

高出力電動パワーステアリングシステムの実用化技術*

Application Technology of High-Power Electric Power Steering System

高橋俊博 T. TAKAHASHI 鈴木博之 H. SUZUKI 中山琢也 T. NAKAYAMA 藤山賢一 K. FUJIYAMA
山口茂利 S. YAMAGUCHI 山下正治 M. YAMASHITA 後藤武志 T. GOTO 齊藤貴俊 T. SAITO

In response to demands in recent years for steering systems enabling improved fuel efficiency and featuring compatibility with active safety technology, we have developed a high-power Rack-Direct Electric Power Steering System (RD-EPS[®]) with integrated Variable Gear Ratio Steering System (E-VGR[®]) for full-size passenger vehicles. RD-EPS[®] consists of a ball screw type reduction gear, a rack-coaxial brushless motor and an ECU with separated voltage booster, and in development of this new steering we achieved higher-power performance of each of these parts. The E-VGR[®] unit has been integrated on the EPS pinion gear upper area to achieve a compact, highly efficient structure.

Key Words: EPS, high efficiency, ball screw, brushless motor, voltage boost, variable gear ratio

1. はじめに

近年、原油価格の高騰や自然環境への配慮から、ハイブリッド車やEV車の需要が急速に高まっている。ステアリングシステムもまた、燃費への配慮から、油圧式パワーステアリングシステム（以下HPS）から電動パワーステアリング（以下EPS）システムへ急速に移行しつつある¹⁾。

従来は小型乗用車を中心に採用が進んでいたEPSシステムであるが、近年は中型乗用車や大型乗用車でのニーズが拡大しており、特にハイブリッド車やEV車においては、エンジン駆動がなくてもアシストが必要となるため、EPS化が必要不可欠になっている。

また、安全技術の向上も重視されており、それに関してもEPSは有効である。EPSは操舵トルクの軽減だけでなく、トルクをアクティブに制御することで、車両姿勢の安定化やレーンキープの補助を可能にしている²⁾。また、操舵角に対する前輪切れ角を可変に制御可能なギヤ比可変ステアリング機構（以下E-VGR[®]）によるアクティブステアリングがアクティブセーフティに対して、より有効な手段となっている。

以上のようなニーズにこたえるために、今回最上級クラスの大型乗用車向けに、E-VGR[®]一体式高出力EPS

を開発し、実用化したのでその内容について報告する。

2. EPSシステムについて

EPSはアシスト機構を配置する位置により、コラムアシストEPS（以下C-EPS[®]）、ピニオンアシストEPS（以下P-EPS[®]）、ラックアシストEPS（以下R-EPS[®]）に大別される。EPSを高出力化する場合、C-EPS[®]は、インタミディエイトシャフト、ラック&ピニオン、および減速機、P-EPS[®]は、ラック&ピニオンおよび減速機に掛かる負荷が増加する。一方でR-EPS[®]は、減速機のみで掛かる負荷が増加するため、一般的にはR-EPS[®]が高出力化に対して有利とされている。

そのような理由から、中・大型乗用車向けにラック同軸EPS（以下RD-EPS[®]）を開発し、実用化してきた³⁾。今回の開発品へも高出力化に有利なRD-EPS[®]システムを採用することにした。

3. EPSシステム設計の考え方

EPSにおける出力とは、ラック軸推力とラック軸速度の積である。図1に示すように、今回の高出力化は、ターゲットとした車両の仕様を基に、最大ラック軸推力

*社団法人自動車技術会の了解を得て、「2008年春季大会学術講演会前刷集」No. 59-08より、一部加筆して転載

は1.7倍、最大ラック軸速度は1.2倍、最大出力は1.9倍と、特にラック軸推力の大幅増加に伴う出力向上を狙っている。しかしながら、EPSにおける要求性能は出力だけではない。車両側から見た場合、消費電力の増加を抑えることが必要であり、システム効率の向上もEPSに求められる重要な性能の一つである。

