

F-1用電動パワーステアリングの開発

Development of Electric Power Steering System for F-1 Race Car

藤田 英之*
Hideyuki FUJITA
馬場 純**
Jun BABA

堀内 泰*
Yutaka HORIUCHI
酒井 克博*
Katsuhiro SAKAI

窪谷 英樹*
Hideki KUBONOYA

要 旨

F-1用電動パワーステアリングを開発し、2000～2001年モデルのF-1車両に搭載した。これは、最大 350N 以上にも及ぶレース中の操舵力を低減することを目的とし、F-1車両に要求されるアシスト性能と、小型、軽量および低消費エネルギーとを両立させた。このために、モータ、そのドライバであるモータコントロールユニット、トルクセンサ、減速機構付きステアリングギアボックス等のハードウェアとその制御システムとを新たに開発した。開発にあたっては、専用の台上試験においてアシスト性能や応答性等の評価、実走データを用いたシミュレーションによる作動耐久性、信頼性評価を行い、最終的に実走テストによって評価を行って搭載仕様を決定した。その結果、目標とするアシスト性能を実現でき、F-1車両に要求される耐久性、信頼性を満足するシステムを開発できた。

ABSTRACT

An electric power steering system for F-1 was developed and fitted in 2000-2001 model F-1 car. The purpose of development was to reduce steering effort, which reaches a maximum of over 350N during a race. The new system achieves the assist performance required for the F-1 car and is compact and lightweight with low energy consumption. To achieve this, the motor, the motor control unit driving the motor, the torque sensor and the steering gear box containing the reduction gear, and the control systems, were all redesigned. During development, assist performance and response were evaluated in bench tests, and stroking durability and reliability were evaluated with simulation using actual car data. Final configuration was determined using track tests. As a result, a system was developed which meets assist performance targets and satisfies the F-1 car durability and reliability requirements.

1. まえがき

近年のF-1車両において操舵力は最大で 350N 以上に及びこれは量産車の5～10倍に相当する。2時間に渡るレース中、ドライバが体力と集中力を持続するには操舵力の軽減が必須であり、現在ではすべてのF-1車両がパワーステアリングシステムを搭載している。他のコンストラクターの場合、約18MPaのトランスミッション制御用の油圧源と共用とし、電子制御式流量調節弁を利用した油圧パワーステアリングシステムが主流であった。

ホンダでは初期仕様検討段階において、油圧パワーステアリングと電動パワーステアリング(EPS)の比較検討を行って、エネルギー消費に優れるEPSを選択した。Fig. 1は油圧パワーステアリングとEPSにおける、実走データによるステアリングトルクから算出したエネルギー消費を示す。

同図から分かるようにサーキット走行において、EPSの平均消費エネルギーが16%向上している。

本稿では、F-1用EPSの概要とその性能について紹介する。

2. レギュレーション

2001年度の国際自動車連盟(FIA)が規定しているF-1車両のステアリングに関するレギュレーションでは、「車両の操舵をするのに必要な身体力を軽減する以外の働きを持つパワーステアリングは使ってはならない。」とされている。すなわち、パワーステアリングの制御によりドライバーの運転技量を支援する目的で車両運動を制御することは禁止されることになる。「制御入力については、操舵トルク、舵角、車速以外の入力を使ってはならない。」とされており、そ

