

電動パワーステアリングの開発

Development of Electric Power Steering

清水 康夫*
Yasuo Shimizu

杉野 光生*
Mitsutaka Sugino

河合 俊岳*
Toshitake Kawai

鶴宮 修*
Osamu Tsurumiya

松本 哲也*
Tetsuya matsumoto

伊澤 将隆*
Masataka Izawa

要 旨

新たに、モータを使って直接アシストする電動パワーステアリング(EPS)を開発した。これは、最新のパワーエレクトロニクスと高出力モータ技術を結集したシステムであり、積極的に安定性を向上させるだけでなく、快適性やエネルギー効率の向上を目的とする。

本論では、EPSの開発コンセプト、およびコンポーネントについて詳述したあとで、エレクトロニクスを使った制御手法のあらましを述べる。そして、その効果について前軸荷重450~1025kgのFF車、およびMR車に搭載することによって、油圧システムと比較した。その結果、高速走行における安定性の向上、車両の動特性に適合す戻り特性付与の効果、および実走燃費における5.5%の改善などが確認された。

ABSTRACT

A new electric power steering (EPS) system has been developed. It combines the latest power electronics with high power motor technologies, and is designed to provide not only enhanced stability but also improved comfort and energy efficiency.

This paper describes the concept of EPS and the structure of the components, and then outlines the control strategies of electronics used by EPS. A comparison is then made with hydraulic power steering when installed on vehicles - both front-engine, front-wheel drive and mid-engine, rear-wheel drive, weighing from 450 kg to 1000kg. It shows that EPS contributes more to high-speed stability and achieves better wheel returnability in accordance with dynamic characteristics of the vehicle. Additionally, EPS has achieved a 5.5% improvement in fuel economy.

1. はじめに

近年、自動車技術において、エレクトロニクス化の波及は、めざましいものがある。このことは、自動車技術が生来的に追求されるべき、

- (1) 効率の向上
- (2) 快適性の向上
- (3) 安全性の向上

のいずれに対しても、エレクトロニクスを応用することで、大きな効果が得られるからである。例えば、電子燃料噴射装置は、エンジン的高出力・省燃費化に大幅な効果をもたらし、自動変速装置

のシフトショックは、電子制御化により大幅に改善された。また、アンチロックブレーキは、雪上などの滑り易い路面での制御を容易にした。

上記の観点にたつて、大衆車まで普及し主流となった油圧パワーステアリングを鑑みると、およそ半世紀を経て熟成された技術に対しても、再考すべき時期にきたと考えられる。

本論では、油圧パワーステアリングが生来的に抱えているネガティブな側面の改善と、新しい付加価値を創出するために開発された電動パワー

* 栃木研究所

ステアリングの概要と、その効果について研究段階で得られた知見を紹介する。

2. EPSの開発概念

前述の3つの観点から開発概念として、将来的に油圧パワーステアリングに代わるべき『次世代パワーステアリング』として位置づけ次のように考えた。

即ち、油圧システムのネガティブな側面に対して改善を図ると同時に、新しい付加価値や将来ステアリングの礎となる技術を創出することである。具体的には、前軸荷重 1,000kg までの乗用車に適用できることを前提として、

- ・ 実用燃費 (効率) の改善が図れること
- ・ 油圧パワーステアリングと同等以上の操舵フィーリングを達成すると同時に、車両の動特性に容易に適合できること
- ・ 油圧パワーステアリングと同等以上の安全性が確保できること

更に、システムとコンポーネントの設計概念を、

- ・ シンプルな構成とし、生産性の向上が図れること
- ・ 重要保安部品としての高信頼性設計構造であること
- ・ サービス性、メンテナンス性に優れていること

とした。

3. システムの概要

3.1. 構造と作動フロー

(1) システム構成

図1に示すようにEPSシステムは、

- ・ ハンドルからの操舵入力と車速信号を受けて、アシスト力を発生するラック & ピニオン機構のギヤボックス
- ・ 車両の速度を感知する2個の車速センサー
- ・ パワー供給をON/OFFするリレー
- ・ 過電流時に、溶断してパワーを遮断するヒューズを収容するヒューズボックス
- ・ 故障時に警告する目的と、故障内容を表示させる目的のインジケータライト

などの主要部品から構成されている。

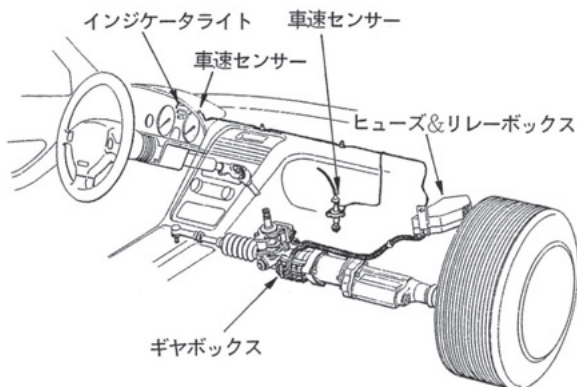


図1 システム構成図

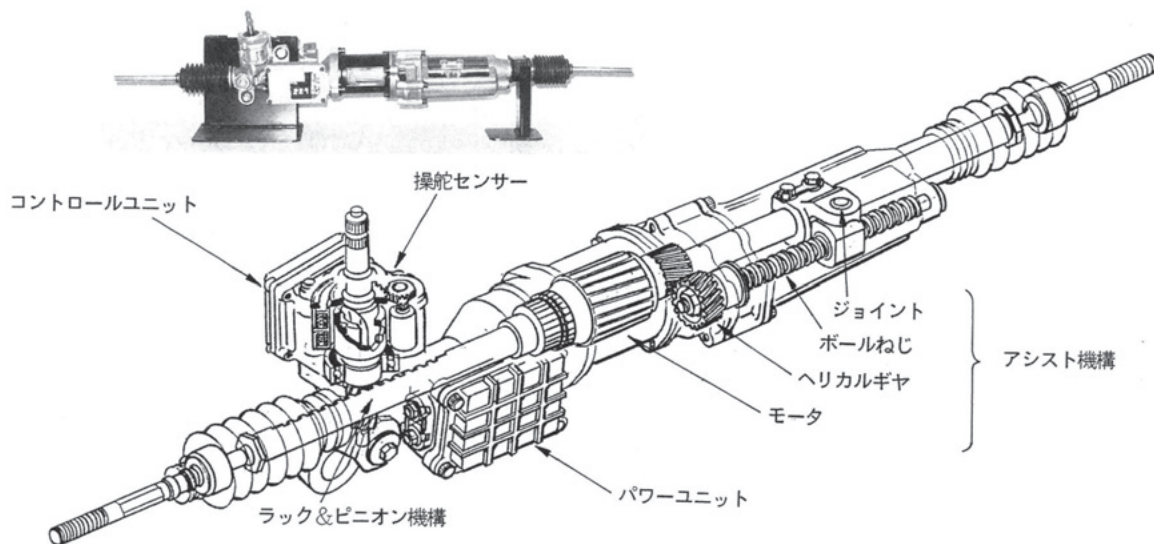


図2 ギヤボックス

(2) コンポーネント

(2.1) ギヤボックス

図2に示すようにギヤボックスは、従来からのラック & ピニオン操舵機構に加えて、

- ・ 操舵入力を感じ取る操舵センサー
- ・ 上記センサー信号と車速信号を主入力として、最適なアシスト力を計算しパワーユニットに出力すると共に、各機能部品の状態、および自身を診断するコントロールユニット
- ・ 上記ユニットからの信号によりモータを駆動するパワーユニット
- ・ モータの回転トルクをボールねじにより推力に変換し、ラック軸に作用させるアシスト機構

などの主要部品から構成されている。

システムの設計段階において、電気系の信頼性を考慮した場合、そのレイアウトに関して下記の

2つの考え方が吟味検討された。

- コントロールユニットやパワーユニットのような電気系部品は、直接外的環境にさらされない車室内に収納すべきである。
- ハウジングを頑丈な収納箱と考えて、電気系部品をギヤボックスに収納する。これによりシステムの簡素化を図るべきである。

