been developed which can sense steering torque and steering speed, for the power steering of the NSX. It uses a differential transformer to monitor the relative helix angle of the steering relative to the torsion bar. It accomplishes this by measuring axial displacement through the cam of the slider. This has made it possible to make a torque sensor capable of easily monitoring trouble and providing optimum temperature, linearity and sensitivity characteristics.

To sense steering speed, it uses a 7-pole DC tachogenerator capable of quick power output without calculation. This has resulted in a steering speed sensor with good response and ripple rate. Coupled with integration of the steering torque sensor and speed sensor with interface circuit, a compact steering sensor can feasibly be created.

1. ま え が き

車社会が発展するにつれ、より高性能な車と共に、より快適で、より運転しやすい車が求められるようになってきた。パワーステアリングもその手段の一つであり、パワーステアリング装着車は年々増加の一途をたどり、軽自動車も含め広範囲に普及しつつある。

しかし、従来のパワーステアリングはほとんどが油圧システムで、常に油圧ポンプをエンジンで駆動している為、高速走行等のパワーアシスト不

要時でも、エンジンの馬力損失を伴う。

ホンダNSXに搭載された電動パワーステアリング(以下EPS)は、操舵時のみ駆動して操舵回転速度に応じてパワーアシストするPower on Demand方式によって、高性能化に寄与し快適な操舵フィーリングを得ることができる。このEPSは、従来の油圧パワーステアリングと異なる特徴を、以下の通り有している。

1) バッテリーを電源とし、操舵時のみ駆動することで、エンジンの馬力損失が低減でき、出力や燃費向上に寄与する。

* 朝霞北研究所

- 2) 電子制御により、リニアな操舵感やキックバック低減等、良好な操舵フィーリングが得られる。
- 3) アシスト機構がギヤボックスと一体化され、ポンプ・配管系が不要なのでコンパクトでスペース性・搭載性が良い。特に、ミッドシップエンジン車に対しては、パワーアシストの応答性、重量面で有利である。

このEPSのシステム全体に関する特徴や効果については、“電動パワーステアリングの開発”等⁽¹⁾⁽²⁾で、既に報告されているので、本稿では特にメインセンシング部の操舵センサの開発について、報告する。

2. システムの構成

図1のNSXにおけるシステム搭載図に示す様に、EPSは以下の主要部品によって、構成されている。

- 1) 操舵状態を検知する操舵センサと、アシスト力を発生させるモータを、内蔵したステアリングギヤボックス
- 2) 入力信号を基に最適なアシスト力を計算する

と共に、各機能部品の状態とユニット自身を診断するコントロールユニット

- 3) コントロールユニットからの信号によって、ギヤボックス内のモータを駆動させるパワーユニット
- 4) 車両の走行速度を検知する2系統(スピードメータ & ATスピードセンサ)の車速センサ
- 5) 故障時に、システムの異常を表示するEPS警告灯

3. 操舵センサの概要

EPSの制御システムは、図2の制御フローに示す様に、操舵トルク量・操舵回転速度・車速を使ってアシスト用モータの駆動電流を決定し、操舵トルク方向・操舵回転速度・車速から制御モードの切換えを行い、きめ細かいパワーアシストを具現化している。

