

製品紹介

ヤマハ発動機(株)様向け内製PP搭載EPSの開発

青山 雅 ・ 菊池 輝之

1 はじめに

カヤバのオフロード車両用の電動パワーステアリング（Electric Power Steering 以下EPS）の歴史は古く、ヤマハ発動機(株)様のATV（All Terrain Vehicle：全地形対応車）に、世界で初めて採用された2005年までさかのぼる。当該EPSは制御用コントローラ（Electronic Control Unit 以下ECU）がEPS本体と別となるコラムEPS（以下、従来EPS）である。従来EPSは多くのメーカー様のATVやROV（Recreational OFF-Highway Vehicle）に採用いただき、初採用から20年経過した現在も量産中である。

その間、オフロード車両用のEPS搭載率は上昇しており、特に近年は車両が大型化される傾向の中、操舵力低減やキックバック抑制など運転者へ快適な操作性提供のため、EPSの高出力化が求められている。当社も高出力化を一つの目的として、内製パワーパック（ECU一体型のブラシレスモータ 以下PP）を搭載したオフロード車両用のピニオンEPS（以下、ピニオンEPS）を開発し2019年から他車両メーカー様向けに量産している。

オフロード車両用のEPS形式はコラムEPSが大半であるが、形式違いのEPSを載せ替えることは車両メーカー様の開発が大規模になることが想定されるため、当社はコラムEPSを高出力化しEPSのラインナップを拡充する必要がある。

この度、従来EPSに対して高出力化するため、内製PPを搭載したコラムEPS（以下、本製品）を開発し、2024年よりヤマハ発動機(株)様のWolverine RMAX1000（図1）、Grizzly700（図2）向けに量産を開始している。次章より、本製品のメカニカル仕様と制御の内容について説明する。



図1 Wolverine RMAX1000 (ROV)



図2 Grizzly700 (ATV)

2 メカニカル仕様

2.1 標準モジュール及び従来EPS部品の採用

オフロード車両用のEPSは乗用車向けと比較すると市場規模が小さいため、新規部品を抑制しコストへの配慮が重要である。

本製品はピニオンEPS向けに開発を行った標準モジュールを採用した。標準モジュールとは内製PPとトルクアングルセンサ、ウォーム減速機を一つのモジュールとしてコンパクトにまとめたものである（図3）。これにより、従来EPSに対して減速比及びモータアシストトルクが大きくなり、EPS出力トルクが約2.8倍となった。従来EPSと本製品の主要諸元の比較は表1に示す。

一般的にEPSは、搭載する車両レイアウトに合わせて締結部の仕様を変更する必要がある。そのため、既製品を採用いただく場合を除き標準化率100%は達成できない。本製品では標準モジュールと従来EPSの部品を利用することで、新規部品を最小化し、標準化率80%という高水準を達成した。

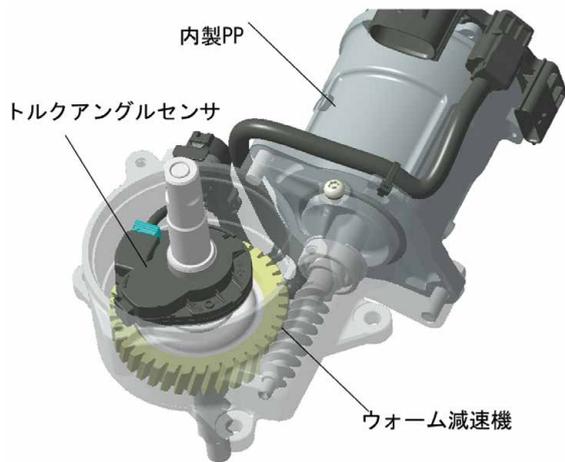


図3 標準モジュールの構成要素

表1 主要諸元の比較

項目	従来EPS	本製品
減速比	17 : 1	18.5 : 1
モータアシストトルク	1.5Nm	4.2Nm
EPS出力トルク	22.9Nm	65Nm

2.2 ギヤケース主型共通化

コラムEPSはモータ/PPを除き、二つのハウジングから構成されている。ギヤケースはウォーム減速機を格納するハウジングである。

ROVとATVのコラムEPSは車両要件により様々な仕様差があり、以下に二つ紹介する。一つ目はコラムEPSからタイヤへのトルクの伝達方法の差である。ROV向けはコラムEPSの出力軸からインターミディエイトシャフトが締結され、ラック&ピニオンを介してタイヤへ伝達されることが多い。

