

# 新型電動車搭載e-Axle用小型高トルクモータ

関根 優\*

橘 祐介\*  
室田 浩平\*\*前田 篤志\*  
尾崎 高一郎\*\*

遠藤 雅亜\*

## 抄 録

モータ、インバータ、ギヤボックスを統合した新型e-Axle用小型高トルクモータを開発した。新型モータの小型化と高トルクを両立させるため、ステータコイルに薄型平角線を採用し、巻線構造の最適化を図った。本稿では電磁気設計の工夫と生産性向上の課題概要を中心に解説する。

## 1. まえがき

近年、地球温暖化対策や環境規制の強化に伴い、自動車の電動化が拡大している。車室空間の拡大、空気抵抗の低減、バッテリーを搭載するスペースの確保、衝突安全への配慮などへの要求に応えるべく、モータ、インバータ、ギヤボックスを統合した駆動ユニット（以下、e-Axle）の小型化が求められている。e-Axle（Fig. 1）の小型化の実現には体積に占める割合が大きく、ユニット形状への影響も大きいモータの小型化が不可欠である。

トルクと出力を確保しながらモータを小型化するには、限られたスペースにステータコイルの巻数（以下、ターン数）を確保し、かつ大電流を流す構造を工夫することが重要となる。

新型モータでは小型かつ高性能を表す指標であるモータ体積当たりのトルク（以下、トルク密度）、およびモータ体積当たりの出力（以下、出力密度）の向上を狙った設計を行った。

## 2. ステータコイルの巻線構造

小型化と高性能化の両立には、ステータコイルの巻線構造の工夫が鍵である。新型e-Axle用モータは、ステータコイル断面が長方形の平角線（Fig. 2）を用いて、ターン数を増やすことでトルクを向上させ、並列巻線構造の最適化による出力を確保した。

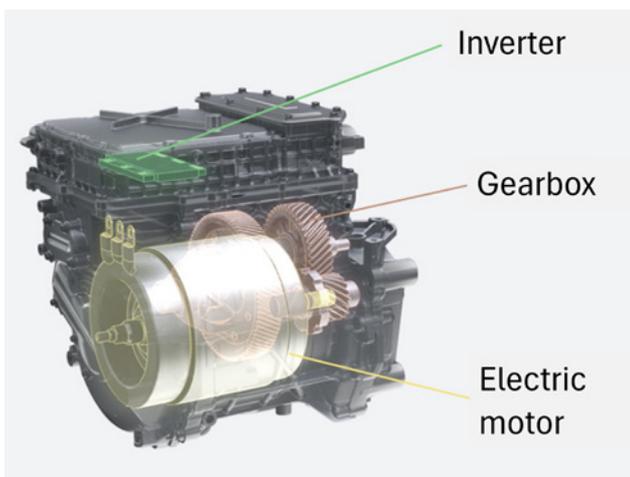


Fig. 1 Main components of e-Axle  
画像出典元：日産自動車株式会社

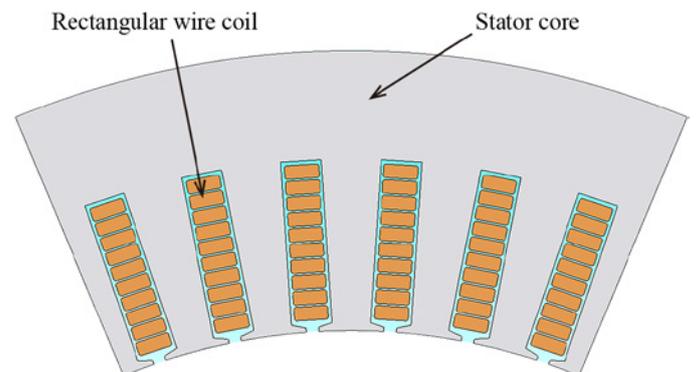


Fig. 2 Stator cross-section

## 2.1 モータトルクの向上を狙った巻線構造

埋込型永久磁石同期モータ（以下、IPMSM：Interior Permanent Magnet Synchronous Motor）のトルクは、式（1）で表される。

$$\begin{aligned} T &= T_m + T_r \\ &= \frac{p}{2} \{ \psi_a i_q + (L_d - L_q) i_d i_q \} \end{aligned} \quad (1)$$

ただし、 $T$ ：モータトルク、 $T_m$ ：マグネットトルク、 $T_r$ ：リラクタンストルク、 $P$ ：極数、 $\psi_a$ ：磁石による鎖交磁束、 $i_d$ 、 $i_q$ ：d、q軸電流、 $L_d$ 、 $L_q$ ：d、q軸インダクタンスである。

一般に高トルク領域ではマグネットトルク $T_m$ の寄与度が高く、巻線構造がトルクへ与える影響を客観的に示すため、式（1）のマグネットトルク  $T_m = \frac{p}{2} \psi_a i_q$  に着目する。マグネットトルクに相関のあるパラメータは式（2）で表される。

$$T_m \propto \frac{p}{2} N_{turn} N_{series} \Phi I_{coil} \quad (2)$$

ただし、 $N_{turn}$ ：スロット当たりターン数、 $N_{series}$ ：コイル直列数、 $\Phi$ ：磁束、 $I_{coil}$ ：コイル電流である。