結論的にはb)の考えを採用し、図2に示すようにコントロールユニットとパワーユニットをギヤボックスに設けた、いわゆる『メカトロ一体構造』とした。このことによりコントロールユニットやパワーユニットの小型化など、技術課題を抱えることになったが、それ以上の効果が得られた。それは、

- ・ 構成が極めてシンプルになり、軽量化が図れたばかりか、コントロールユニットとパワーユニットのバラツキをも含んだアシスト特性

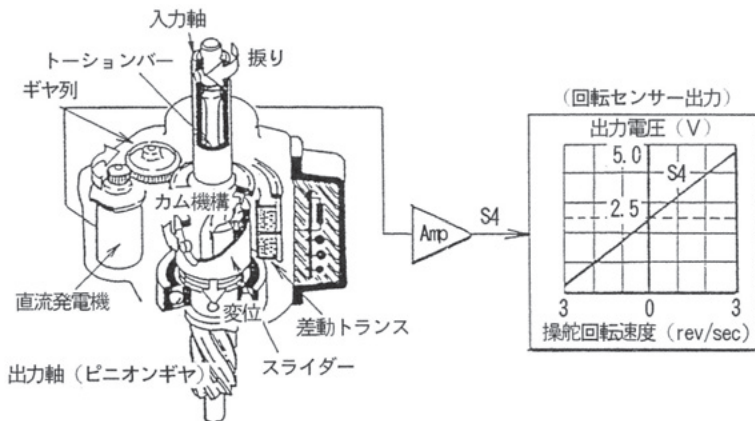


図3 操舵センサー

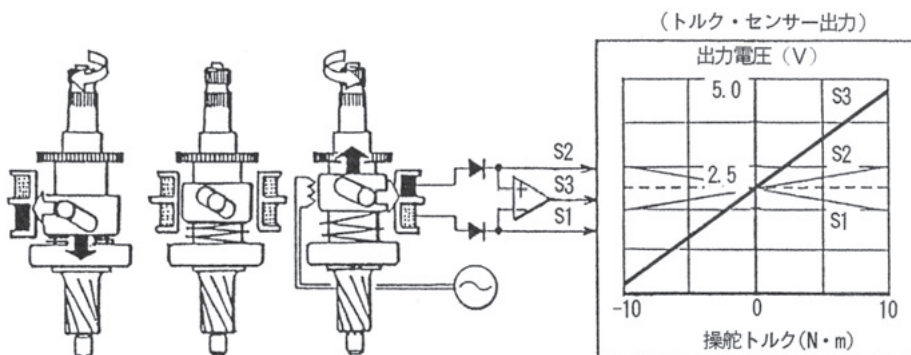


図4 トルクセンサー作動図

を、管理できるようになり品質が安定した

- ・ コントロールユニットの信号ラインやパワーユニットのパワーラインを、車室内外に這い回す必要がないので、信号ラインは外来ノイズの影響を受けにくくなり、またパワーラインからの放射ノイズも減少した
- ・ パワーユニットの発熱を、ギヤボックスに放熱できるので、専用の放熱フィンを設ける必要が無い
- ・ EPSシステムの自動組立化、更に車両への自動組付化への期待がもてること

などである。

次に、それぞれの部品について説明する。

1) 操舵センサー

操舵センサーは、ハンドルの回転トルクを感知するトルクセンサーと、ハンドルの回転速度を感知する回転速度センサーから構成され、ハンドルの操舵状態を感知する。

a) トルクセンサー

図3に示すようにトルクセンサーは、ハンドルに連結される入力軸、ラック & ピニオン機構のピニオンギヤを有する出力軸、両軸を連結するトーションバー、可動鉄心のスライダー、両軸の捩れ角をスライダーの軸方向変位に変換するカム機構、およびスライダー変位を電気信号に変換する

差動トランス (Linear Variable Differential Transformer) などから構成され、図4に示すようにスライダー変位の大きさと方向により、ハンドルトルクの大きさと方向が検出される。図中、S3はトルク出力信号、S1、S2は故障診断用出力である。

差動トランス式トルクセンサーは、検出精度が高く、差動的に出力するので温度特性も良好である。更に、電気系が2重回路で構成されるので、故障検出が確実で信頼性が高い。

b) 回転速度センサー

回転速度センサーは、入力軸に備えられたギヤ列と、このギヤ列に増速回転される直流発電機より構成され、この発電機の回転方向と回転速度により、ハンドル回転の方向と回転速度を感知する。そして、この信号をコントロールユニットに出力する。図中、S4は回転速度出力である。

2) コントロールユニット

図5に示すようにコントロールユニットは、

- ・ A/DコンバータやPWMユニットなどを内蔵した、8ビットの1チップマイクロコンピュータ
- ・ 各センサーからの信号を整合するインターフェース回路
- ・ 後述するパワーユニットをPWM駆動する駆動回路

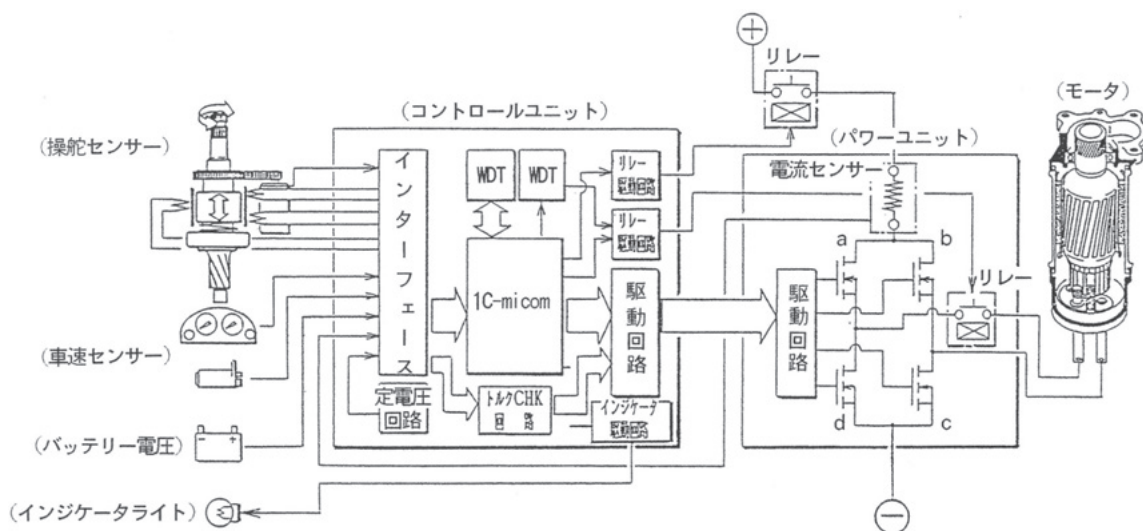


図5 システムブロック図

動回路

- トルク信号をチェックするトルクチェック回路
- 1チップマイクロコンピュータの動作チェックをするウォッチドッグタイマ回路(WDT)
- リレーを駆動するリレー駆動回路
- インジケータライトを点灯／点滅駆動するインジケータライト駆動回路
- 各素子に一定電圧を供給する定電圧回路

などの主要因路から構成され、各センサーの信号により、予め定められたデータテーブルからテーブルルックアップ方式にて、瞬時にデータを呼び出し所定の計算をして、最適なアシスト力を求める。

また、各センサーや1チップマイクロコンピュータなどの故障診断を実施し、異常時にはリレー駆動回路を停止させ、リレーをOFFしモータ通電を断つ。そして、インジケータライトを点灯させると同時に故障モードを記憶し、必要に応じて点滅表示できるようにする。このとき、EPSシステムはマニュアルステアリング動作となる。

前記メカトロ一体構造に対応するために、小型化と耐環境ストレスに対する信頼性設計は、必須の条件であった。開発中は、ディスクリット回路構成のコントロールユニットを使用した。仕様が決定されると、LSI化を図り高密度設計を実施した。その結果、外形寸法でタバコパッケージより一回りぐらい小型化できた。また耐振、耐水性、および耐熱性を考慮し、エポキシ樹脂モール