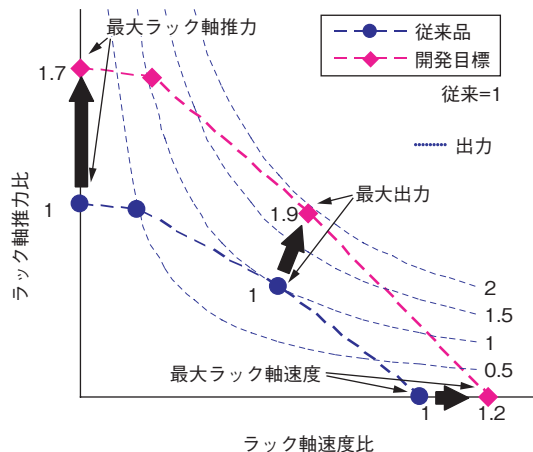


図1 EPS出力目標
EPS output target

また、機能面言えばステアリングシステムは、マンマシンインターフェイスとしての役割を担っており、操舵感などの感性に関する性能も重要となる。操舵感性能の一つにトルクリプルやコギングトルクなどのトルク脈動があり、ラック軸推力増加により最大アシストトルクが増加しても、トルク脈動は同等以下に抑えなければならない。また、その要求レベルも高く、トルク脈動を最大アシストトルクの1/500以下に抑えることが求められている。

さらに小型軽量化、低騒音など、EPSに求められる性能は多岐に及んでいる。しかし、これらの性能は独立して決まるものではなく、複雑に関係しており、背反を

伴う場合がある。

本開発では、高出力化の実現と同時に、システム効率、トルク脈動などの操舵感性能、小型軽量化、低騒音などさまざまな性能のバランスを考慮し、全体として最適設計を狙っている。開発したE-VGR[®]一体式RD-EPS[®]のシステム構成を図2に示す。

4. EPSシステムの要素設計

4.1 ボールねじ減速機構

ボールねじに求められる性能としては、強度、伝達効率が高いこと、背反としての低騒音などが挙げられる。

最大ラック軸推力1.7倍での耐久寿命を満足させる方策としては、ボールにかかる面圧を軽減するために、ボールねじナットの負荷列数増加（ボール数1.25倍）、またはボール径1ランクアップが必要であるが、本開発では、作動音およびトルク変動に有利な、ボール径1ランクアップを採用した。

一般的にボールねじ効率 η_1 は、摩擦係数を μ 、リード角を β とすると、以下の式で求められる。

$$\eta_1 = \frac{1 - \mu \cdot \tan \beta}{1 + \mu / \tan \beta} \tag{1}$$

ハイリード化によって $\tan \beta$ が上昇し、 η_1 は上昇する。

また、モータ回転速度を ω 、モータトルクを T 、モータ層電流実効値を I 、モータ相抵抗を R とすると、モータの効率 η_2 は摩擦損、粘性摩擦損、ヒステリシス損などを無視した以下の近似式で求めることができる。

$$\eta_2 = \frac{\omega \cdot T}{\omega \cdot T + 3 \cdot I^2 \cdot R} \tag{2}$$

ハイリード化した場合、その分トルクアップが必要となり、 I を上昇させる必要があるため、 η_2 は低下する。

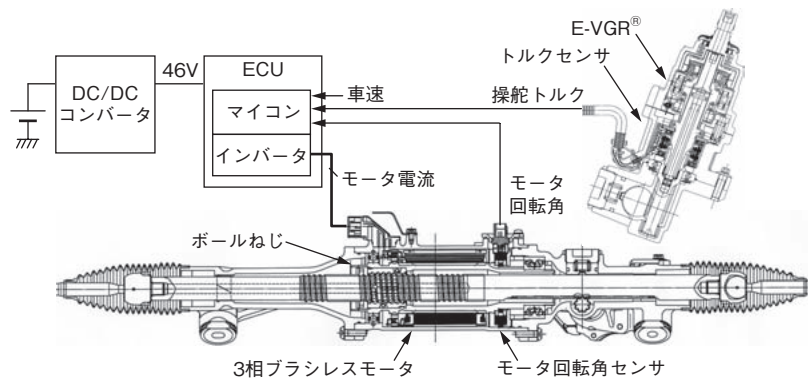


図2 開発したRD-EPS[®]システムの構成
Structure of developed RD-EPS system

特に EPS において、使用頻度の高い低回転速度域においては、 η_1 の向上と η_2 の低下では、 η_2 低下の影響が強く、 $\eta_1 \times \eta_2$ 全体としては低下する傾向にある。ただし、システム効率においてハイリードが不利になる一方で、低騒音化において有利となることが知られており、両側面の最適化を狙って、リードを従来の 1.3 倍とした。