操舵センサは、その中で操舵トルク量・方向と操舵回転速度・方向を、検知している。

この操舵センサは、図1に示す様にメカトロニクス一体化構成としてコンパクトにまとめる為に、ギヤボックス部に配置した。

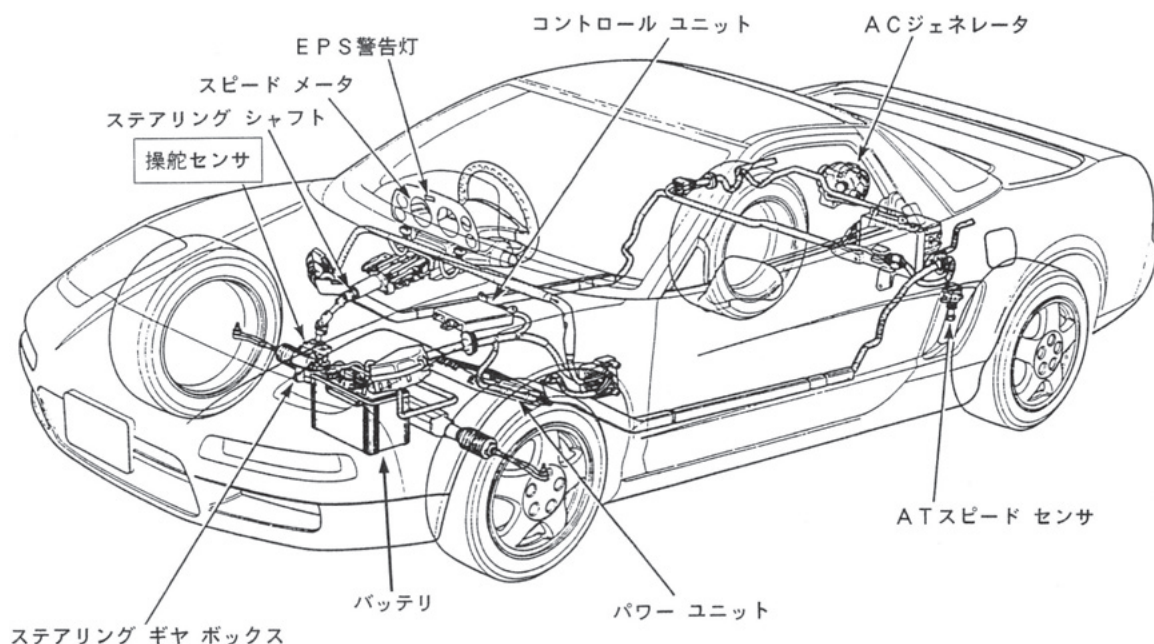


図1 システム搭載図

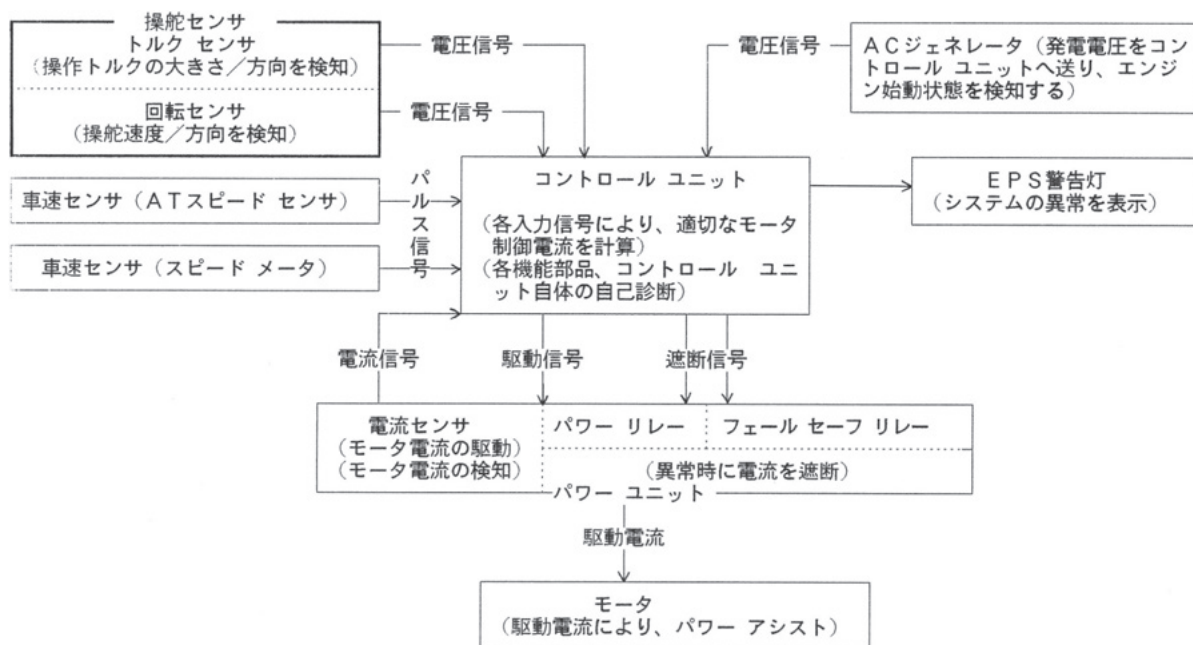


図2 制御フロー

4. トルクセンサの検知方式

現在EPS用のトルクセンサは、以下の方式が量産されている。⁽³⁾

- 1) トルク伝達軸の相対捩れ角を、ポテンシオメータの抵抗変化として検知する。
- 2) トルク伝達軸の相対捩れ角を、インダクタンスの変化として検知する。

それに対して、今回開発したトルクセンサは、次の理由により、トルク伝達軸の相対捩れ角を、可動鉄芯の軸方向変位に変換し、その変位を差動トランスの出力として検知する方式とした。

- 1) 差動トランスを用いることで、検知部と被検知部が非接触となり、信頼性が高い。
- 2) 差動トランスを用いることで、制御用と故障診断用の二重回路で構成でき、故障検知が容易である。
- 3) 可動鉄芯の軸方向変位を、磁束変化として検知するので、感度が高い。

5. トルク検知原理

図3のトルク検知モデルに示す通り、回転するステアリングホイールの操舵トルク量と操舵トルク方向を、電気信号として出力する。

まず操舵トルクを、トーションバーのばね効果

によって、図4に示す相対捩れ角に変換する。その関係は、次式となる。

$$T = \frac{\tau_a}{a} \int_0^a r^2 dA = \frac{G I_P}{\ell} \theta = k_T \theta \quad (1)$$

T : 操舵トルク

τ_a : トーションバー表面の剪断応力

a : トーションバー振り部半径

