

EPS 用一体型モータ / ECU の開発

Development of Motor-Integrated ECU

小池 進 S. KOIKE 谷永 隆 T. TANINAGA 丹羽智宏 T. NIWA

Energy saving that shows consideration for the environment and smaller vehicle components for expansion of vehicle interior space are needed. Therefore, for motors and ECU (Electric Control Unit) used in an electric power steering, not only reduction in size and weight but higher efficiency are required. For this purpose, motors and ECU which conventionally were mounted separately have been integrated. Here development results of motor integrated ECU are introduced.

Key Words: electric power steering, motor, ECU, integration, high efficiency, small size, light weight

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車の導入が急速に進められている。ステアリングシステムもまた、燃費向上への配慮から、油圧式パワーステアリングシステムから電動パワーステアリング（EPS）システムへ急速に移行している。自動車1台あたりに使用される電装部品は増加しており、バッテリーへの負荷軽減のためEPSの省エネルギー化が求められている。また、車室スペースの拡大ニーズに対応して、車両部品の小型化も重要になってきている。

以上のようなニーズに応えるため、小型・軽量、高効率化を目指した一体型モータ/ECUを開発・製品化したので以下に紹介する。

とで、モータとECU間の配線損失を低減し、高効率化を実現した。また、ECU専用ヒートシンクの容量低減とモータのコイル占積率向上により小型・軽量化を実現した。

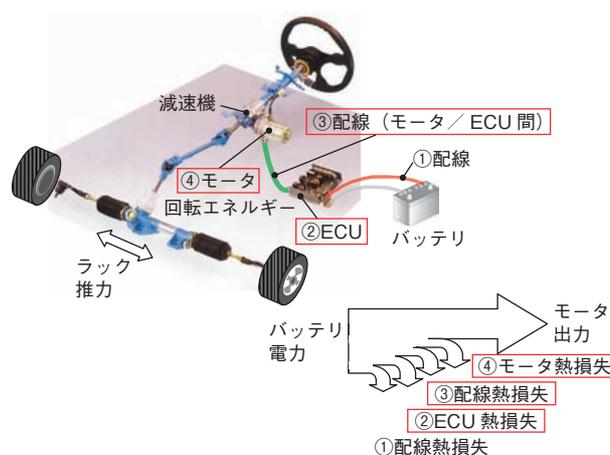


図1 EPSシステム概要と電力効率
Structure of EPS system and its power efficiency

2. 開発の狙い

EPSシステムの電力効率は、図1のように示される。車両のバッテリーから電力が供給され、ECUからモータへと電流が流れ、回転エネルギーに変わる。その回転エネルギーは減速機を介して、タイヤを動かすラック推力となる。車両側から見た場合、消費電力を抑えることが重要であり、そのためにはモータやECUの電力損失を極力小さく抑えることが必要である。

従来、EPSに使用されるモータとECUは車両に独立して搭載されていた。そのため、モータとECUは電気的にも別々に配線する必要があり、配線抵抗により電力を損失していた。今回、モータとECUを一体化するこ

3. 開発内容

3.1 モータとECUの一体化

一体化構造品では、図2に示すように、モータ、モータ回転角センサおよびECUを垂直軸方向に配置した。

モータはブラシレスモータとし、コイルによる界磁をするステータと、その内径側に永久磁石を用いたロータで構成される。ECUはモータをMOS FETで正弦波電流駆動するパワー回路部と、マイコン、内部電源、通信インターフェイス、ブリドライバなどよりなる制御回路部と、ヒートシンク、カバーなどで構成される。

3.1.1 モータと ECU の一体化によるメリット

モータと ECU を直結したため、モータと ECU 間の配線損失が低減し、バッテリーからモータへの電力供給効率が向上した。また、従来、モータ回転角センサのオフセット補正を車両メーカーの組立工程で実施していたが、これを当社の組立工程内で実施することにより、車両メーカーの作業負担は軽減した。さらに、従来モータ回転角センサの角度 0 の位置をモータ単体にて機械角レベルで補正していたが、一体型モータ / ECU では、電気角レベルの精度で補正することにより、位置精度が向上した。