モータトルクは、極数、ターン数、コイル直列数、磁束、コイル電流に比例する。しかし、モータサイズを変えずに極数や磁束を増やす場合、磁石量の増加などコスト影響が大きい。また、コイル電流の増加はインバータなどの強電系の制約やモータ冷却性能の制約によって難しい。そこで、ターン数を増やすことでマグネットトルクの増加を狙った。

スロット断面積を変えずにターン数を増加させるには、コイル断面積およびクリアランスの縮小が必要となる。コイル損失を低減させながらコイル断面積を縮小することを狙い、コイルには薄型平角線を採用した。新型e-Axle用モータでは、薄型平角線を用いたステータの生産技術を工夫することで、競争力のある10ターンを実現した。

## 2.2 モータ出力を確保する巻線構造

モータ出力は、式（3）で表される。

$$P_{out} = \eta P_{in} = \eta 3 V_{phase} I_{phase} \cos\theta \quad (3)$$

ただし、 $P_{out}$ ：モータ出力、 $\eta$ ：モータ効率、 $P_{in}$ ：モータ入力電力、 $V_{phase}$ ：モータ相電圧、 $I_{phase}$ ：モータ相電流、 $\cos\theta$ ：力率である。

並列巻線構造では、入力電流が複数コイルに分散されるため、コイル並列数を $N_{parallel}$ とすると、モータ相電流とコイル電流の関係は式（4）で表される。

$$I_{phase} = N_{parallel} I_{coil} \quad (4)$$

Fig. 3 (a), (b)に示すように、一相当たりのコイル数は直列数と並列数の積で、8である。

モータ出力を確保するには、式（3）で示すようにモータ相電圧に応じたモータ相電流が必要となる。一方、式（4）で示すように、モータ相電流はコイル電流とコイル並列数の積で決まる。コイル電流は耐熱・冷却に基づく制約があるため、コイル並列数を増やすことでモータ相電流を確保した。

新型e-Axle用モータでは、平角線のステータ端子とバスバー端子の溶接を工夫することで、4並列を実現し、モータ出力を確保した。

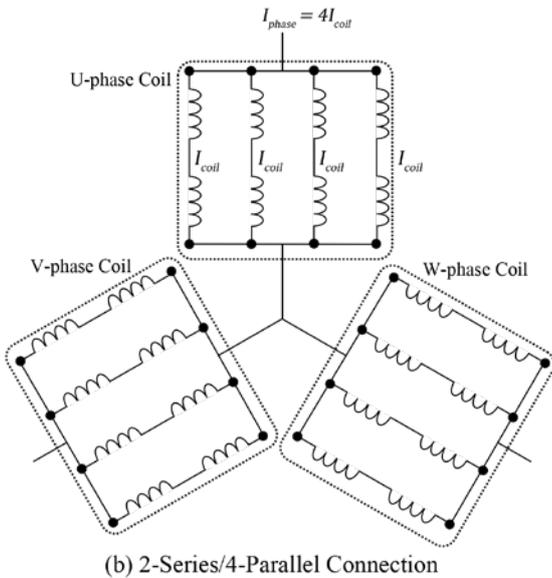
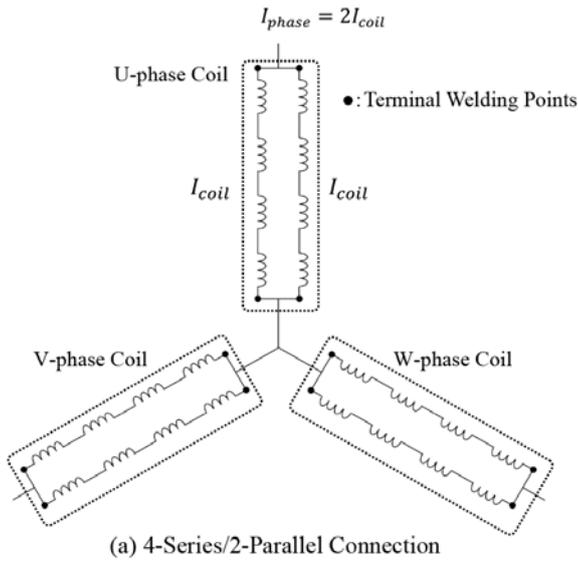


Fig. 3 Three-Phase Coil Connection Diagram

結果、モータサイズを増やすことなくターン数を10ターン、並列数を4並列とすることで高トルクと高出力を両立し、競争力のあるトルク密度、出力密度を達成した (Fig. 4).