ド構造とした。図6に、その外観を示す(回路を見せるために、モールド処理を省略した)。

3)パワーユニット

図5に示すようにパワーユニットは、

- モータを駆動するFETブリッジ回路
- コントロールユニットからの信号を受けて、このブリッジ回路を駆動する駆動回路
- パワーユニットに流れる電流を感知する電流センサー
- モータ通電をON/OFFするリレー

などの主要部品から構成され、コントロールユニットの指令に基づいて、モータを駆動する。このときの電流は、電流センサーに感知されコントロールユニットにモニターされる。そして異常時は、リレーにてモータパワーを遮断する。

当初の開発概念である前軸荷重1,000kg程度の車両では、FETブリッジ回路で駆動しなければならない電流は、最大で90A程度である。また、前記メカトロ一体構造に対応するには、小型で信頼性の高いものでなくてはならない。これらの要求を満足するために、セラミック基板にFETチップを実装し、ゲルで密閉したモジュール型を採用した(図7)。これにより大容量でありながら、タバコパッケージより一回りぐらい小型のパワーユニットができた。

FETチップやボンディングワイヤの仕様を決定する際、チップ表面温度を可視化する熱解析技術を応用し、ジャンクション温度の最適化を図った。また、アルミ鋳造製のギヤボックスにパワーユニットを一体的に取付ける方法は、放熱に対し

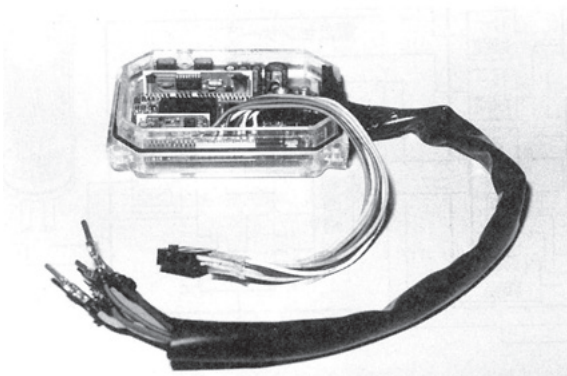


図6 コントロールユニット

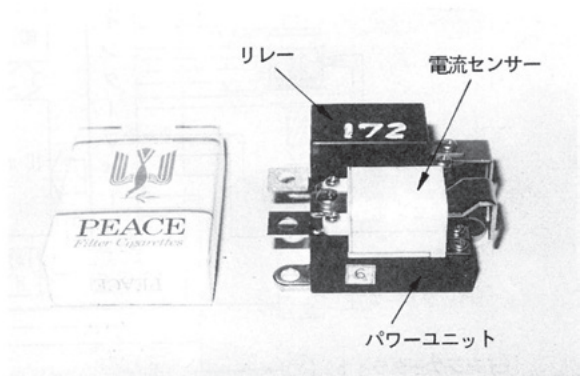


図7 パワーユニット

て有効な手段であることが確認された。

4) アシスト機構

図2に示すようにアシスト機構は、

- ・ ラック軸同軸に配置され、回転トルクを発生するモータ
- ・ この回転トルクをボールねじに伝達するヘリカルギヤ
- ・ このギヤを介して、モータ回転トルクを推力に変換するボールねじ
- ・ ボールねじ推力をラック軸に作用させるジョイント

などの部品から構成され、モータの回転トルクを滑らかに、且つ効率良く推力に変換する。

大きな推力を発生させるには、式(1)に示すように、推力変換比 i/ℓ を大きくするか、モータ

$$P = 2 \cdot \pi \cdot i \cdot \eta \cdot T_M / \ell \quad (1)$$

(P : 推力、 i : ギヤの減速比、 η : 効率、

T_M : モータトルク、 ℓ : ボールねじのリード)

トルク T_M を大きくするかであるが、操舵フィーリング設定の自由度からいうと、推力変換比を小さくするほうが望ましい。そこで、モータトルクを大きくするために、レイアウトが許す限りモータ外形(94mm)を大きく設定し、しかも6極フェライト磁石を採用した。当初メンテナンスフリーの観点からブラシレス型を検討したが、同寸法でトルクが2/3程度しか得られず、将来に期待して断念した。EPSシテスムに要求されるモータ性能として、下記3項目に適合するよう設計された。

- ・ 低回転高トルク出力
- ・ 小トルクリップル
- ・ 低フリクション

モータトルクはロータの外径の大きさが支配的で、中心部は磁路形成に必要な肉厚を残せば良いので、中空にしてラック軸を通し、軽量化をはかった。

ボールねじは、回転トルクから推力へ、逆に推力から回転トルクへ、滑らかに且つ効率よく変換されなければならないので、下記2点に留意して設計がなされた。

- ・ ナットにモーメントをかけない
- ・ リード角をおおきくする

タイロッドからラック軸に加わる、曲げモーメントによる撓みの影響を受けにくくするために、ボールねじを並行に配置し、ジョイントで吸収する機構を採用した。またこれにより、ねじ軸径を最少限に抑えリード角を大きくすることができた。

(2.2) 車速センサー

車両速度を感知して、車両速度に比例した周波数のパルス列を、コントロールユニットに出力する。ここでは、故障診断を実施するために2個の車速センサーを使用している。

(3) 作動フロー

図8において、白抜き矢印で示されるマニュアルステアリング動作に、黒い矢印で示されるアシスト動作を加えて、操舵力の軽減を図っている。

(3.1) マニュアルステアリング動作

ハンドル操舵入力は、ユニバーサルジョイントを介して、ラック & ピニオン機構のピニオン軸に伝達される。ピニオン軸の回転変位は、ラック & ピニオン機構によりラック軸方向変位、即ち推力に変換される。この推力による軸方向変位は、タイロッドを介してタイヤを回転支持するナックルに伝達され、揺動変位に変換される。したがってハンドル操舵入力は、タイヤを揺動させ、それにより車両の向きを変えることができる。

(3.2) アシスト動作

上記マニュアルステアリング動作に加えて、ピニオン軸上の操舵センサーで操舵入力(トルク、

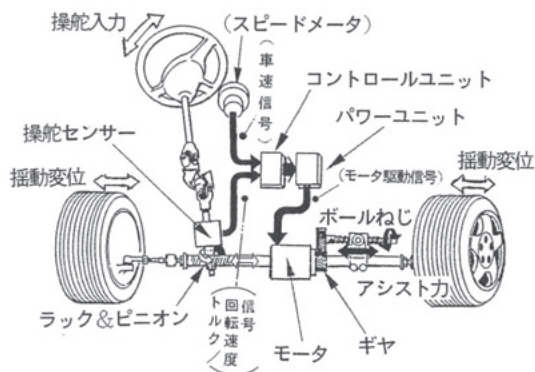


図8 システムの作動フロー図

回転速度)を感知し、コントロールユニットに信号が出力される。コントロールユニットでは、そのほかに車速センサーからの信号が入力され、最適な操舵特性となるように予め設定されたテーブルより、アシスト力を決定して出力データを計算する。あわせて、各センサー信号に基づき操舵状態を判断して、モード切換え(ノーマル、リターン、およびダンパーなど)を行う。この出力データを含むモード切換え信号をパワーユニットに出力する。

パワーユニットは、コントロールユニットからの信号に基づき、モータを駆動する。このモータの発生トルクは、ギヤを介してボールねじに伝達され、ここで滑らかに且つ効率良くラック軸方向のアシスト力に変換される。その結果、この推力はラック軸に作用し、前記ラック & ピニオン機構により変換された推力を減少させる方向に作用し、操舵力を軽減する。そして、このときの状態は操舵センサーにフィードバックされる。

3.2. 制御原理と基本制御

(1) 制御原理

図9にモータの等価回路を示す。モータ端子間電圧を V_M 、インダクタンスを L 、抵抗を R 、誘起電圧定数を k 、回転数を N 、電流を i 、時間を t とすると

$$\begin{aligned} V_M &= L \left(\frac{di}{dt} \right) + R \cdot i + k \cdot N \\ &\doteq R \cdot i + k \cdot N \end{aligned} \quad (2)$$