ボールねじ転動面において、面圧が作動音に影響することが知られている。従来よりも軸力が増加することにより、作動音としては不利になるにもかかわらず、商品性を考慮して、従来よりも作動音を低減させることを目標とした。まずは作動音に対しての要因解析を行い、寄与度の高い構成部品を明確化した。解析の結果、**図3**のように PCD 変動およびリード変動が作動音に対して、影響が大きいことが判明した。作動音目標値を満足する PCD 変動およびリード変動を実現するために、熱処理による精度低下の影響を受けないボールねじ加工工程を採用した。

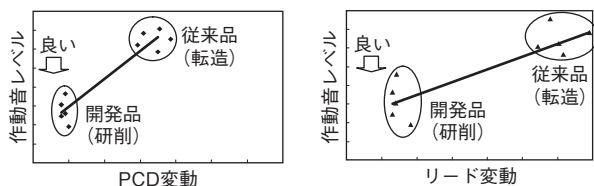


図3 PCD 変動とリード変動
PCD variation and lead variation

・ 従来加工工程 :

ボールねじ部の転造後に熱処理を実施する。

・ 新規加工工程 :

ボールねじ部の粗加工後に熱処理を実施し、その後研削仕上げする。

また、ばらつき低減のために、下記の取組みを実施した。

・ 研削条件の最適化 :

車両と共振する周波数を把握し、最適な研削条件を選定した。

・ 微小な面性状の改善 :

高周波成分の改善を目的とし、超仕上げ工程を追加した。

その結果、作動音は従来よりも 7dB 低減した。上記工程変更により面性状を改善させた結果を**図4**に、それによって作動音が改善した結果を**図5**に示す。

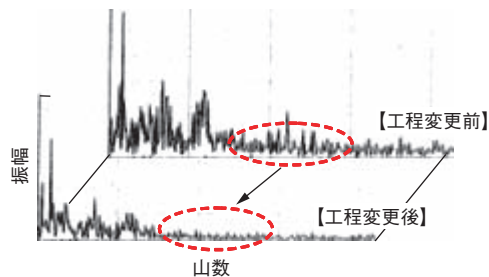


図4 面性状の改善
Surface fluctuation improvement

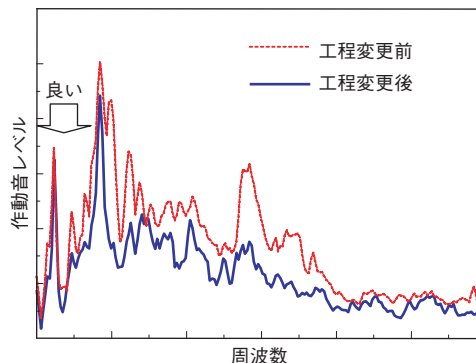


図5 作動音の改善
Noise level improvement

4.2 ラック同軸モータ

パワーアシスト用のラック同軸モータは、従来と同様に、ブラシレスモータを採用した。ブラシレスモータは、電力伝達にブラシを使わない、コイルがステータ側にあるために冷却しやすい、などの理由で高出力を得る上で有利となっている。

ボールねじリードが決まったことで、モータに必要な出力特性が決定した。ラック軸推力が 1.7 倍、リードが 1.3 倍なので、最大モータトルクは 2.2 倍にする必要がある。電流は従来と同等とし、トルク定数を向上させてトルクの向上を目指すこととした。

高トルク化のためには、巻線スペースを有効に用いることが重要である。そのため、対向位置にある巻線を並列に結線することで線径を細くし、**図6**に示すように、従来の 2.25 倍の巻数にすることで占積率を 63% から 71% に向上させた。これを可能にしたのが、12 分割ステータコアの高精度組付けと高速の完全整列巻線の生産技術開発である。占積率向上により、効率的に高出力化を実現し、従来よりも出力/体格比は 8% 向上した。

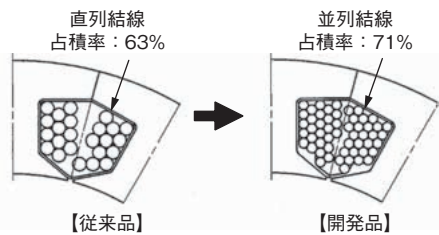


図6 高密度巻線
Highdensity winding

また、滑らかな操舵感を実現するうえで重要な特性であるトルク脈動は、主にステータ内径の真円度やマグネットの磁力ばらつきによって発生する。製造誤差を小さくすることはもちろん重要であるが、それにも限界がある。それらのばらつきがあっても、トルク脈動への影響が少なくなるように磁気設計に工夫をした。