図2 一体型モータ / ECU 構造図
Structure of motor-integrated ECU

3.1.2 モータと ECU の直結構造への対応

電気接続線（モータ三相配線とモータ回転角センサ配線）は、ECU 内スペースの効率的利用の妨げにならないようにする必要がある。そのため、モータ三相配線は、モータ内の三相線取出しをモータ外周端に配置し、ECU 側のパワー部端子台とボルトで結合する構成とした。また、モータ回転角センサの配線は、回転角センサからの端子をモータ外周端に配置し、ECU 側の端子案内構造部を貫通後、制御基板にはんだで接合する構成とした。

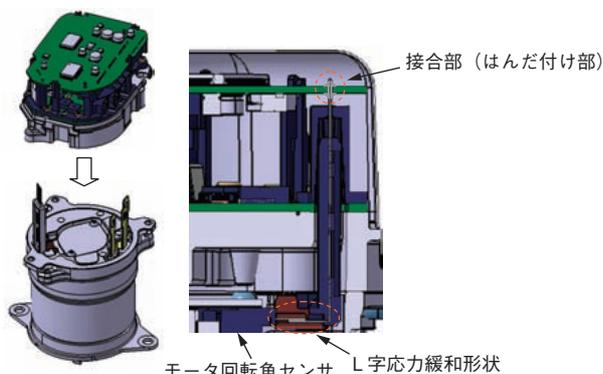


図3 接合部の応力緩和
Stress relief at jointed part

ここで、搭載環境のヒートショックによって、各材料の線膨張係数の差でモータと ECU 間のはんだ接合部に応力が発生するが、回転角センサの端子を L 字型にすることで応力を緩和させた（図3）。

これらの結果、接合部（はんだ付け部）の強度の安全率は目標値に対して約 2 倍となり、はんだ接合寿命の信頼性も満足する。接合部（はんだ付け部）寿命も接合部破断約 5 倍以上（推定）が見込めた（図4）。

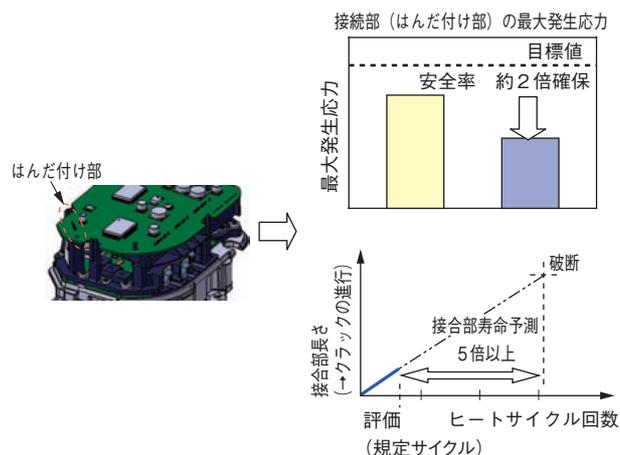


図4 接合部の応力軽減効果と寿命予測
Effect of stress reduction at jointed part and life estimation

3.2 ECU

3.2.1 ECU の専用ヒートシンク容量の低減

一体型モータ / ECU は作動時のスイッチングロス、パターン配線ロスおよびモータの銅損・鉄損等により発熱する。

電子部品の熱による故障を防止するため、ヒートシンクによる温度上昇の抑制と放熱が重要である。今回、モータと ECU を直結することで、モータと ECU 間の熱の授受により、互いのヒートマスを共有する構造とした。このため、従来構造で ECU 専用を設定していたヒートシンク容量を最適化（軽量化）するため、熱シミュレーションと検証テストを実施した（図5）。

シミュレーションと検証テストでの結果の差は約 10℃ であり、ほぼ設計通りの結果が得られた。これら基礎データをベースに部品許容温度に対し必要マージンを取り、ECU 専用ヒートシンク容量の最適化（軽量化）を行った結果、従来のヒートシンクの場合に比べて約 20% の質量低減ができた（図6）。