電流 i は、モータトルク T_M に比例するから比例定数を k_T とすると

$$V_M = k_T \cdot T_M + k \cdot N \quad (3)$$

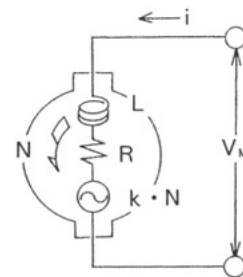


図9 モータ等価回路

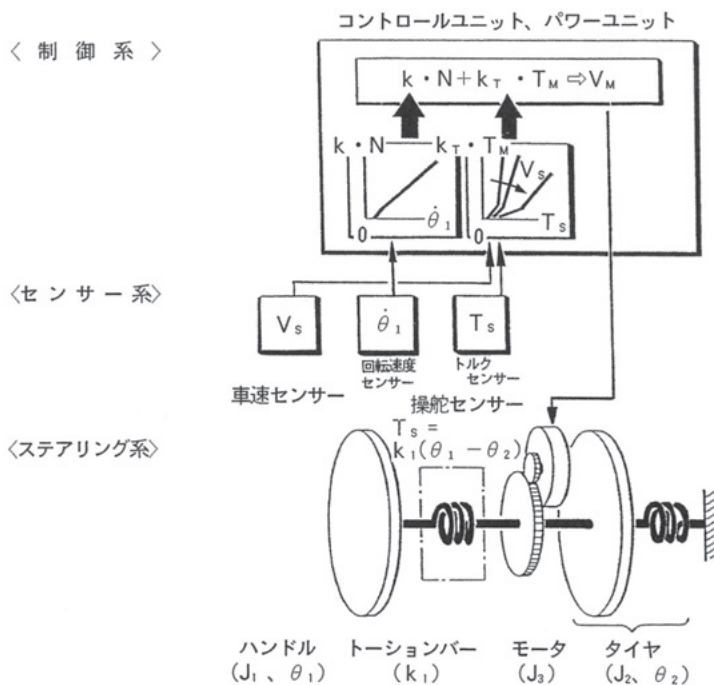


図10 制御原理図

である。したがって図 10 に示すように、操舵トルクを感知するトルクセンサーと、操舵回転速度を感知する回転速度センサーの信号を、コントロールユニットに入力し、最適な操舵特性となるように予め設定されたモータトルクとモータ回転数に対応したデータテーブルからデータを決定し、それぞれのデータを加算することによりモータをダイレクトに制御することができる。

また、車両速度に応じて操舵トルクを増大させ反力感を与えるために、車速センサー信号 V_s をコントロールユニットに入力し、モータトルクデータ $k_T \cdot T_M$ を減少させている。

(2) 基本制御

基本制御は、モータトルクをステアリング系に作用させ、ハンドル上の操舵力、戻り具合、および収斂性を車両に適合させる制御であり、操舵フィーリングを決定する重要な技術である。ステアリングは、ドライバーが直接コントロールする部分であるので、ON-OFF 的では許されず滑らかさを必要とする。そのために、

- 1 ループの演算処理時間を 1m sec 以下
- 20 kHz 以上の PWM モータ駆動

などの技術を開発した。前者は、ソフトウェアによる複雑なデータ処理をできるだけ避け、瞬時に処理可能なテーブルルックアップ方式の採用によ

り、後者は大電流駆動が可能で、しかもスイッチング速度の極めて速いエンハンスメント型のパワー MOS・FET の採用により達成された。

次に、図 11 に示す制御ブロック図を用いて制御手法について述べる。基本制御はノーマル制御、リターン制御、および、ダンパー制御の 3 つの制御から構成されている。

A) ノーマル制御

操舵力を軽減するために、ラック & ピニオン機構のラック軸にモータトルクによるボールねじ推力を作用させる制御である。

まずコントロールユニットでは、

1. 車速センサーからの入力信号を計測処理し、車両速度を車速データ V_s として、データ化する。
2. トルクセンサーからの入力信号を計測処理し、その大きさと方向をそれぞれ、トルク値データ T とトルク方向データとして、データ化する。
3. 回転速度センサーからの入力信号を計測処理し、その大きさと方向をそれぞれ、回転速度データ $\dot{\theta}_1$ と回転方向データとして、データ化する。
4. 車速データ V_s とトルク値データ T に基づいて、それぞれのテーブルから、基本トルクデータ T_B 、トルクゲインデータ T_C 、

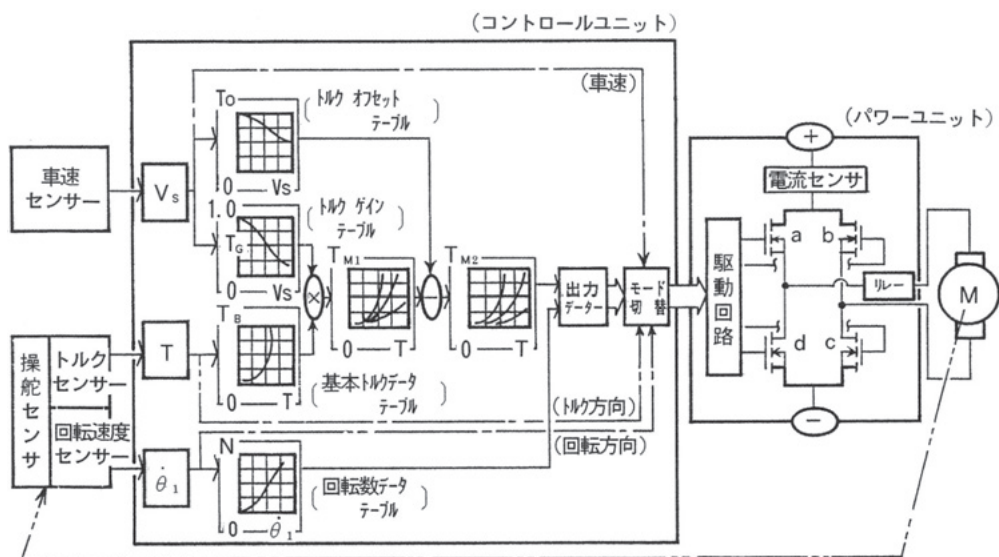


図 11 制御ブロック図

およびトルクオフセットデータ T_0 を検索し、モータトルクプリデータ T_{M1} を算出した後、モータトルクメインデータ T_{M2} を求める。

5. 回転速度データ $\dot{\theta}_1$ に基づいて、テーブルからモータ回転数データ N を検索する。
6. モータトルクメインデータ T_{M2} と、モータ回転数データ N を加算して、モータの出力データを求める。
7. 前記、トルク方向データ (右回転、左回転) よりモータの回転方向 (右回転、左回転) を決定すべく、モード切替えを行いパワーユニットに出力データを出力する。但し、出力データがゼロのときは、モータトルクをゼロにすべくモード切替え (ニュートラル) を行う。

次にパワーユニットでは、

8. モード切替え信号が右回転のときは、FET (a) をON駆動し、同時にFET (c) を出力データに基づいてPWM駆動する。

左回転のときは、FET (b) をON駆動し、同時にFET (d) を出力データに基づいてPWM駆動する。

ニュートラルのときは、FET (a) ~ (d) を全てOFFにする。

以上より、車両速度と操舵回転速度に応じて、操舵力を自由に変えることができる。

B) リターン制御

操舵力を減少させると、セルフアライニングトルクにより、ハンドルが戻されようとするが、ここで、モータトルクを操舵力の減少に応じて、スムーズに減少させなくてはならない。しかしながら、上記ノーマル制御で操舵力を減少させると、図12に示すようにPWMのOFF駆動時、モータのインダクタンスによりFET (b) のダイオードを介してモータ電流 i を流し続けようとする。ことと、モータ誘起電圧によりモータ電流 i を増大させようとする。ことにより、戻り特性が減衰的で応答性に欠ける場合がある。そこで、ノーマル制御の6項以下を変える必要がある。

まずコントロールユニットでは、

6. トルク方向データと回転方向データより判別し、それぞれの方向が不一致の場合はリターン制御、それ以外はノーマル制御としている。したがって、ここではリターン制御にモード切替えする。
7. ノーマル制御と同様である。