製造ばらつきに対してロバスト性を持たせるには、パーミアンス（磁気抵抗の逆数）の変化量を小さくすることが有効である。具体的には、エアギャップを大きくし、マグネットを厚く、マグネットの偏心率を大きく変更した。これらの最適値を設計するために磁界解析シミュレーションによる検討を実施した。磁界解析シミュレーションの状況を図7に示す。

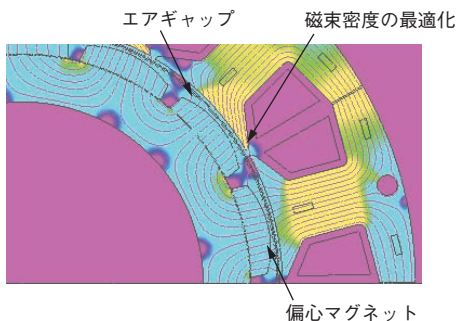


図7 磁界解析シミュレーション
Magnetic field analysis simulation

これらの性能目標の達成と同時に、車両への搭載に対してモータ体格も考慮した。三種類のモータ体格で性能を比較したレーダチャートを図8に示す。Case1はハウジング外径が他よりも大きい、搭載可能な長さであり、性能のバランスが良い。Case2は外径は細いが長さ方向に大きく、搭載が困難である。また、マグネット量が増えるため、コギングトルクとコストが悪化する。Case3は外径も長さも小さいが、磁気飽和による異音と巻線スペースの減少によるモータ効率の悪化が課題となる。最終的に性能と搭載性のバランスを考慮し、Case1を選択した。

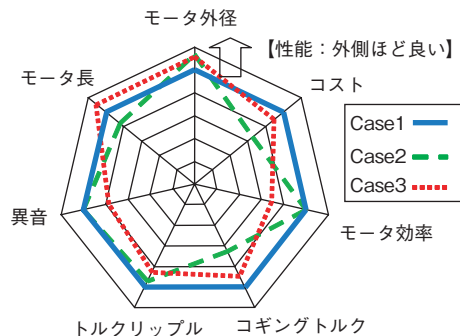


図8 モータ性能指数のレーダチャート
Radar chart of motor performance

4.3 DC/DC コンバータと ECU

従来は、ECU 内に昇圧回路を内蔵し、バッテリー電圧を 28V に昇圧してモータ電源電圧として使用していた。本システムにおいては、昇圧回路を DC/DC コンバータとしてインバータ回路と別置とし、DC/DC コンバータをバッテリー近傍に、インバータ回路をモータ近傍に配置する構成とした。DC/DC コンバータは 46V まで昇圧し、高電圧低電流の状態ですぐ電力供給することにした。

ボールねじのリードが増大した分、同じラック軸速度を実現するためのモータ回転速度は低くてもよいが、目標とするラック軸速度も上昇しているため、結果的に従来と同等のモータ最大回転速度を実現する必要がある。

一方で、トルク定数増大に伴い誘導電圧定数も増大したため、従来よりもモータ電源電圧を高くしたにもかかわらず、モータ最大回転速度は低下することになる。そこで、電圧利用率改善と弱め界磁制御により、電圧不足を補うことにし、モータ最大回転速度の向上を実現した。結果として、図9に示すように、本開発システムは従来システムと比較して、最大ラック軸推力は 71% 向上、最大ラック軸速度は 35% 向上を達成した。

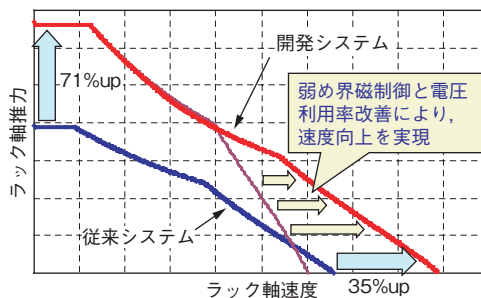


図9 開発システムの出力特性
Output characteristic of developed system

5. E-VGR[®]設計

これまでのE-VGR[®]はインタミディエイトシャフト上に配置され、ステアリングを回転させると、E-VGR[®]全体も同時に回転し、さらに、モータと減速機を介してアクチュエータ出力軸に回転が付加されることで、可変ギヤ比機構を実現していた。回転するE-VGR[®]へ電力を供給するために、ケーブルを巻き取る構造のスパイラルケーブルを使用する必要があり、このスパイラルケーブルによって軸長が増加し、さらに電力ロスが生じるという課題があった。