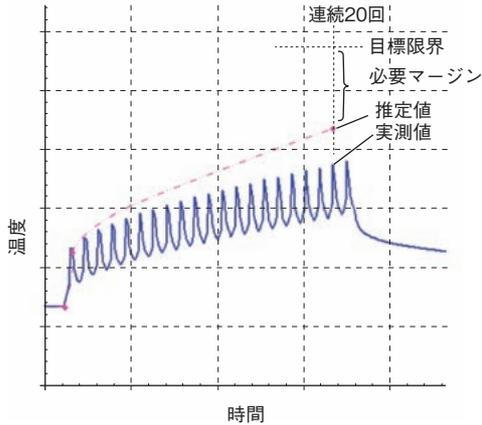


図5 温度検証結果
Result of temperature verification

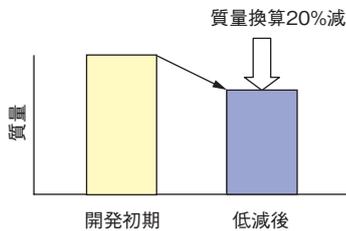


図6 専用ヒートシンクの質量低減
Weight reduction of specialized heatsink

3.2.2 ECU 集合端子 (バスバー) の構造的配慮

従来、パワー回路部と制御回路部に回路および基板が分割されている構成で、互いの基板間は、集合端子 (バスバー) で電気的に接続されている。またこれらは、多ピン、狭ピッチのバスバーで、基板上で接続されている (図7)。

しかしこの構成では、組付性が懸念される。

このためパワー回路部に基板挿入案内形状 (ピン) と、バスバー先端位置を維持するバスバーガイドを設ける構成とすることにより、制御回路部の組付性の問題を解決した。

また、バスバーのはんだ付けではんだごてからの逃げ必要エリアを基板端に寄せ、基板端にバスバーを集中配列することにより、部品実装スペース効率を確保した。さらに、基板にバスバーをはんだ付けする製造工程での生産の効率が向上した。

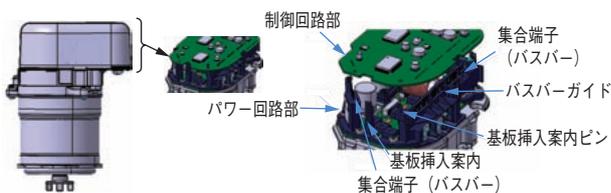


図7 集合端子構成
Configuration of bus bar

3.3 モータ

3.3.1 磁石

従来の希土類リング磁石に代えて、セグメント磁石を採用した (図8)。セグメント磁石の採用により、極間の磁石使用が不要となるため、磁石使用量を従来比で約45%低減し、軽量化できた。昨今の資源問題でクローズアップされている希土類の使用量を低減することで、地球環境保全にも貢献している。

セグメント磁石採用にあたっては、磁力ばらつき低減が課題となる。リング磁石は一つで複数の磁極を有するが、セグメント磁石は極と同じ数だけ必要になる。モータに組み込んだときの各極の磁力のばらつきは、磁石の磁気特性のばらつきだけでなく寸法のばらつきも影響する。そのため、セグメント磁石の磁力がばらつく要因はリング磁石よりも多い。磁力のばらつきにより、スロット数に応じた次数のコギングトルクが発生するため、このばらつきの低減が必要である。開発品では、磁石の組立位置の高精度化を図ることで、コギングトルクをリング磁石同等レベルに抑え目標値を達成した (図9)。

磁力ばらつきがない場合にも、極・スロットの組合せによるトルク変動が発生する。このトルク変動を低減する磁石形状の最適化については後述する。(3.3.3項)