次にパワーユニットでは、

8. モード切替え信号が右回転のときは、FET (a) をモータ回転数データ N に基づいてPWM駆動すると同時に、FET (c) をモータトルクメインデータ (T_{M2}) に基づいてPWM駆動する。

左回転のときは逆に、FET (b) をモータ

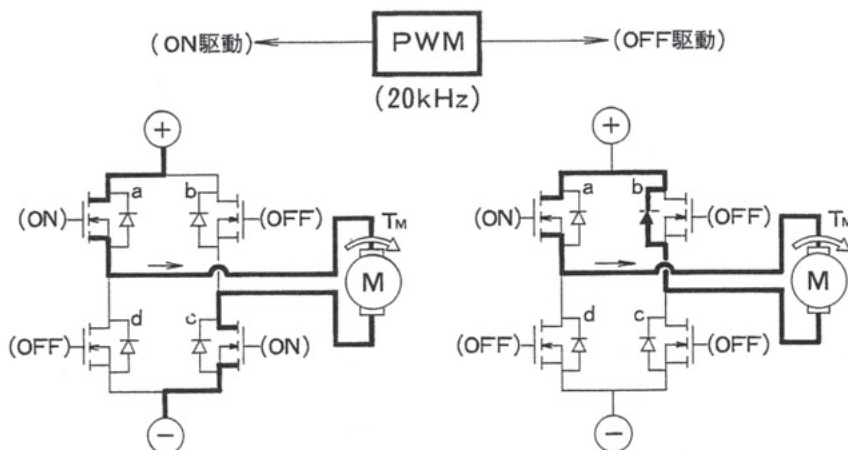


図12 FETブリッジ作動図

タ回転数データNに基づいてPWM駆動すると同時に、FET(d)をモータトルクメインデータ(T_{M2})に基づいてPWM駆動する。

以上より、上述のようなPWMのOFF駆動時の場合でも回転速度信号により、操舵力に応じてモータトルクを減少させることができる。しかも、ノーマル制御時のモータ回転数テーブルと、リターン制御時のモータ回転数テーブルとをそれぞれ別々に設け、リターン制御時のテーブルを変えることにより、ハンドル戻り特性を自由にすることができる。

C)ダンパー制御

図9においてモータ端子間をショートすると、式(3)より

$$T_M = -(k/k_T)N \quad (4)$$

となり、モータ回転数に比例した反対方向のトルク、即ちダンパートルクを発生する。この原理により、積極的にハンドル収斂性を向上させようとするものである。

EPSシステムの場合、従来のステアリングに比べると、モータ慣性分だけステアリング慣性が増大するので収斂性の点では不利になる場合がある。したがって、モータ慣性を比較的大きく設定(推力変換比を大きくしても同じ)した場合の収斂性改善に有効な手法である。

ダンパー制御はリターン制御同様、ノーマル制御の6項以下を変えることにより達成される。まずコントロールユニットでは、

6. モータトルクデータが所定値以下で、回転速度データが車速データより検索されるダンパー制御テーブルデータより大きい場合、即ち、操舵していないにもかかわらずハンドル回転速度が大きい場合、ダンパーモード切替えを行う。

次にパワーユニットでは、

7. モード切替え信号により、FET(c)とFET(d)を同時にON駆動する。

以上より、操舵回転速度に比例した逆方向のトルクを、モータに発生させることができる。また、

ダンパー制御テーブル上のデータを変えることにより、ダンパー制御の効き具合を変えることができる。

4. 信頼性設計

4.1. 高信頼性コンセプト

EPSシステムは、車両の操舵にかかわる重要な装置であるため、高い信頼性が要求される。特に、EPSは電子制御・電気駆動により、必要なときモータパワーを発生させ、ステアリングに直接作用して操舵力を軽減するアシストシステムである。したがって、必要なときに作動しない不動作と、不必要なときに勝手に作動する危険性をなくすることが重要である。そこで設計にあたって、まず最初に考えなくてはならないことは、故障させないための設計であり、次に万一故障したときの安全設計(フェールセーフ)である。

(1) 故障させない為の設計

(1.1)実績尊重

ラック & ピニオン、ボールねじ、操舵センサーなどの重要機構部は、実績のある油圧パワーステアリングの機構や、設計コンセプトを流用した仕様とする。

(1.2)強度保証

ラック & ピニオン、ボールねじ、操舵センサーなどの基本強度部はステアリング強度基準を遵守した仕様とする。

(1.3)ディレーティング(Derating)

パワーユニットのパワーMOS・FETやモータなどの高負荷部品は、通常設計に対して安全率を大きくとった仕様とする。

(1.4)エージング(Aging)

コントロールユニットのような電子部品を対象に、実作動状態を想定したストレスを出荷前にあたえ検査することで、出荷後の偶発故障を減少させる。

(1.5)フールプルーフ(Fool Proof)

誤った使われ方をしたり、不必要に過度のアシストが行われた場合でも、システムを故障に至らしめないよう自己制御する制御能力をもった仕様とする。

(2) 故障時の安全設計 (フェールセーフ)

(2.1) No SFP (Single Failure Point)

システムの中のただ1つの部品が故障しても、システム全体を重大な故障に至らしめない。

(2.2) 故障時マニュアルステアリング

システムが故障した場合、マニュアルステアリングとしての機能を確保する。

a) 確実な故障診断

システムの重大故障につながる可能性のある部品故障は、確実に故障診断を実施する。

b) 確実なパワー遮断

故障診断により故障が検出されたとき、所定の時間内でモータパワーを遮断する。

(2.3) インジケータランプの点灯

1重系故障時にインジケータランプを点灯させ、警報することにより2重系の重大故障に至らしめない。

4.2. 高信頼性確立手法

(1) コンポーネント

(1.1) 操舵センサー

トルクセンサー機構は、入出力軸、変換機構など、従来からの油圧パワーステアリングで使用されているものと同一概念で設計されている。そして、スライダコア変位を検出する要素は、出力側である2次コイルが電気回路を含め2重回路で構成される差動トランスを用いた。これは故障診断が確実であり、電氣的に非接触で検出できるからである。

(1.2) コントロールユニット

故障診断が最も難しいCPUのデータバスラインが基板上に現れないように周辺回路を一体化した1チップマイコンを使用した。また、できるだけLSI化を図りシンプルな構成とし、耐振、耐水性、および耐熱性を考慮して、エポキシ樹脂モールド構造とした。

(1.3) パワーユニット

熱伝導性を向上させチップ温度をさげるためにセラミック基板上にFETチップを実装したシンプルな構成とした。またボンディングワイヤは、放熱性が悪いので並列打ちして1本あた

りに流れる電流を下げタフネスを向上させた。

(1.4) モータ

モータヨークは、ステアリングギヤボックスのハウジング機能をもつので、飛石などの衝撃に対しても十分な強度と剛性のある構造とし、更に万一のマグネット割れにも形状を維持するマグネットモールドとマグネットカバーにて、タフネスを向上させ信頼性を確保した。

(1.5) 車速センサー

パルス入力なので故障診断が難しい。したがって2個用い両者を比較することにより、診断を確実なものにした。車速信号は一般的に不安定なので、故障と診断されても、すぐに故障と判断できない場合が多い。そのような場合は高速側のデータを制御に使用している。

(2) システム

(2.1) フールプルーフ設計

基本制御のほかに、過度の使い方や誤った使い方をした場合においても、システムを故障に至らしめない制御として、フールプルーフ制御を実施している。

・アンロード制御

ラック & ピニオン機構のストローク終端や、タイヤが固定されているときなど、むりやりハンドルを切り込む方向に操舵すると過大電流が流れ、長時間に及ぶとシステムを故障に至らしめる場合が考えられるので、このような状態を回転速度データとトルク値データより検出し、過大電流を防止している。

・移動電流平均値の管理

駐車時に操舵をいたずらに多く繰り返したりすると、特に酷暑においては、FETなどのパワー素子を故障に至らしめる場合が考えられるので、このようなときにパワーユニットに流れる電流を抑制して、故障に至らしめない制御である。