それに対して、ATV向けは出力軸にピットマンアームを締め付け、ピットマンアームからタイロッドを介してタイヤへ伝達されることが大半である。ピットマンアームのタイロッド締結点は出力軸と同一軸上に存在しないため(図4)、トルク伝達によって出力軸に曲げモーメントが作用することがATV向けの特徴である。

本製品において、曲げモーメントの小さいROV向けはコスト低減のため出力軸を1点支持とし、ATV向けは曲げモーメント対策として2点支持とした。2機種 of 出力軸支持の1点目の軸方向高さを同一にすることで、出力軸側の一部構造を除き、ギヤケースの内部構造を共通化することができた。

車両要件による仕様差の二つ目はヤマハ発動機(株)様の車両へハウジングを固定する方法である。ROV向けのコラムEPSはめねじを加工した入力軸側のハウジングを車両に締結するのに対し、ATV向けは出力軸側のハウジングと車両をボルトとナツ

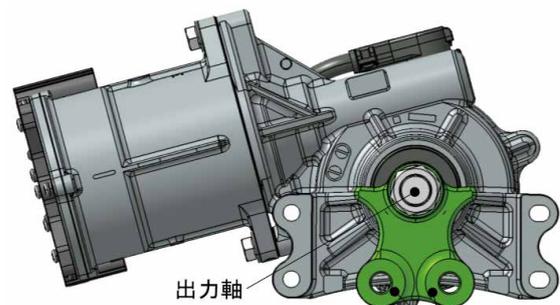


図4 ATVの出力軸構造 (ピットマンアーム組付け後)

トで固定している。

従来EPSはEPSと車両を締結する機能とウォーム減速機を格納する機能を二つのハウジングに分けて設計しているため、ギヤケースの金型は共通化されていない(図5)。

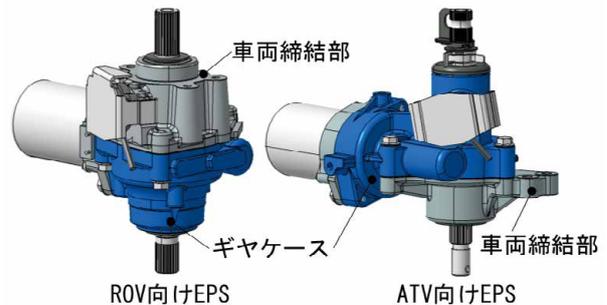


図5 従来EPSのギヤケース

本製品はATV向けの車両締結部をROV向けにも採用した(図6)。これにより、ATV向け車両締結部をEPS組立工程の治具取り付け点として使用することができるようになり、従来EPSに設定していた組立専用の取り付け点を廃止することができた。外観が共通になることでギヤケースのダイカスト金型の主型を共通化し、出力軸側の一部構造については機種専用の中子を設定することで少ない段取りでギヤケースの生産が可能となった。

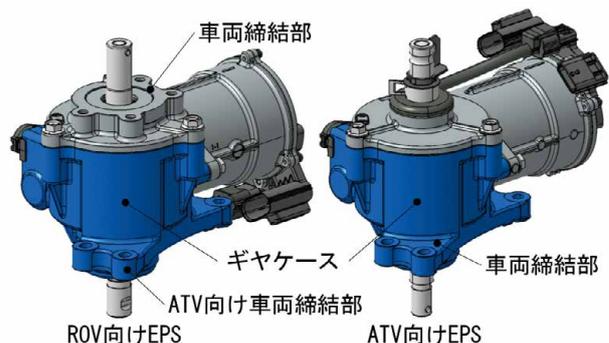


図6 本製品のギヤケース

3 制御開発

オフロード車両に求められる操舵性能は「操舵応答性」「外乱抑制性」が特に重要である。操舵性能を満足するため、「ベース電流制御」「安定化制御」「微分電流制御」を本製品に実装した。

