# ハルバッハ配列磁石を用いた高出力密度インホイールモータの開発

伊藤 誠<sup>1)</sup> 須藤 哲也<sup>1)</sup> 高橋 暁史<sup>1)</sup> 原 崇文<sup>1)</sup> 岩野 龍一郎<sup>1)</sup>

Development of a high power density in-wheel motor using Halbach array magnets

Makoto Ito Tetsuya Suto Akeshi Takahashi Takafumi Hara Ryuichiro Iwano

We are developing compact and lightweight in-wheel motors that can increase the cruising range for EVs that are becoming more prevalent in the de-carbon society. This paper proposes the technology to increase the motor torque by Halbach array magnets as a technology to achieve the world- class motor power density of 2.5 kW/kg. FEM analysis shows that a Halbach-array type magnet layout can obtain a large gap magnet density with a small amount of hte magnets compared with conventional SPM type.

#### KEY WORDS: EV and HV system, motor drive system, in-wheel motor, Halbach array magnets (A3)

## 1. まえがき

近年,脱炭素社会の実現に向けて,技術開発や投資活動が活 発になっている.自動車部門では,ガソリン駆動車から電気自 動車(EV)へ移行するための法規制が各国で推進されている. 従来の EV はバッテリの設置スペースを含む車内空間を制限 する駆動システムがシャーシに配置されている.これにより, 十分なバッテリを搭載できず,長距離走行に向かないことや, 1回の充電で走行できる距離(航続可能距離)が短いことが EV 普及を阻害する一因となっている.このため,車輪の中にモー タを搭載することで車内空間を拡大できるインホイールモー タが注目されつつある<sup>(1)</sup>.しかしながら,従来のインホイール モータは,車輪内のモータ体積が大きい,すなわち出力密度が 小さいことが原因で,バネ下の重量が増加するほか,既存のサ スペンションの大規模な変更が必要となるなど<sup>(2)</sup>,新たな課題 を生み出していた.

この課題を解決するために、本研究ではインホイールモー タの高出力密度化が可能なハルバッハ配列磁石について検討 した.本報告では、まず開発したインホイールモータの概要を 述べる.その後、インホイールモータの高出力密度化のアプロ ーチとして、高トルク化と多極化の優位性について述べ、一般 的な多極モータに用いられる表面磁石型ロータ(SPM ロータ) に対するハルバッハ配列磁石ロータの優位性を解析と実測の 両面から提示する.

#### 2. Direct Electrified Wheel の概要

開発したダイレクト駆動システム「Direct Electrified Wheel」 の仕様を Table 1 に、外観を Fig. 1 に示す.減速機を使用しな いダイレクトドライブとし、19 インチホイールに入るサイズ とした.最大出力は 60 kW、最大トルクは 960 Nm、最大出力 時のモータ出力密度は 2.5 kW/kg である.これにはインバータ 1)(株)日立製作所(319-1292 茨城県日立市大みか町 7-1-1)

公益社団法人自動車技術会 2022年春季大会学術講演会(2022年5月25日~27日)
発行日(公開日)2022年5月20日
公益社団法人自動車技術会 2022年春季大会学術講演会講演予稿集

やブレーキの質量は含まないが、モータの磁気回路部以外に モータハウジングや駆動シャフトなどの質量も含む.

ダイレクトドライブのインホイールモータでは、アウター ロータ化することでギャップ径を大きくしトルク増大を図る ことが多いが、本開発では周辺との取合いを考慮しインナー ロータを採用、コイルを高密度に配置し外周側に配置される ステータを薄型化することでギャップ径の拡大を図った.

Table1 Specification of "Direct Electrified Wheel"

No.	Item	Unit	Value
1	Power density of motor	kW/kg	2.5 <sub>*1</sub>
2	Wheel size	inch	19
3	Maximum output	kW	60
4	Maximum torque	Nm	960
5	Supply voltage	V <sub>dc</sub>	420
6	Maximum current	Arms	280

※1: Weight includes the motor housing and driveshaft.



Fig. 1. External View of "Direct Electrified Wheel."

## 3. 理論と解析

3.1. 高出力化・高出力密度化のアプローチ

モータの出力は回転数とトルクの積で表される.したがっ て,モータの高出力化のアプローチとしては,(1)回転数を増 やす,(2)トルクを増やす,のいずれか(または,その両方) となる.