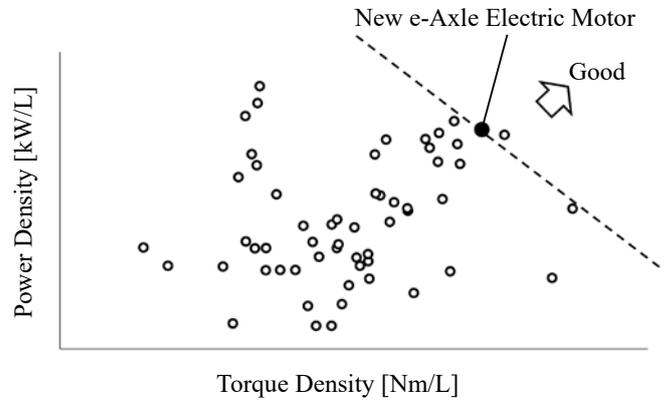


Fig. 4 Torque Density vs Power Density of e-Axle Electric Motor

### 3. 生産性向上の課題

#### 3.1 薄型平角線コイルの成形

薄型平角線コイル成形時の曲げ応力集中により、引張側でのエナメル被膜の切れ・剥離、圧縮側でのしわ、さらに成形後の形状ばらつきが懸念となる。エナメル被膜に発生する応力が、ばらつきを考慮しても耐力を超えないよう、コイル成形時の曲げ寸法を管理し、エナメル被膜の材料を決定した。

#### 3.2 スロット内ワニス量の管理

薄型平角線を用いたステータコイル10ターン化によって、スロット内クリアランスの不均一の程度が増加するため、ワニス量の管理が懸念となる。

ワニス固着力を確保する量を考慮しつつ、ワニスが増えない範囲で、最短時間に充填できる注入量を最適化し、生産性を確保した。

### 3.3 溶接打点数の増加

ステータコイルと三相端子台バスバーはそれぞれの銅端子を溶接接合している (Fig. 5).

平角線の4並列構成であるため, Fig. 3 (b)の●で示すように溶接箇所は計24箇所である. 溶接箇所の増加に対し, 溶接における位置決めや寸法精度を管理し, 効率の良い新工法を開発した.

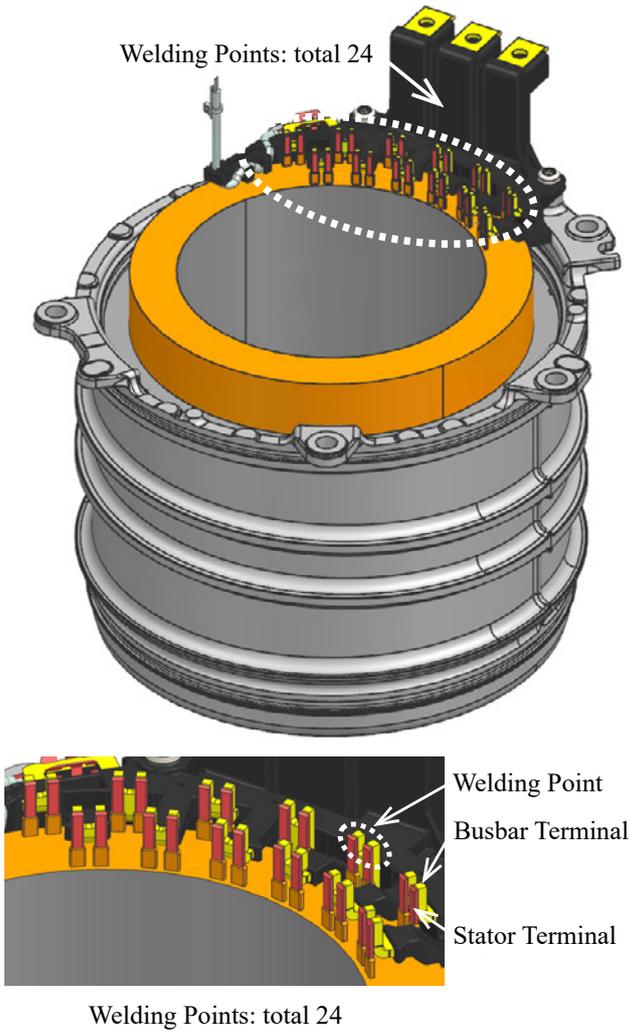


Fig. 5 Welding points of Stator Coil and Busbar

### 4. まとめ

- 小型・高トルク・高出力を狙った新型e-Axle用モータを開発した.
- ステータコイルに薄型平角線を用い, サイズを拡大せずに10ターンの巻数を実現し, 高トルク密度を達成した.
- ステータコイルを4並列構成とすることで相電流を確保し, 高出力密度を達成した.
- 課題となる生産性向上についてはコイル成形やスロット内ワニス量の管理, 平角線およびバスバーの溶接工法を工夫した.
- 競争力のあるトルク密度, 出力密度を達成し, 新型e-Axleの小型化かつ高性能化を実現した.

### 5. 謝辞

本モータ開発に当たり, Astemo株式会社の皆様には多方面にわたりご助力を賜りました.ここに深謝いたします.

### ■ 著者 ■



関根 優



橘 祐介



前田 篤志



遠藤 雅亜



室田 浩平



尾崎 高一郎