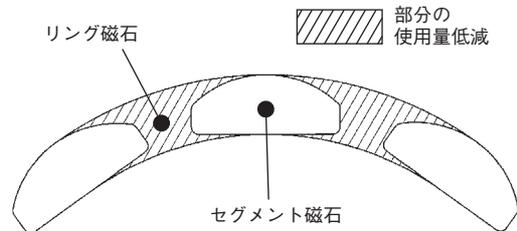


図8 磁石断面図
Cross section of magnet

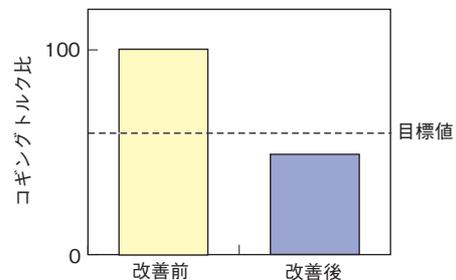


図9 磁石位置精度の向上によるコギングトルクの低減
Reduction of cogging torque by improvement in positional accuracy of magnet

3.3.2 コイル占積率

コイルスペースを有効に使うため、結線方式は2並列のダブルデルタ結線とした(表1)。ダブルデルタ結線により、コイルの細線化が可能となり、占積率が従来比で5%向上し、トルク体積密度も向上した(図10)。しかし、ダブルデルタ結線は閉回路となるため、誘起電圧の $3n$ ($n=1, 3, 5, \dots$) 次高調波による循環電流が発生する。循環電流は、発熱損失となるため可能な限り小さくすることが重要である。循環電流の低減方法については後述する(3.3.3項)。

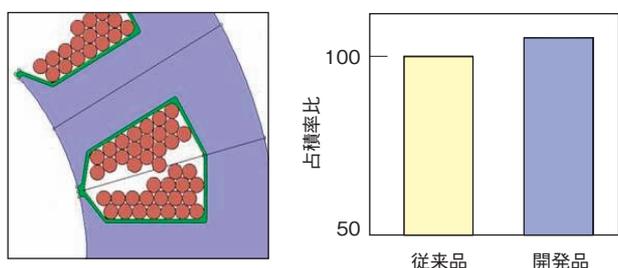


図10 コイルスロットと占積率
Coil slot and space factor

3.3.3 磁気回路の最適化

トルク体積密度の向上だけでなく、滑らかな操舵特性も重要である。これには、トルク変動となるコギングトルクとトルクリプルを低減する必要がある。トルクリプルは誘起電圧の $3n + 2$ 次、 $3n + 4$ 次 ($n=1, 3, 5, \dots$) の高調波やステータコア先端の漏れ磁束が原因で発生する。漏れ磁束を低減し、トルクリプルを低減するためには、スロット開口部を広げることが有効である。

しかし、スロット開口部とステータコア先端の境目で磁気抵抗の変化が生じるため、スロット開口部を広げると、コギングトルクは増大するという相反関係にある。

これらの課題を解決するため、磁界解析により磁気回路の最適設計を実施した。磁界解析結果を図11に示す。スロット開口部はコギングトルクとトルクリプルのバランスがよい大きさとした(図12)。さらに、磁石形状を、中央部が厚く端部が薄い偏肉形状とした。端部が薄くなるとパーミアンスが低下し、耐減磁性が低下するため、耐減磁性を考慮して、ある一定以上の厚みを確保しながら最適な偏肉形状を決定した。これにより、トルクリプルと循環電流の原因となる誘起電圧の3次高調波を低減させた(図13)。これは、任意に形状加工できるセグメント磁石の利点である。スロット開口部と磁石形状の最適化により、低コギングトルク、低トルクリプルおよび低循環電流を同時に実現させ、トルク体積密度を向上させた。

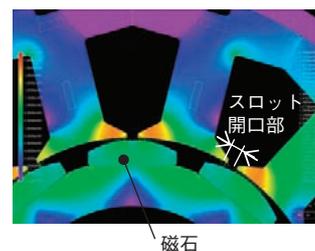


図11 磁界解析シミュレーション
Simulation of magnetic field analysis

表1 結線とコイル線径の関係

Relationship between wire connection and coil wire diameter

結線方式	シングル (直列) スター [ベース]	シングル (直列) デルタ	ダブル (並列) スター	ダブル (並列) デルタ
結線図				
コイル線径比	1	0.76	0.70	0.54
コイル巻数比	1	1.70	2.00	3.50