r : トーションバーの任意半径

dA : 半径 r における微小断面積

G : 横弾性係数

I_P : 極慣性モーメント

ℓ : トーションバーの振り有効長

θ : 相対捩れ角

k_T : 比例定数

次に相対捩れ角を、可動鉄芯のスパイラル溝と出力シャフトの縦ガイド溝のカム機構によって、軸方向スライド量に変換する。その関係は、次式となる。

$$\theta = \frac{2\pi}{p} X = k_\theta X \quad (2)$$

p : スパイラル溝のピッチ長

X : 軸方向スライド量

k_θ : 比例定数

さらに可動鉄芯の軸方向スライド量を、差動トランスの差電圧出力として検知する。差動トランスは、図5に示す様に、一次コイルと上下の二次コイルから構成されていて、一次コイルに一定の交流電流を通し、差動トランスを励磁すると、各々の二次コイルに可動鉄芯の位置に応じた誘導電圧が生ずる。その差電圧を、出力電圧として検知する。特に、可動鉄芯の移動範囲では、個別出力は軸方向スライド量に比例するとみなせるので、その関係は、以下の通りとなる。

$V_1 = k_1 X$ (3)

$V_2 = k_2 X$ (4)

$V = V_1 - V_2$ (5)

$\therefore X = \frac{1}{k_1 - k_2} V = k_X V$ (6)

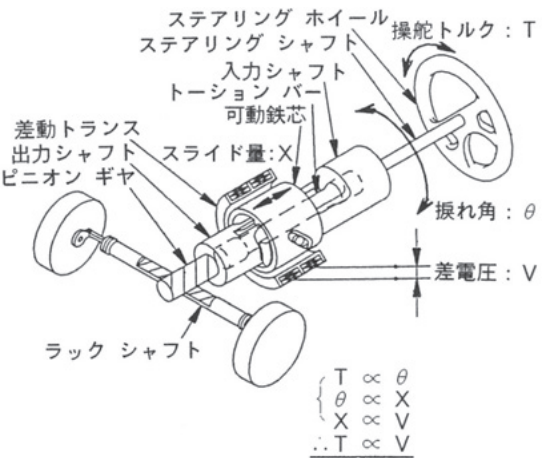


図3 トルク検知モデル

V_1, V_2 : 差動トランスの個別出力電圧

V : 出力電圧

k_1, k_2, k_X : 比例定数

(1)(2)(6)式はいずれも比例関係にあるので、操舵トルクを差電圧出力として検知できることになる。

$T = K_T \theta = k_T k_\theta X$

$= k_T k_\theta k_X V$

$= K V$

(7)