* 栃木研究所

**ホンダレーシングデベロップメント

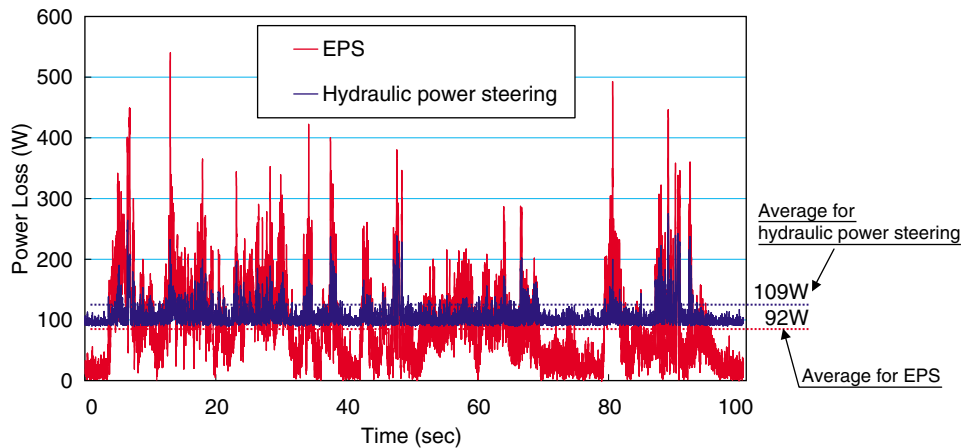


Fig. 1 Estimated power loss in hydraulic power steering and EPS; Suzuka circuit

れら入力信号の微分値や積分値を制御の入力として使用することも禁止されている。また、入力信号を周波数フィルターで処理する場合、そのカットオフ周波数は、FIA で認可されたものでなければならない。すなわち、バンドパスフィルターによりアシストトルクの位相を進めるような制御を禁止している。

なお、2002 年度からのレギュレーションでは「パワーステアリングシステムは、電子制御式であってはならず、あるいは、電氣的に動力化されてはならない」と改訂されたため、2002年度以降はF-1でのEPSの使用は出来なくなっている。

3. 開発コンセプトと目標性能

量産車の場合、パワーステアリングのアシスト性能の設定は、据え切り時を重視するのが一般である。それに対してF-1では、車両空力特性によるダウンフォースの作用があるため、タイヤの接地荷重が最大となる高速コーナでの保舵力が最も負荷が大きくなる。さらに、カウンターステア

の速い転舵速度へのアシストの追従性も要求される。

現在のF-1の車体は空気力学的な性能の追求によりモノコック先端形状が絞られた形状となっている。そのため、EPSのモータや減速機構部は限られた空間のなかでフロントサスペンションやブレーキシステムとのレイアウトを成立させるコンパクトな形状であることが要求される。

また、EPSによる重量増加を最小限にするため、EPS自体の徹底した軽量化に加え、エネルギー消費も最小限に抑えて、既存のACジェネレータとバッテリーでエネルギー供給が成立するように設計しなければならない。

これらのことから、F-1用EPSの開発コンセプトを下記のように設定した。

- ・ 小型かつ軽量である
- ・ 目標とするアシストトルクと転舵追従性能を成立させる。
- ・ 既存の充放電系システム等の変更を必要とせずに成立させる。
- ・ EPS の故障が原因でレースをリタイアさせない耐久性、信頼性を有する。

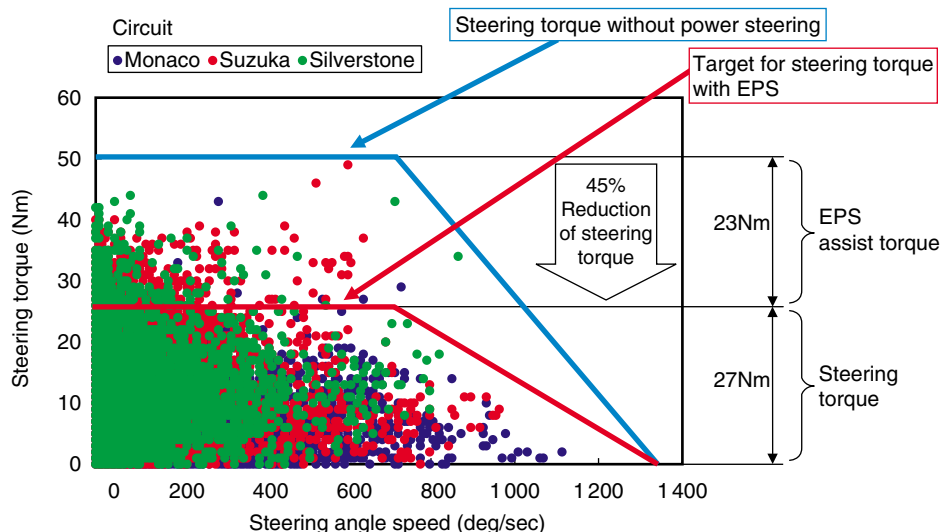


Fig. 2 Steering angle speed vs steering torque without power steering at each circuit