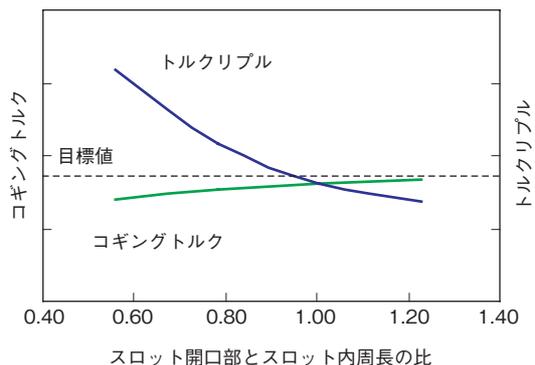


図 12 スロット開口部とトルク変動の関係
Relationship between slot opening and torque fluctuation

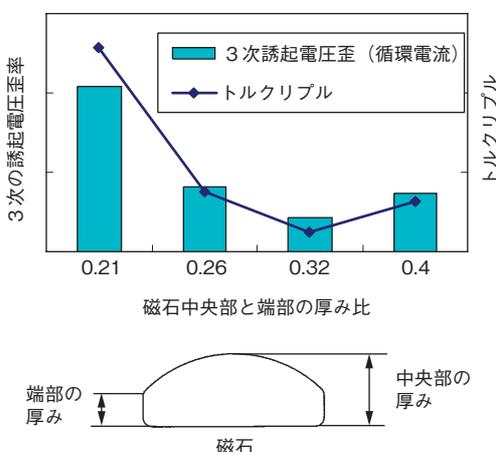


図 13 マグネット形状と誘起電圧歪の関係
Relationship between magnet shape and induced voltage distortion

4. 効果

開発品は従来品と同等の性能を確保した。ハーネスの廃止など一体化した利点に加え、一体型モータ / ECU の小型・軽量化、高効率化の技術を織り込んだことによる効果を図14に示す。従来のモータと ECU 別体型と比較して、開発品では体積約 30%、質量 35% および電力消費 10% の低減を実現した。

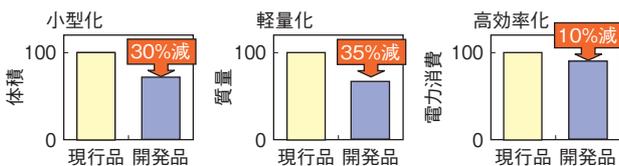


図 14 小型・軽量、高効率化の効果
Effect of smaller size, lighter weight and higher efficiency

5. おわりに

EPS の省エネルギー化と省スペース化ニーズへの迅速な対応策として、当社初の内製一体型モータ / ECU を開発し量産化した。熱、構造、磁界解析のシミュレーションを活用することにより、課題に対して効果的な対策検討が可能となり、小型・軽量化を達成することができた。今後、この技術を発展させ、さらなる高効率化と小型化を目指した製品を開発していく。

参考文献

- 1) 宮崎博之 : JTEKT ENGINEERING JOURNAL, no. 1009(2011)19.
- 2) 永橋 豊, 川久保暁威, 辻本泰介, 景井勝典, 長谷川 純 : JTEKT ENGINEERING JOURNAL, no. 1003 (2007)35.
- 3) 高橋俊博, 鈴木博之, 中山琢也, 藤山賢一, 山口茂利, 後藤武志, 齊藤貴俊, 山下正治 : JTEKT ENGINEERING JOURNAL, no. 1006(2009)49.

筆者



小池 進*
S. KOIKE



丹羽智宏*
T. NIWA



谷永 隆**
T. TANINAGA

* 自動車部品事業本部 第1電子技術部

** 自動車部品事業本部 実験解析部