パワーユニットに流れる電流を電流センサーで感知し、このセンサー信号より、所定時間における平均電流値が瞬時に算出できる移動電流平均値を求め、このデータが所定値を越えると、流し得るモータ電流の最大値を減

小さめるもので、この平均値は最終的に低い値で飽和する。したがって移動電流平均値は、パワーユニット内にあるFETなどのパワー素子の発熱量におおむね比例するので発熱温度を設定値に抑えることができる。

・過大電源電圧時のモータ電流抑制制御

極寒時などのように、エンジンがかからないときは、12Vバッテリーを2個直列接続してエンジンをかける場合がある。そのような場合、モータに通常の2倍の電流が流れてしまうので、通常と同等の電流になるように制御している。

バッテリー電圧を入力し、この電圧信号により所定のテーブルを検索し、バッテリー電圧が増大するにしたがって出力データを減少させる出力補正データを求める。このデータにより、出力データを減少補正して電流の増大を抑えるものである。

(2.2) フェールセーフ設計

故障診断により確実にシステム故障を検出し、マニュアルステアリングとしての機能を確保する設計手法の概要を述べる。

1) 故障診断

a. 診断方法

操舵センサー、車速センサー、コントロールユニット、パワーユニットなどの故障診断をマイクロコンピュータにより実施している。診断方法としては下記のように、概略3つに分類できる。

・2者比較

〔基準値との比較－トルクセンサー／電源回路など
同特性品との比較－車速センサー／トルクセンサーなど〕

・入出力間の監視

コントロールユニット内の補助回路（インターフェース／駆動回路など）／パワーユニット

・異常値の特定

回転速度センサー／トルクセンサー／パワーユニットなど

ほとんどの故障診断はマイクロコンピュータの判断機能を利用して実施されているので確実にマイクロコンピュータの故障診

断が実施できることが必要である。そこで、自身による内部チェックと2種類のウォッチドッグタイマー回路を設け、確実なものとした。

b. 故障検出時の対応

上記故障診断により故障が検出されたとき、基本的には下記のごとく対応している。

- ・リレーによりモータパワーを遮断して、マニュアルステアリング動作とする
- ・インジケータライトを点灯する
- ・故障内容をコード化し、1チップマイクロコンピュータ内にストックする。ストックされたコードは、外部動作によりメータパネル内に組込まれたインジケータライトの点滅で表示させることができる

2) 対応技術

故障検出時の対応に必要な技術は、主に次のようなものである。

- ・モータパワーを確実に遮断するために、リレーを2重化した
- ・後述する信頼性検証テストにより、故障が発生してからおよそ20msec以内に、モータパワーを遮断すれば危険性がないことを確認したので、故障診断制御を1msec毎とし、連続的に数回繰り返して故障と診断されたとき、故障と判断する故障検出方法をとった。これにより誤検出防止の目的も達成することができた

4.3. 信頼性検証テスト

検証テストを下記3項目に分け開発レベルに応じて、コンポーネント、システム、および実車へと展開していった。

- ・設計目標に対して、各種ストレスを与え達成度を検証する、性能、耐久、商品性などの各種テスト
- ・実マージンを確認するために、コンポーネントまたはシステムを故障・破壊させて限界を知る、強度、寿命、EMSなどの各種テスト
- ・安全性を検討するために、考えられるシステムの最悪事象に対して実車確認する安全性確認テスト

具体的には、コンポーネント、システムのテストはベンチで実施した。そして最終確認は2.5ℓ FF車に搭載し、極寒、振動、塵埃などのストレスを与えるために、アラスカにて各種テストを含め長距離走行を実施した。

また、酷暑で各種のストレスを与えるために、オーストラリアにて各種テストを含め長距離走行した、などである。

上記各種テストの中で、フェールセーフ設計上、特に重要であると思われる安全性確認テストの一つを紹介する。

走行中に、モータの最大パワーがステアリングに加わる事を想定して、故障診断から故障検出してパワーを遮断するまでの許容時間を設定した。

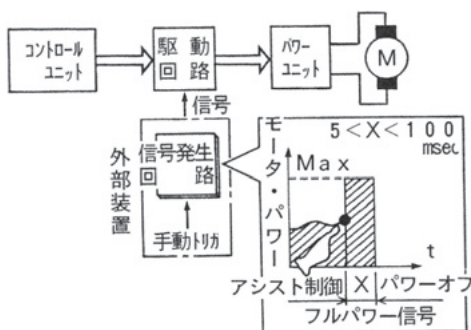


図13 テスト方法

(1) テスト方法

動特性の全く異なる2.5ℓ FF車と3.0ℓ MR車にそれぞれEPSシステムを組み付け、図13に示すような外部装置を取り付けた。そして、高速直進時に手動トリガーにてモータの最大パワーを作用させ、このとき発生する目標進路からのズレ量である横変位量を図14に示すように、車両の速度とヨーレートを計測して算出した。

(2) テスト結果

テスト結果を図15に示す。設計基準値は、当車の横風安定性基準値を参考に決定した。図よりヨー慣性の小さいMR車の方がFF車に比べて横変位量が大きく、したがって若干の余裕をとって20msecとした。

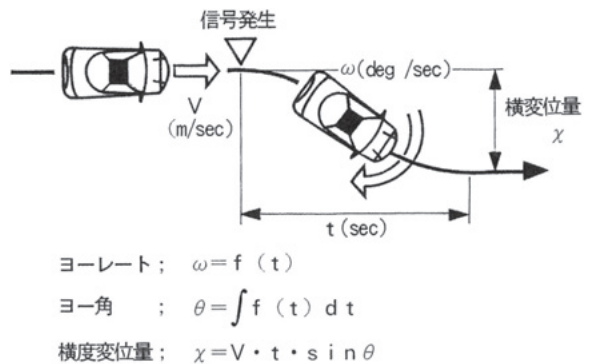


図14 ズレ量の算出方法

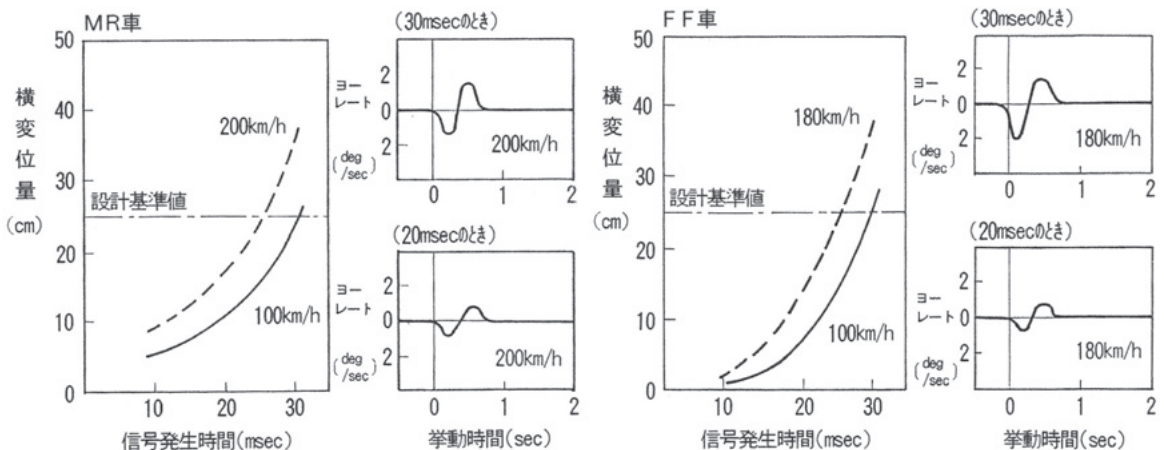


図15 テスト結果

体感結果ではMR車FF車ともに、20msec以下では小さい段差を乗り越えた感じがする程度であり、また30msecではハンドルにキックバックとして感じる程度であった。これらは、いずれも異常なフィーリングではなかった。