具体的な目標性能に関しては、過去に全日本ツーリングカー選手権(JTCC)レース車両開発の中で行われた軽自動車用EPSを使った操舵力の軽減効果の試行を参考とした。それによると、過度のアシストにより操舵力が軽すぎた場合、レース車両の操縦性は悪化し、操舵力としては、150~200N程度が適当であるということが分かった。今回の開発ではこれを操舵力の目標とした。これに、F-1のステアリングホイール径を乗じて換算した目標操舵トルクを、20~27Nmとした。次に過去のF-1におけるパワーステアリングが装備されていない車両の実走データより、Fig. 2 に示す様に、各サーキットの舵角速度に対する操舵トルクの分布を求めた。これより、最大で50Nm に及ぶ操舵トルクが、舵角速度 720deg/sec の領域まで発生していることが分かった。目標とする操舵トルクを達成するには、この操舵力を全域で45%低減させることが必要であり、EPSのアシストトルクの目標を最大で23Nm とし、このアシストトルクを舵

角速度 720deg/sec まで、発生できる動特性を転舵追従性能の目標とした。

充放電の成立性については、アシスト負荷の最も高いサーキットにおいてACジェネレータの発電電流を推定し、EPS 以外の電装システムの消費電流データとから EPS が消費可能な電流値の推定した。それに基づいて、EPS が消費するサーキット一周当たりの平均電流値が5 A以下になるように目標を設定した。

4. システム概要

Fig. 3 に、F-1用 EPS のコンポーネント、及び Fig. 4 に EPS のシステムブロック図を示す。

F-1用 EPS のシステムは、

- ・ドライバの操舵トルクを検知し、トルク信号を出力するトルクセンサ部
- ・トルク信号を受けてアシストトルクの指示値を出力するECU
- ・ECUからのアシストトルクの指示値を受けて、モータのトルクを制御するMCU
- ・アシストトルクを発生するモータ及び、その駆動トルクを増幅する減速機構を一体化したステアリングギアボックス
- ・車両の速度を検出するための車輪速センサで構成される。