図7に本製品の制御ブロック図の概要を示す。次項から各制御の実施内容を説明する。

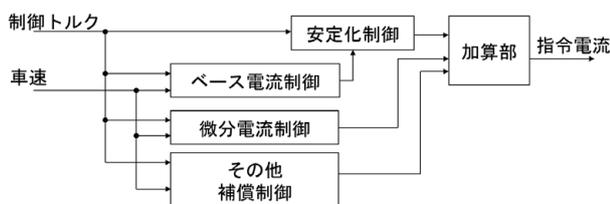


図7 本製品制御ブロック図概要

3.1 ベース電流制御

本制御は、運転者がハンドルを操舵した際に発生する制御トルクから、ベース電流制御電流値（以下ベース電流値）を算出する制御である。従来EPSと比べ、本製品で使用しているモータは出力が大きくなっているため、それに合わせベース電流値を設定している。電装品の新旧比較を表2に示す。

表2 電装品新旧比較

項目	従来EPS	本製品
構成	ECU別体型モータ	ECU一体型モータ
モータ	ブラシ付き	ブラシレス
モータアシストトルク	1.5Nm	4.2Nm
重量	1.60kg+0.87kg	2.0kg

また、ハンドル切り始めのフィーリングを作るため、図8の操舵フィーリング領域のチューニングを実施した（図8：緑破線領域内）。結果、従来EPSと比べ滑らかなフィーリングを実現できた。

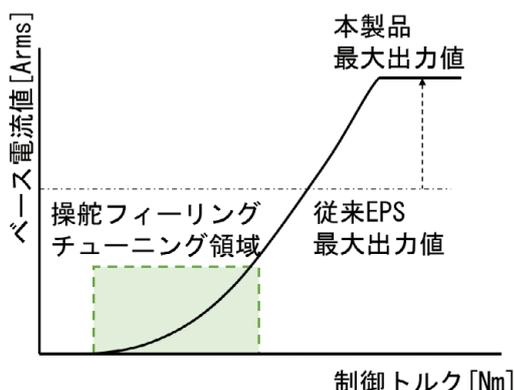


図8 ベース電流制御イメージ図

3.2 安定化制御

本製品の制御はEPS出力トルクをフィードバックする、トルクフィードバック制御を軸に構成されている。入力トルクとフィードバックトルクから算出した制御トルクに対し、安定化制御、ベース電流制御及び各補償制御を介し算出したモータ電流指令から、モータトルクを発生させ本製品を動作させている。図9にトルクフィードバック制御系の基本構成を示す。

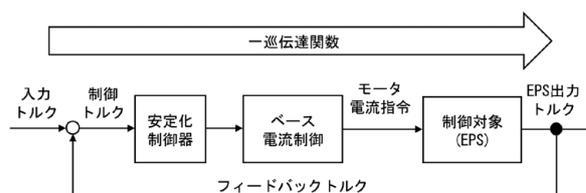


図9 トルクフィードバック制御系基本構成図

前項で説明した、「ベース電流制御」は電流値のみ大きくした場合、トルク制御系の一巡伝達関数のゲインが全周波数領域にわたって大きくなり、不安定（自励振動が発生する状態）となってしまう。

そのため、トルク制御系の安定性を確保するために、高周波領域で一巡伝達関数の位相を進ませる必要がある。ピニオンEPSではトルク制御系の一巡伝達関数を進ませる方法として、位相補償制御が使用されてきた。図10に位相補償制御ブロック図を示す。