4. 効 果

4.1. 燃料消費率の改善

常時エンジンで、油圧ポンプを駆動しなくてはならない油圧パワーステアリングと異なって、EPSシステムは操舵時のみ、しかもハンドル回転

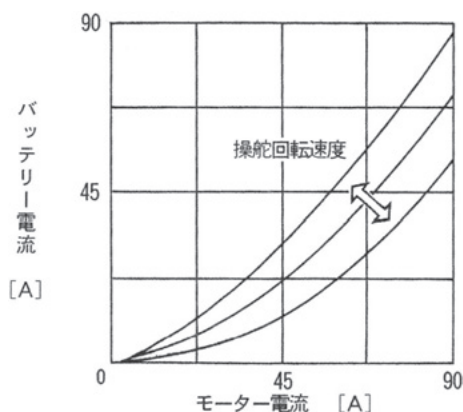


図 16 PWM 駆動による電流特性

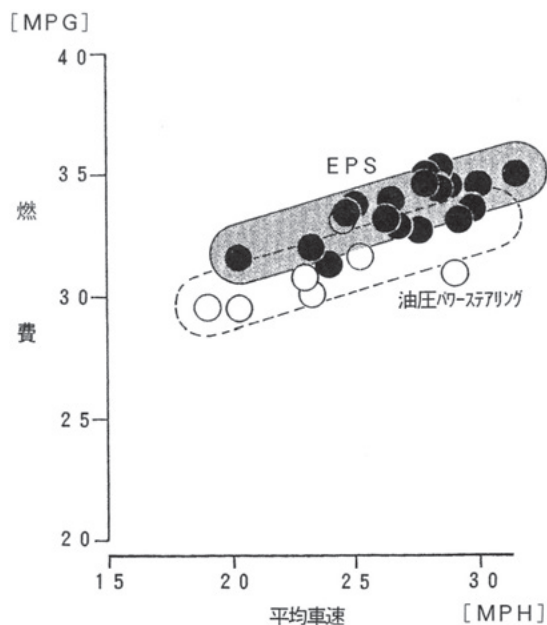


図 17 実走燃費の比較

速度に応じてパワーを供給する“Power On Demand”システムである。したがって図 16 に示すように、同じモータ電流でも操舵回転速度の増大に応じて、バッテリー電流の供給がふえることになる。これは、前記PWM駆動によるものである。

以下に燃料消費率の具体的な改善効果を示す。

(1) モード燃費

2.5 l FF 車を使って、モード燃費を測定した結果を表 1 に示す。

表 1 モード燃費測定結果

	EPS (MPG)	油圧パワーステアリング (MPG)	向 上 分	
			燃 費 (MPG)	率 (%)
L A - 4	20.51	20.01	0.50	2.50
High Way	28.88	28.18	0.71	2.52

LA-4、High Way モード、ともに約 2.5% の改善効果が得られた。これは、モード燃費測定法にしたい、ハンドルを直進状態、即ちパワーアシストしていない状態での比較である。エンジンに駆動される油圧ポンプが、パワーステアリングシステム内に常時、作動油を環流させているのが主原因であり、これによるパワーロスを無くした効果である。

(2) 実走燃費

1.6 l FF 車を使って、実走燃費を測定した結果を図 17 に示す。ドライバー車両とも同一で、システムを付替え、同一条件で約半年間走行したデータである。走行コースは、郊外路を中心に市外路、高速道路、山岳路などで、できるだけ一般的な走行を心がけ、走り方による違いがでないようにした。

実走行なのでバラツキが多いが、実用上の平均車速は 25MPH (40km/h) 程度と考えられるので、このとき約 1.6MPG (5.5%) 程度の改善効果が得られた。

4.2. 操舵フィーリングの向上

ラック & ピニオン機構をもつステアリングのダイレクトで剛性感のある操舵フィーリングは、大方このまじい。一方、不整地走行などの逆入力であるキックバックや、ホイールバランスの狂いに

より発生するハンドルシミーに対しては、ボールねじ機構のステアリングに比べて、影響を受けやすく、必ずしも好ましいものではない。

前記設計構造をもつEPSシステムは、モータパワーを直接ステアリングに作用させているため、モータが直結されており、ロータの慣性マスダンパー効果を利用することができるので、前記キックバックやハンドルシミーに対して、軽減効果が大きい。更に、起動時のトルクが最大でトルクが減少すると回転数が増大するというモータの特性から、駐車時の据切り転舵追従性能を油圧パワーステアリングと同等の性能に設定しても、車両が走りだすと負荷が激減するために転舵追従性が格段に向上する。

また、操舵入力ハンドルトルクと回転速度で感知し、それぞれの信号に車速信号を加えて、最適なアシスト力を計算し、合わせて操舵状態に応じてモード切替えて、モータを直接制御していることは前に述べたが、これにより滑らかな操舵フィーリングはもとより、車速や操舵回転速度に応じた操舵力の設定や、車両の動特性に適合した戻り特性を付与することができる。しかも、それがコントロールユニットのプログラムソフト内にあるテーブル上のデータを変更するだけで、極めて簡単に実施することができる。以下にその具体的な効果を示す。

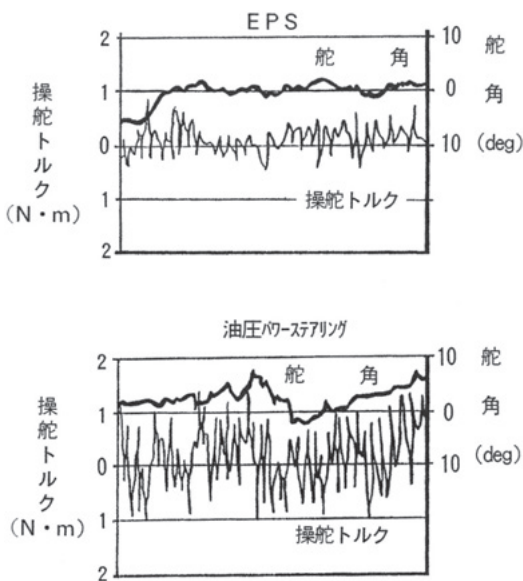


図 18 キックバックの比較

(1) 外乱タフネスの向上

まず、図 18 にコンクリート悪路を 30km/h (18.6 MPH) で走行した場合のハンドルのキックバックを、路面からの逆入力の結果生じる操舵トルクと舵角のとられ量を計測することによりデータ化したグラフを示す。テスト車はともに 2.5 l FF 車を使って、油圧パワーステアリングとの対比で示す。図より操舵トルク、舵角ともに大幅 (約 1 / 2.4) に減少していることがわかる。

次に、タイヤのホイールバランスの狂いによるハンドルシミーを、ハンドル周方向の加速度を計測することにより、データ化したグラフを図 19 に示す。EPS を、2.5 l FF 車、および 3.0 l MR 車に取付け、2.5 l FF 車、FR セダン車、および FR スポーツ車の油圧パワーステアリングと比較した。EPS 搭載車の場合、FF、MR の駆動方式にあまり左右されず、両駆動方式ともにアンバランス重量の増大に対する、ハンドル周上の上下加速度の増大変化が小さく、油圧パワーステアリングよりタフネスが大きいことがわかる。

(2) 転舵追従性の向上

図 20 にモータ出力特性を示す。図において駐車時の据切り性能を最大電流で 90A のところに設定しているが、車両が走りだすとタイヤが転がるので負荷が減少する。このときの電流は約 30A 程度のところまで減少する。これにより回転数が、据切り時の最大回転数に比べ、約 1.7 倍に増大するので、転舵追従性が同じく約 1.7 倍と格段に向上