K : 比例定数

以上についてグラフに表わすと、図6に示す様な相互比例関係となる。

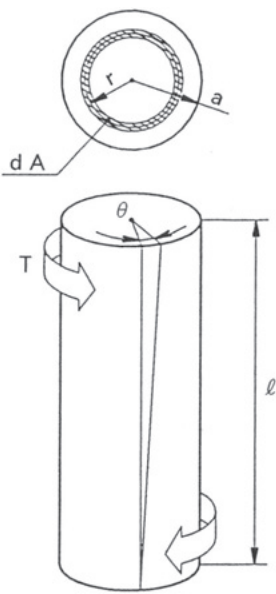
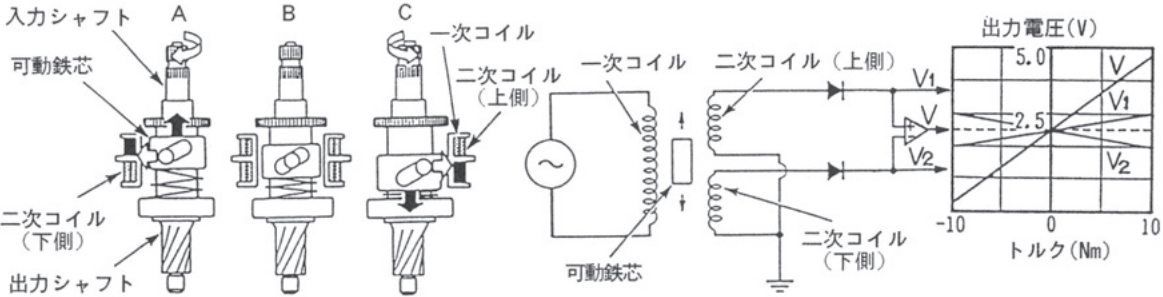


図4 丸棒の捩れ状態図



図中No.	操舵条件	可動鉄芯の動き	二次コイルの誘導電圧
A	右操舵（負荷転舵時）	上に移動	上側コイルの電圧が高くなり、下側が低くなる
B	直進（または無負荷時）	ニュートラル	上下コイルの電圧は等しい
C	左操舵（負荷転舵時）	下に移動	下側コイルの電圧が高くなり、上側が低くなる