4.1. トルクセンサ

量産車のEPSの場合、トーションバーのねじれ角を機械的に軸方向の変位に変換し、それを差動トランスで検知して電気信号を出力する方式が一般的である。F-1用EPS

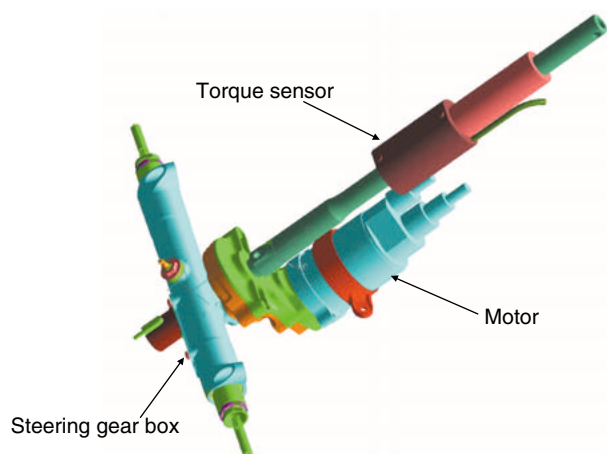


Fig. 3 EPS component for F-1 Car

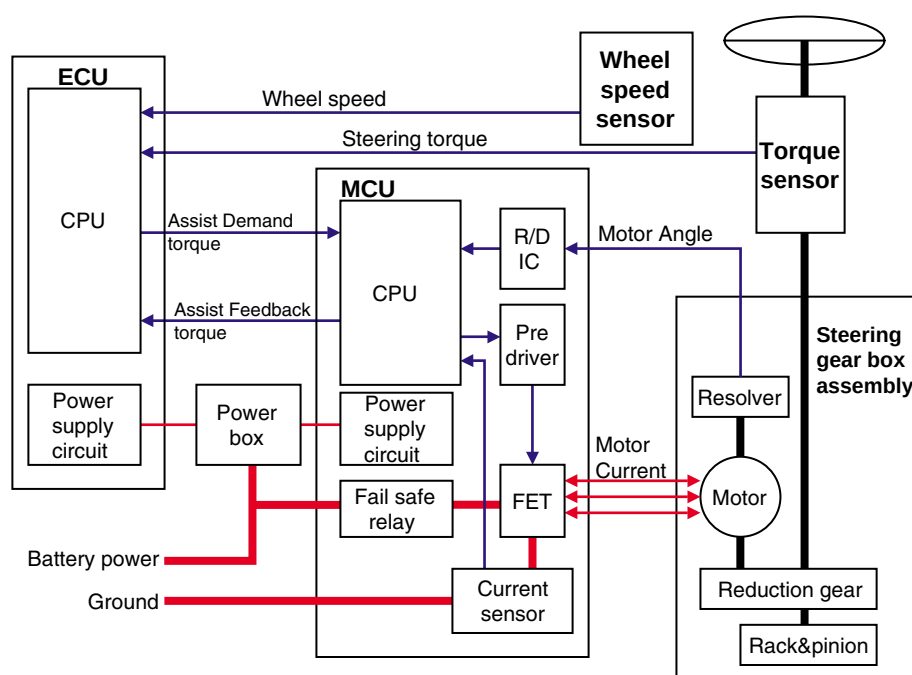


Fig. 4 EPs system block diagram

では、軽量化を図るため Fig. 5 に示すように、ステアリングピニオンから延長されているエクステンションシャフトに直接ひずみゲージを貼り、そのひずみゲージで構成するブリッジ回路の電圧出力を検出する方式を採用し、部品点数が少ないシンプルな構造とした。現場でのメンテナンス性および取り扱い性を重視して、ひずみゲージのアンプもシャフトに一体化したコンポーネントとした。また、F-1 車両から受ける 30G にも及ぶ振動に対応するため、アンプの基板はラバーによりフローティングされている。

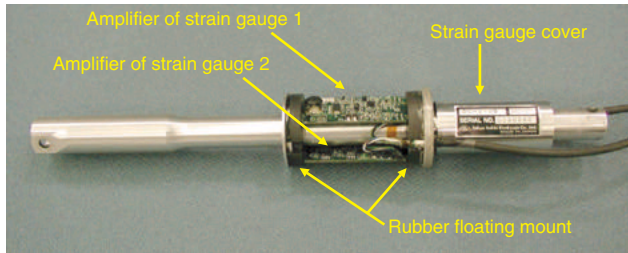


Fig. 5 Torque sensor

4.2. モータ

モータは、信頼性と応答性に優れた DC ブラシレスモータ方式を選択し、専用に開発した。Fig. 6 にモータ外観を示す。マグネットには、モータの小型化と効率向上のため、ネオジウム系磁石を採用した。F-1 車両における搭載性からモータサイズは直径 60mm 以下、長さ 130mm 以下とし、このサイズで目標とするアシスト性能と消費電流を満足するモータ特性をねらった。



Fig. 6 EPS motor

4.3. モータコントロールユニット(MCU)

ブラシレスモータ専用の駆動回路をもち、トルク制御を行う MCU も同時に開発した。Fig. 7 に MCU の外観を示す。サーキット走行モードでは、最大アシストトルクを頻繁に発生するため、その発熱に耐え得る容量の FET を選定した。また、モータ制御構成部の監視機能と、ECU との通信による相互の故障診断を行っている。



Fig. 7 Motor control unit (MCU)

4.4. 減速機構付きステアリングギアボックス

モータトルクを増幅する減速機構部は、モノコック内部においてサスペンションやブレーキシステムの部品と搭載レイアウトを成立させるために機構部自体をコンパクト化する必要があった。チタン合金製ヘリカルギアを 2 段減速機構とすることで、1 段減速機構に対して外径形状を 5 分の 3 まで小型化させた。Fig. 8 にステアリングギアボックス概観、Fig. 9 に減速機構部を示す。これにより、ギアボックス下部にピニオン軸と平行にモータを搭載することを可能



Fig. 8 Steering gear box assembly

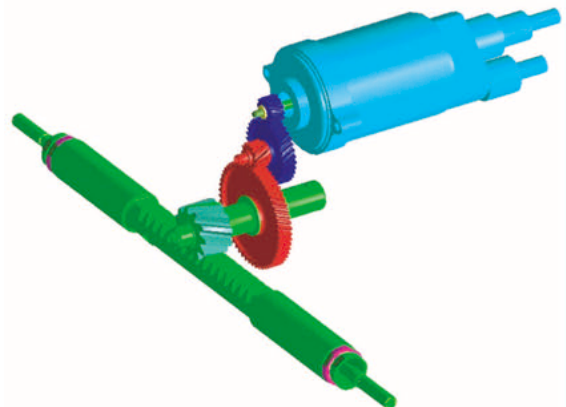


Fig. 9 Reduction gear

とし、車両の低重心化も図った。また減速比はサーキットの特性にあわせて2種類用意した。ステアリング本来の機構部であるラック&ピニオンはチタン合金製、ギアハウジングはマグネシウム合金製として軽量化を図った。