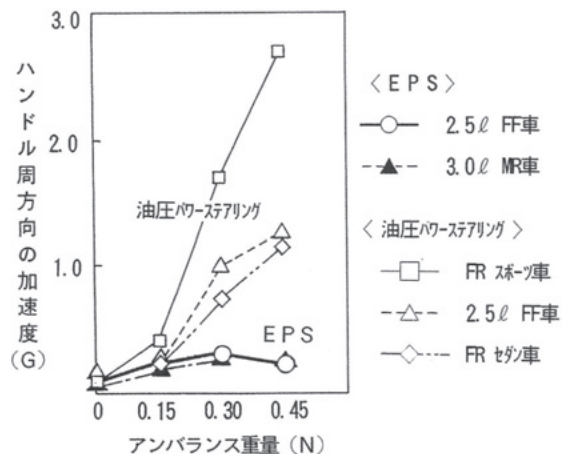


図 19 ハンドルシミーの比較

する。図 21 にその具体的効果を示す。2.5ℓ FF 車において、据切り性能をほぼ同一に揃えたものをテストしたが、低速走行時の取回し性が格段に向上した。油圧パワーステアリングは、負荷が減少して圧力が減少しても、ポンプ吐出流量が殆ど増大しないことによる。

(3) 戻り性能の向上

コントロールユニットのプログラムソフト内にあるテーブル上のデータを変えて、2.5ℓ FF 車の戻り特性を向上させた例を、図 22 の(a)に示す。ヒステリシスの小さい、軽快なフィーリングになっていることがわかる。なお、ここでは軽快なフィーリングを狙ったが、戻りの強い車両に対してはむしろ、(b)のほうが安定感が向上する。この様に、いずれにしても、車両の動特性に適合した戻り特性を付与することができる。

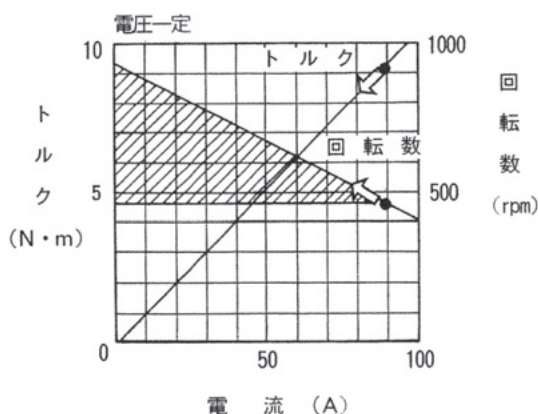


図 20 モータ出力特性

4.3. 安定性の向上

前述のダンパー制御の中で、モータ端子間をショートすることにより、モータ回転数に比例した反対方向のトルク、即ちダンパトルクを発生させることができることを述べた。これは、高速走行中誤ってハンドルを切り過ぎたときや、旋回中から突然切り戻したときの車両特性の乱れを、早期に収束させようとする制御である。

具体的な評価方法として、高速走行中(100km/h)にハンドルから過大舵角入力を与え、車体を強制的にロールさせる。そして、車両自身により収束するまでの特性を計測するもので早期に収束する程安定していることになる。これは、ドライバーの助けを借りずに車両自身で安定化する能力、即ち積極的な安定性を評価しているともいえる。

上述のダンパー制御の具体的な効果を、図 23 に

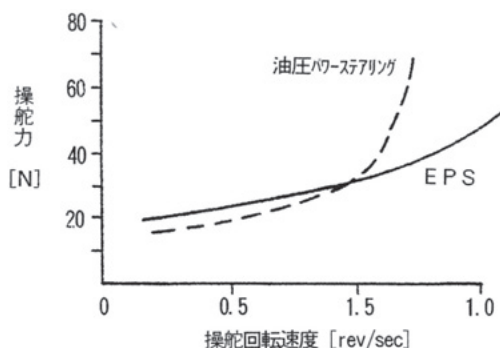
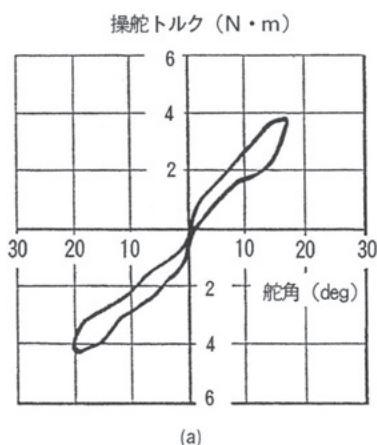
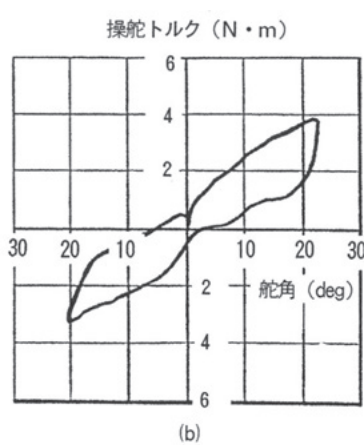


図 21 転舵追従性の比較



(a)



(b)

図 22 操舵特性（戻り特性）の比較

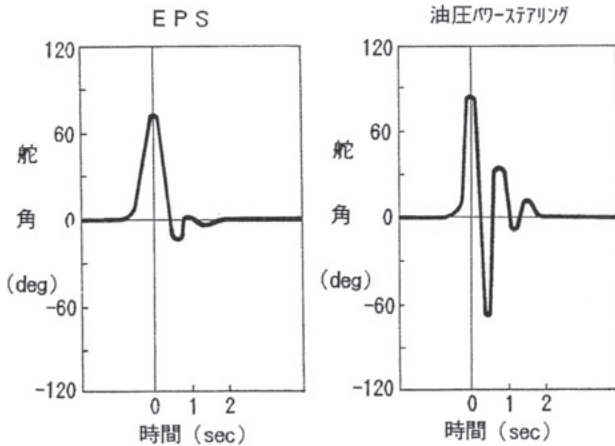


図 23 ダンパー制御効果



図 24 Fe 磁石モータと Nd-B 磁石モータ

示す。

5. 今後の技術課題

初めに述べたように、当システムの開発概念は油圧システムのネガティブな側面の改善と、新しい付加価値や将来ステアリングの礎となる技術を創出することであった。その結果、前項の3つの効果は少なくとも『次世代パワーステアリング』としての資格をえるに必要条件であると思う。また、制御を電子化することによって、他システムとの情報交換手段を手にいれた訳で、これにより車両システムの総合制御へと発展が期待される。

およそ半世紀を経た油圧パワーステアリングは、その快適性と安全性ゆえに普及し、その実績と量産効果によりコスト低減を可能にした。EPSは、そういう意味において未だ生まれたばかりであり、同様に実績を積みながらコスト低減の努力を続けなければならない。パワーユニットやコントロールユニットなどの小型化は、エレクトロニクスの大きな流れであり、EPSの普及と合流したときに、コストという山をのりこえられると予想される。

モータについても、Nd-B 磁石などの高磁性材の応用で、将来、小型化が達成されるだろう。ちなみに、我々が開発した、Nd-B 磁石モータ(図 24 右)は、前記モータと同出力で、外径 80mm 程度の大きさであった。しかしながら現状ではコストにおいて、Fe 磁石より大幅に高価で、将来におけるコストダウンが期待される。一方、バッテリー電圧の高電圧化(24V、ないし 48V)によるモータの小型化は、

むしろ技術的課題が少なく、したがって他の電装システムと合わせて総合的判断がなされるときも、そう遠くないだろう。

6. おわりに

EPSの開発には、約7年間を要した。その間、我国において、軽自動車各社よりEPSが発売された。いずれもアシスト率が小さい軽自動車専用のパワーステアリングであって、制御範囲も低速に限定したものである。

当システムは、前軸荷重 1,000kg までの乗用車に適用できることを前提として、油圧パワーステアリングに代わるべき『次世代パワーステアリング』として開発され、そのために、アシスト容量が大きく且つ効率の高いボールねじ機構を採用した点と、モータ制御を全車速領域にて実施し、通常アシストのノーマル制御にリターン制御とダンパー制御を加えて高性能化した点が異なる。そして、その開発コンセプトから、効率、操作性、安全性の追求の結果誕生した新しいスポーツカーである NSX に搭載された。この商品化は、エレクトロニクス技術の賜物であり、従来の油圧パワーステアリングでは成し得なかった多くの効果をもたらした。それは第2世代のパワーステアリングに相応しいもので、ステアリング技術の発展に貢献したと思われる。

■著 者■



清水 康 夫



杉 野 光 生



河 合 俊 岳



鶴 宮 修



松 本 哲 也



伊 澤 将 隆