本システムにおいては、軸長短縮の観点からE-VGR[®]をEPSのピニオンギヤ上部に一体型で配置し、図10に示したようにモータと減速機を介して伝達されたトルクを、中空モータシャフト内を貫通しているアウトプットシャフトに伝達するといったトルク折返し構造を採用した。このことにより、E-VGR[®]全体の回転を抑制することが可能となり、スパイラルケーブルの廃止を実現した。また、モータについては、内部構成部品レイアウトの最適化により軸長短縮を実現し、その他の部品についても、FEM解析と実機検証により、必要強度を満足する範囲内で最大限の小型・コンパクト化を実現した。

上記取組みの結果、全長を150mmから78mmに短縮、外径を102mmから73mmに縮小し、質量についても従来比58%に軽減できた。また、スパイラルケーブル廃止に伴う電力ロス削減により、エネルギー効率は、従来比19%向上した。さらに、インタミディエイトシャフト付近のスペースを確保したため、搭載自由度が大幅に向上した。

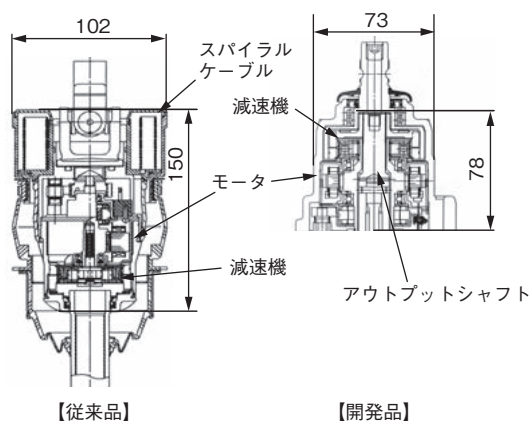


図10 E-VGR[®]アクチュエータ断面図
Cross section of E-VGR actuator

6. おわりに

以下の方策により、EPSとして世界最高クラスの出力のRD-EPS[®]を実用化した。

- (1)高出力化に伴い、ボールねじ作動音の増大が課題となったが、研削加工とその条件の最適化、および超仕上げ加工の追加により、低騒音を実現した。
- (2)高出力化に伴い、モータのトルクリップルやコギングトルクなどのトルク脈動の増加が課題となったが、エアギャップ、マグネット厚さ、マグネット偏心率などを最適に設計することで、トルク脈動を抑制した。
- (3)モータトルク定数増大に伴い、モータ最大回転速度低下が課題となったが、高電圧化、電圧利用率改善、および弱め界磁制御により、最大回転速度の向上を実現した。
- (4)E-VGR[®]をEPSギヤに一体化することで、スパイラルケーブルを廃止し、小型化と高効率化を実現した。今後は、さらなる高効率化と軽量化などについても取り組んでいきたい。

参考文献

- 1) 杉本貴邦, 宇野 勇, 石原祐士, 浦野正治, 大橋達也, 池田 強: JTEKT Engineering Journal, no. 1003(2007) 40.
- 2) 谷口敏克: 自動車技術, vol. 59, no. 1(2005)63.
- 3) 大西 晶, 成瀬光則, 森下伸直: 豊田工機技報, vol. 44, no. 3(2004)17.

筆 者



高橋俊博*
T. TAKAHASHI



鈴木博之*
H. SUZUKI



中山琢也*
T. NAKAYAMA



藤山賢一**
K. FUJIYAMA



山口茂利***
S. YAMAGUCHI



山下正治****
M. YAMASHITA



後藤武志****
T. GOTO



斉藤貴俊****
T. SAITO

* ステアリング事業本部 中部テクニカルセンター
 ** ステアリング事業本部 第1電子技術部
 *** ステアリング事業本部 第2電子技術部
 **** トヨタ自動車株式会社 第2車両技術部