図5 差動トランスの検知原理

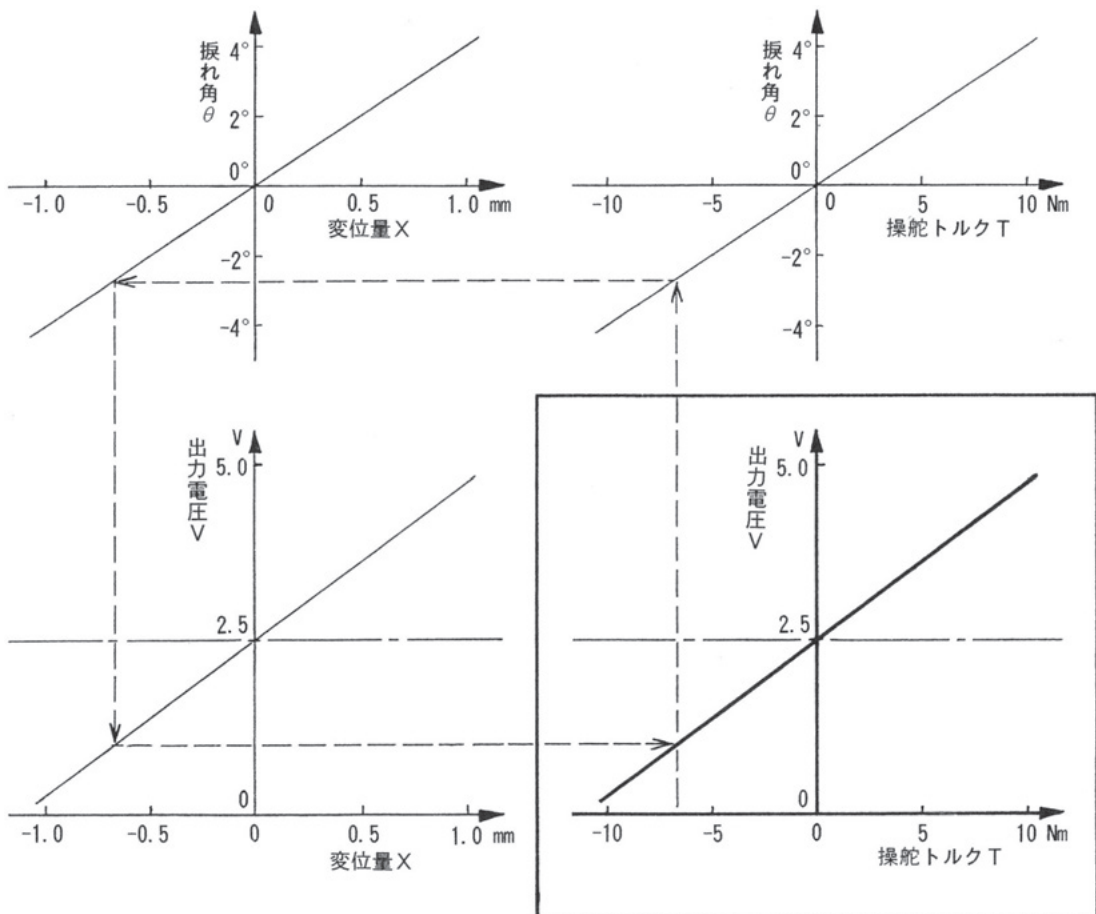


図6 操舵トルクと出力電圧の関係

6. トルクセンサの構造

図7に示す様に、ステアリングホイール側の入力シャフトと、ラックシャフト側の出力シャフトは、その中央部にトーションバーを配し、トーションバーの両端部共ピンで結合している。また入出力シャフトは、その間にニードル軸受を介してヒステリシスへの影響と、トーションバーに対する入出力シャフト間の曲げモーメントを、抑えている。

なお、トーションバーに対する過負荷防止は、図7に示す通り、ウイングの噛み合いで規制されるストッパー構造で行っている。

入出力シャフト外周には、可動鉄芯が跨っており、可動鉄芯は内周突起部で出力シャフトのガイド溝を軸方向のみ摺動し、入力シャフトと一体のガイドピンが、可動鉄芯のスパイラル溝を摺動する構造となっている。可動鉄芯の両端部には、磁路を遮断して磁束変化を大きくする為、非磁性のリングを設けている。

この可動鉄芯の外周には差動トランスのコイルが配置され、そのコイルの全周を円筒形のヨークで包んでいる。また、コイルはケースに内蔵されたインタフェース回路に、結線されている。