5. 制御仕様

本F-1用EPSでは、ドライバの操舵トルクとEPSのアシストトルクの総和に対して、EPSのアシストトルクの方担率を基準アシスト率として設定する。但し、システムの発振現象を防止するために、操舵トルクの中立領域で不感帯を設定している。基準アシスト率 R_a は、下記のように定義される。

$$R_a = T_a / (T_s - T_d + T_a) \quad (1)$$

T_s : ドライバの操舵トルク

T_a : EPSのアシストトルク

T_d : 不感帯

この基準アシスト率に対して、車速制御テーブルに設定される係数により車速に応じてアシスト率を増減させている。車速制御による最終的なアシストトルク T_v は下記の様に定義される。

$$T_v = R_a(T_s - T_d) \cdot K_v / (1 - R_a) \quad (2)$$

K_v : 車速係数

基準アシスト率と車速制御テーブルは、各サーキットごとにFig. 10に示す5種類の基準アシスト率(0, 30, 35, 40, 45%)とそれに対応する車速制御テーブルを設定し、これらのアシストモードはECUに記憶される。ドライバはステアリングホイール上にあるEPSモード切り替えスイッチによってそのコースや走行状況に合ったモードを選択する。但し、レギュレーションでは走行中にパワーステアリング

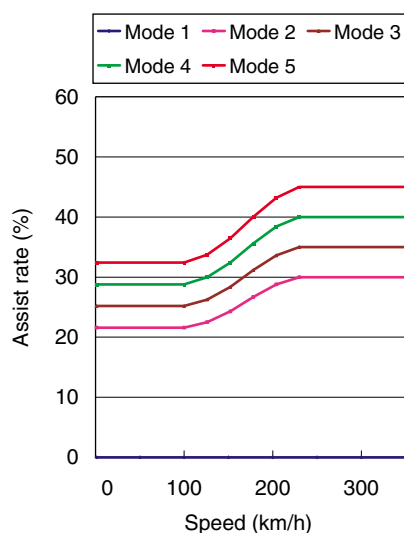


Fig. 10 Speed vs assist rate

の特性を変更することは禁止されているため、モードの切替えは停車状態で行う。

6. システム信頼性

F-1用EPSのシステム信頼性の考え方は、EPSの故障が原因でレースをリタイアさせないとした。そのため、適切なアシスト機能が維持できないような故障が発生した場合に、アシスト機能を所定の時間内に停止してマニュアルステアリング機能に戻す機能と、ドライバー自身の判断でシステムを遮断できるスイッチを追加した。

また、予測し切れない状況変化によりEPSの推定負荷を越えるようなアシストトルクが要求される場合がある。この様な場合でも、アシスト機能を維持するためにMCUの駆動回路部の温度監視を行い、許容温度を越えないようにアシスト量を制限する保護機能と、供給電力源の電圧を維持するために電圧降下に応じてアシスト量を制限する保護機能を持たせた。

7. 耐久信頼性

F-1車両では全てのパーツにおいて使用可能な走行距離が定められており、それに応じて交換時期が管理されている。EPSにおいても機能保証できる走行距離を設定するため、台上試験機において実走データのラック入力荷重と舵角を再現させた作動耐久試験と、実車の振動レベルを再現させた耐振動試験を行った。そこで設定された走行距離について、最終的に実走テストで検証を行い、問題が生じなければこの設定に基づいてパーツを管理している。

また、EPSのコンポーネントは全てコックピット内に搭載されているが、雨天時の走行におけるコックピット内部への水浸入に対して、EPSのモータ、センサ、電装ユニットの防水処理を施している。

8. 結果

8.1. 重量

Table 1に示すように、徹底した軽量化の結果、EPSの総重量は、4.09kgでEPS付加による重量増加は3.35kgであった。

Table 1 Weight of EPS (kg)