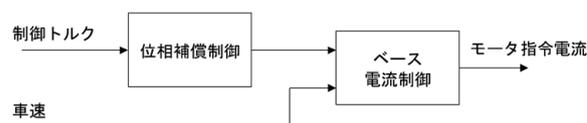


図10 位相補償制御ブロック図

しかし、位相補償制御では、チューニング方法が周波数応答（ゲイン、位相）基準あるいは、実機台上評価基準で行っていたことから、車両チューニングによるベース電流値の増加による高応答化と安定性確保の両立が難しいことが分かった。

そこで、ベース電流値の増加による高応答化と安定性確保を実現するために、安定化制御を実装した。図11に安定化制御ブロック図を示す。

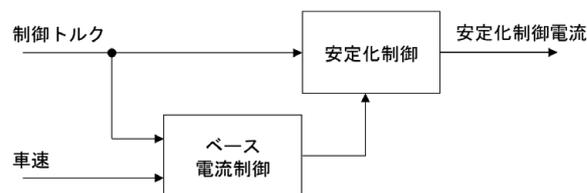


図11 安定化制御ブロック図

本制御は、ベース電流値の電流勾配の大きさに関わらず、トルク制御系のゲイン余裕及び位相余裕を確保することができる制御となる。位相補償制御と安定化制御の仕様の比較を表3に示す。

表3 制御仕様比較

比較項目	位相補償制御器	安定化制御器
制御器の構成	位相進み×2 位相遅れ×1	安定化制御器の一般形に基づく状態推定及び外乱推定フィードバック
チューニング方法	周波数応答基準 実機台上評価挙動基準	制御対象モデルを利用したモデルベース
チューニングパラメータ	位相補償器のゲイン カットオフ周波数	固有周波数, 減衰率

今回は制御対象モデルを利用したモデルベース開発手法を用いてパラメータ検討し、トルク制御系の固有振動数と減衰率を指定して机上チューニングを行うため、作業効率も飛躍的に向上した。

3.3 微分電流制御

本制御は、制御トルクにHigh-Pass Filter（以下HPF）、Low-Pass Filter（以下LPF）処理して得られるトルク微分値をベース電流値に加算する制御である。

本制御を低い制御トルク域で使用することで、操舵トルクの増加を緩やかにすることができるため、応答性の向上を図ることができる。図12に微分電流

制御のブロック図を示す。

HPFにより微分演算を行い、LPFにより微分演算に伴う高周波領域のノイズ低減を図ることができる。

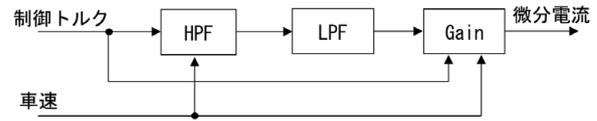


図12 微分電流制御ブロック図

4 おわりに

ヤマハ発動機(株)様の本製品採用をきっかけに、従来EPSが採用されている車両については、本製品への切り替えを推進していきたい。また、オフロード車両用の高出力EPSのラインナップを拡充することができたため、今後は市場の要望に合わせて、本製品とピニオンEPSで適切な仕様を提案していきたい。

最後に今回の開発にご協力いただいたヤマハ発動機(株)様及び当社の関係者にこの場をお借りしてお礼を申し上げます。

参考文献

- 1) 三宅, 富田: 非乗用車向けEPSの開発, KYB技報第60号, (2020年4月)
- 2) 松本, 榎本, 見上, 福士: 車載用電動アクチュエータの制御技術, カヤバ技報第65号, (2022年10月)

著者



青山 雅

2015年入社。オートモーティブコンポーネンツ事業本部車載機器事業部技術部ステアリング設計室。電動パワーステアリングの設計、開発に従事



菊池 輝之

2011年入社。オートモーティブコンポーネンツ事業本部技術統轄部電子技術部第一開発室。電動パワーステアリングの設計、開発に従事