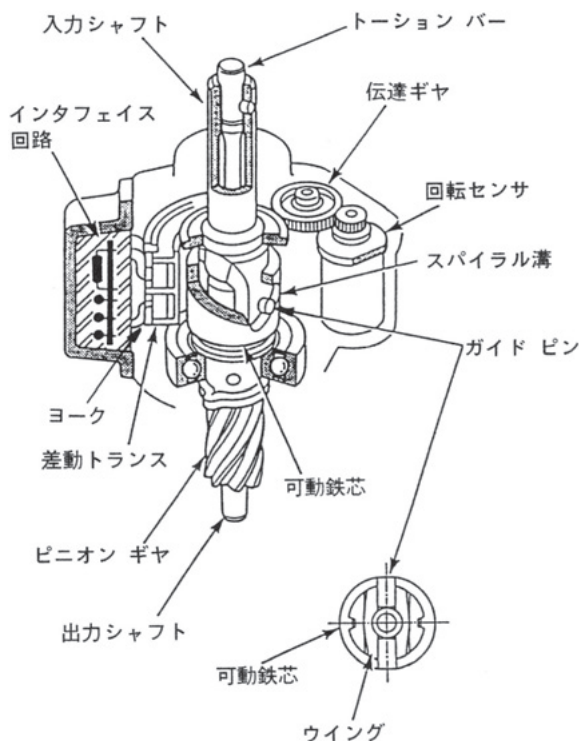


図7 操舵センサの構造

7. トルク検知部の開発

可動鉄芯の軸方向変位は差動トランスによって検知している。しかし、入出力シャフトは、強度上クロムモリブデン鋼を用いている為、シャフトの磁性の影響が可動鉄芯の磁束変化に表われてしまう。そこで、図8に示す様に、可動鉄芯の両端に非磁性リングを組付けることで、入出力シャフトの磁性の影響を排除した。具体的には、図9に示

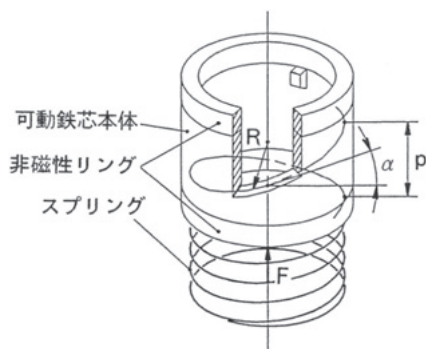


図8 可動鉄芯の説明図

す通り、非磁性リングの無い状態に対して、感度を約9倍に上げることができた。

出力特性のヒステリシスは、ほとんどがフリクションである。特に摺動部のフリクショントルクについては、以下の関係がある。

$$T = FR \left(\frac{\mu + \tan \alpha}{1 - 2\mu \tan \alpha - \mu^2} \right) \quad (8)$$

$$\tan \alpha = \frac{p}{2\pi R} \quad (9)$$

F:ばねのセット荷重

R:可動鉄芯のスパイラル溝の中心半径

α :半径Rにおけるスパイラル角度

μ :摺動部の摩擦係数

フリクショントルク(8)式と、その実測データを、図10に示す。フリクショントルクが、ヒステリシスとして出力に表われない様にする為には、図8に示すスパイラル角度を小さくする必要がある。

ところが、摺動部の摩擦係数に対し、スパイラル角度を充分大きく設定しないと、摩擦力が大きくなって摺動戻り不良を起こす。それを解消する条件は、次式で表わされる。

$$\mu < \tan \alpha \quad (10)$$

また、可動鉄芯は軸方向スライド量を充分取ることによって、出力感度が良くなる。その条件を次式と設定した。

$$X \geq 1 \quad (11)$$

従って、可動鉄芯は(8)(10)(11)式の条件を満たす箇所、スパイラル角度等のカム機構を設定した。

可動鉄芯材料については、軟磁性材料であることと、摺動部に耐摩耗性を有することを必要とした。この相反する条件を満たす為に、磁気特性は母材を低炭素鋼として確保し、耐摩耗性は表面を浸炭することにより満足させた。

差動トランスは、図5に示す様にトルク出力を差電圧Vとして取出している、温度特性が良好である。また、個別出力の V_1 、 V_2 は、いずれも故障診断に用い、システムの信頼性確保に役立てている。