	Original steering	EPS
Torque sensor	0.1	0.35
Motor		1.4
MCU		0.9
Harness		0.5
Steering gear box	0.64	0.94
Total weight	0.74	4.09

8.2. 性能

Table 2 に、F-1用 EPS の諸元表を示す。

2002 年モデルに搭載した EPS 性能は、最大アシストトルク 23.4Nm を最大転舵速度 720deg/sec まで発生する動特性を実現し、F-1 で求められるアシストトルクと転舵追従性能を両立させることができた。

Table 2 Specifications of EPS

Type of EPS	Pinion assist type
Rated electric voltage	12V
Rated electric current	15A
Maximum assist torque	23.4Nm
Dynamics	4rev/sec
EPS reduction gear type	Double Helical gear
EPS reduction gear ratio	10.6
	13
Type of Motor	DC brushless Motor
Maximum Motor Torque	1.8Nm
Inertia of Motor	0.004g・m ²
Electric time constant	0.7msec
Type of Torque sensor	Strain gauge type

8.3. 消費電流

Fig. 11 に 2001 年 F-1 日本グランプリにおける鈴鹿サーキットの実走データを示す。

EPS の平均消費電流を少なくするために、アシストトルクの最大値を設定し、MCU はその最大トルクを越えないようにモータの回転数に応じて消費電流の上限値を制限する制御を行った。

実走テストの結果、最もアシストトルク負荷の大きい鈴鹿サーキットにおいて、サーキット一周の平均消費電流を 3A に抑えられ目標を達成できた。

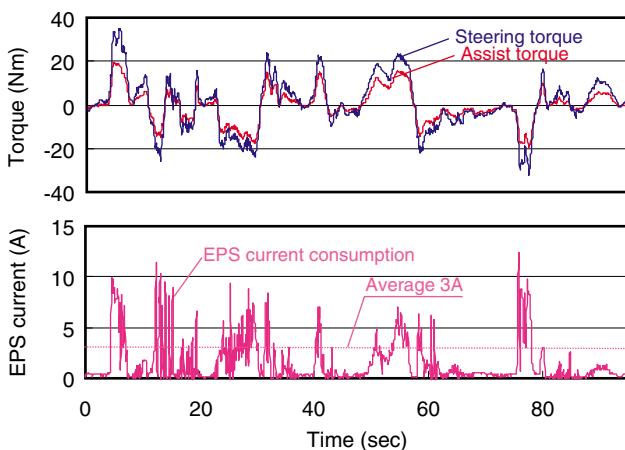


Fig. 11 Results for EPS current consumption (Suzuka)

9. まとめ

小型で軽量、かつ要求されるアシスト性能と消費エネルギーを両立させる F-1 用 EPS を開発し、2000 年～2001 年モデルの F-1 車両に搭載した。この EPS により各サー

キットの特性に応じてドライバの操舵力を最大で 45% 軽減させることができた。

10. あとがき

F-1 用 EPS の搭載は、コーナリングにおけるステアリング操作性の向上やドライバビリティの向上、さらにレースにおける体力の消耗が軽減されることによる集中力の維持に効果があることがドライバのコメントから得られており、F-1 レース車両に有効なシステムとして定着させることができた。

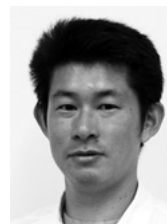
11. 謝辞

最後に、本 EPS の開発に御協力頂いた社内外の方々、特に高性能モータ、MCU の開発に御協力頂いた(株)東芝、高精度トルクセンサを供給して頂いた(株)東京測器研究所、また、レースにおける EPS の運用をサポートして頂いたスタッフの方々に深く感謝致します。

参考文献

- (1) 清水康夫ほか：電動パワーステアリングの開発，HONDA R&D Technical Review, Vol.3, p.58-75 (1991)
- (2) 須田 均ほか：電動パワーステアリング用操舵センサの開発，HONDA R&D Technical Review, Vol.3, p.83-91 (1991)

■ 著 者 ■



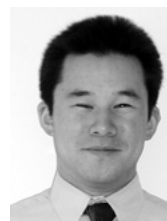
藤田 英之



堀内 泰



窪谷 英樹



馬場 純



酒井 克博