差動トランスの外周部に配したヨークには、可動鉄芯を通る磁路を形成して感度を上げる働きと、外部磁界をシールドする働きをさせている。

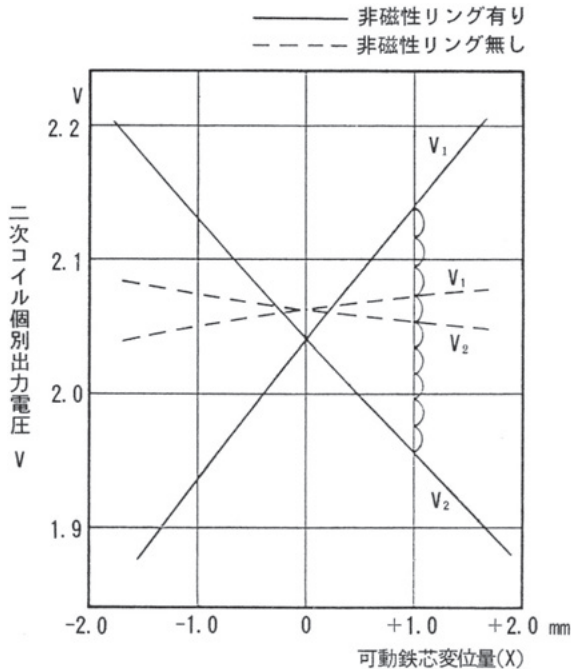


図9 非磁性リングの効果

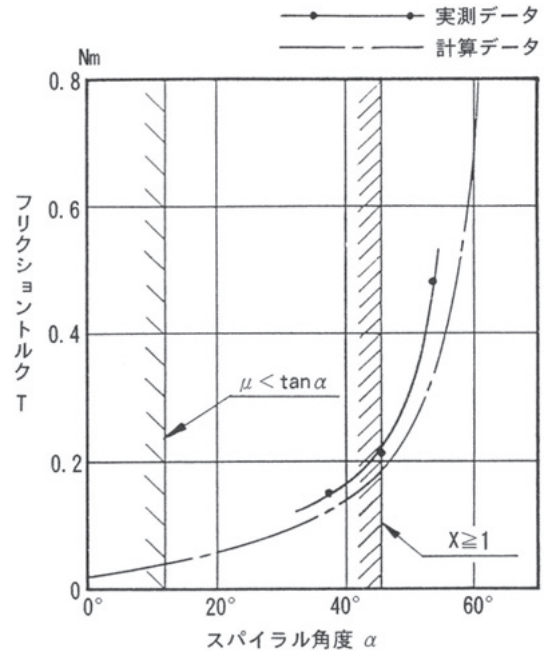


図10 可動鉄芯のスパイラル角度の設定

8. トルクセンサの出力特性

図11に操舵トルクセンサの操舵トルクと出力電圧の関係を、温度特性も含めて表わす。差動トランスを採用したことから、良好な温度特性を得た。また、検出原理に述べた様に比例関係にあることから、リニアリティの良い出力特性を得ることができた。

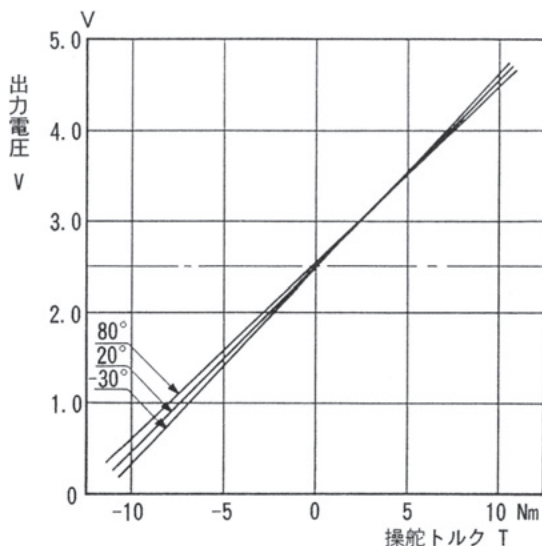


図11 操舵トルク出力特性

9. 回転速度センサの開発

回転するステアリングホイールの操舵回転速度と操舵回転方向を、電気信号として検知する方法は、主として以下の通りである。

- 1) ホール素子、MR素子等を用いた磁氣的検知
- 2) 受発光素子を用いた光学的検知
- 3) DCタコジェネレータを用いた発電検知

本開発では、操舵回転速度に比例したDC電圧を発電でき、演算回路を必要とせず回転方向も含め直ちに出力できる応答性の良いDCタコジェネレータを採用した。

タコジェネレータの回転子は、図12に示す様にリップル率の低い7極ロータとした。また固定子は、安価で汎用性のあるフェライト製マグネットとし、リップル率を理論的に求められる最適値に近付ける為に円筒形状とした。

回転速度センサの回転速度と出力電圧の関係を、温度特性も含めて図13に示す。図12のリップル率と共に、良好な出力特性を得ることができた。

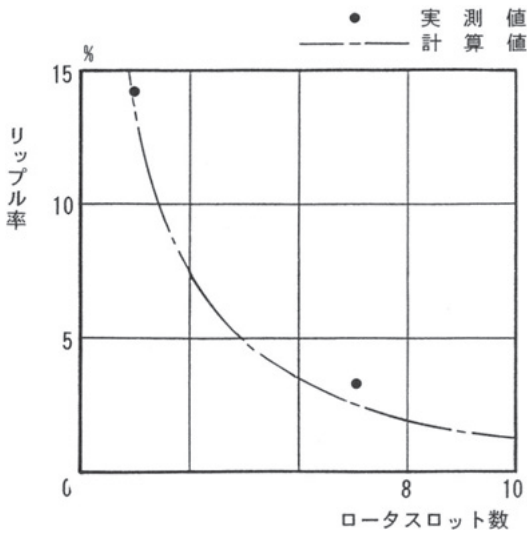


図 12 回転速度センサのリップル率

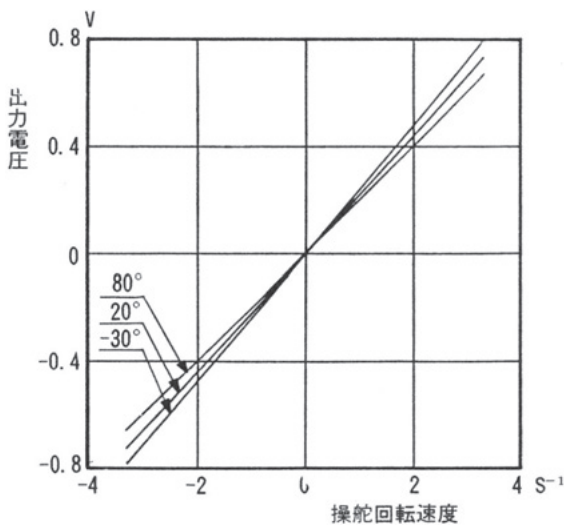


図 13 回転速度センサの出力特性

10. まとめ

- 1) 操舵トルクセンサは、トーションバーのばね特性、可動鉄芯のカム機構、差動トランス構成によって、リニアリティの良好なトルク検知が実現できた。

- 2) 非磁性リング付きの可動鉄芯を、差動トランスで検知する方式によって、高い感度を得ることができた。
- 3) 差動トランスを用いることによって、良好な温度特性を得ることができた。
- 4) 操舵回転速度センサは、7極DCタコジェネレータを用い、直接電圧を出力することで、応答性・リップル率の良好な回転速度検知が可能となった。
- 5) トルクセンサ・回転速度センサ・インタフェース回路を内蔵した一体型の構造とすることにより、コンパクトな操舵センサを実用化することができた。

11. あとがき

パワーステアリングのエレクトロニクス化が、燃費向上・高性能化・軽量化に有効であることから、適用の拡大が期待できる。また、操舵系のエレクトロニクス応用技術は、今後増々発展すると考えられる。この様な流れの中で、さらに小型・軽量・安価・高性能なセンサを、各々のシステムのニーズに合わせて研究開発してゆくことが、今後の取り組むべき課題である。

謝 辞

本操舵センサの開発及び本論文の執筆に対し、関係メーカーの多くの方々に御協力頂き、ここに改めて感謝の意を表する。

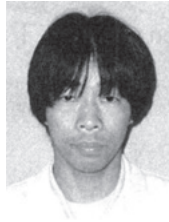
参考文献

- (1) Y. Shimizu, T. Kawai: "Development of Electric Power Steering (EPS)", SAE, 5th Autotechnologies Conference and Exposition, 1991.
- (2) 清水、杉野: "電動パワーステアリングの制御", 機械学会第 68 期総会講演会前刷集, 1991.
- (3) 中山、須田: "電動パワーステアリングの現状と将来", 自動車技術, Vol. 44, No.1, 1990.

■著 者■



須 田 均



三 重 野 敏 幸



川 越 浩 行



滝 沢 純



土 方 久 美 子



北 沢 浩 一