(1)のアプローチは、いわゆるモータの高速化である.モー タを高速化することで、モータの小径化、すなわち小型・軽量 化をすることが可能であることから、モータ単体の高出力化・ 高出力密度化が容易になる.このため、既存の EV 用主機や e-Axle 等では、高速化による EV の高性能化が主流のトレンド である.しかしながら、ホイールとモータの回転数差が拡大す るため、モータが小型化する反面、減速機の大型化や、軸受な どの機械部品点数は増加する.特に、インホイールモータの場 合、他の部品と干渉することなく、これら機械部品をホイール 内に収納する点が課題となる.

一方,(2)のアプローチでは、ホイールに求められるトルク と回転数をモータが出力できるようになれば、減速機などの 機械部品,すなわち、ホイールとモータを接続する中間部品が すべて不要となる.このため、特にインホイールシステムの場 合、モータの収納性向上、システムの高出力密度化だけでなく、 機械部品点数が減少することによる高信頼化、高効率化を一 挙に実現できる.以上より、開発したインホイールシステムで は、(2)のアプローチにより減速機を使用しないダイレクトド ライブを採用した.

## 3.2. 多極化と高トルク密度化

前節のアプローチ(2)によって高出力密度化を図る場合, モータの磁気回路部の高トルク密度化が重要となる.具体的 には,①磁気回路部を構成するコアを軽量化しつつ,②トルク 向上を図る必要がある.本開発では,①に関してモータを多極 化するコンセプトを採用し,1 極当りのコア透過磁束を相対 的に低減することで,バックヨークの体積を低減して軽量化 を図った.ただし,多極化したモータでは前述の通り1 極当 りのコア透過磁束が減少するため,コアの磁化を利用する「リ ラクタンストルク」を活用しにくくなる分,マグネットトルク への依存度が高くなる.このため,②のトルク向上に関しては, 以下の考え方に従ってマグネットトルクの増加を図った.

まず、永久磁石による一相鎖交磁束 $\lambda_{d,PM}$ とモータの磁石 トルクは $T_p$  は次式で表される<sup>(3)</sup>.

$$\lambda_{d,PM} \propto \frac{r}{p} \cdot N_{ph} \cdot k_w \cdot B_\delta \tag{1}$$

$$T_P \propto p \cdot \lambda_{d,PM} \cdot I \propto r \cdot B_{\delta} \cdot I \tag{2}$$

ここで、p は極対数、 $N_{ph}$  は一相巻線数、 $k_w$  は巻線係数、r は ギャップ半径、 $B_\delta$  はギャップ磁束密度、I は電流をそれぞれ意味する.

式(1),(2)より、トルクの大きさはギャップ半径rとギャップ 磁束密度 $B_{\delta}$ で決まることがわかる.そこで、ロータを大径中 空形状にするとともに、次節に述べるハルバッハ配列によっ てギャップ磁束密度を向上することで、本開発ではマグネッ トトルクを向上できると考えた.

#### 3.3. ハルバッハ配列

従来より, ギャップ磁束密度を向上させることが可能な磁 石レイアウトとして, ハルバッハ配列が知られている. 一般的 には, Fig.2(a) に示すように, 表面磁石 (SPM) 型の磁石レイ アウトにおいて, ギャップに磁束が集中するような磁化分布 を持たせることで実現される. しかしながら, このような SPM 型の場合, 磁石内部での磁路が長くなることによって, 十分に ギャップ磁束密度を高められない懸念があった. そこで本開 発では, Fig.2(b) に示すように, 平板状の主極磁石とスポーク 磁石と極中央部に配置したコアにより構成されるハルバッハ 配列 (Halbach array) 型の磁石レイアウトのロータを開発した.

Fig.3 に SPM 型と Halbach array 型のそれぞれの磁石レイア ウトでの,永久磁石によるギャップ磁束密度の FEM (Finite Element Method) 解析結果を示す. FEM 解析では簡単のため, Fig.2 に示すように,ステータをリング状コアとしてスロット 効果は無視した.コア材は一般的な35材とし,磁石材はNdFeB の焼結磁石を仮定した.

解析の結果, SPM 型のギャップ磁束密度の空間分布基本波 実効値を 1.00 pu としたとき, Halbach array 型では 1.06 pu と なり, Halbach array 型の方がギャップ磁束密度が 6% 高い結 果となった.また,使用した磁石量は, SPM 型を 1.00 pu とし た時, Halbach array 型では 0.61 pu となり,磁石量は 39% 少 なかった.したがって,本開発の Halbach array 型では,従来 のハルバッハ着磁と比較して,少ない磁石量で高いギャップ 磁束密度を実現できることが明らかとなった.以上の結果か ら,本開発の Halbach array 型の磁石レイアウトの優位性が示 された.



Fig. 2. Calculation Models (left: SPM, right: Halbach array).



Fig. 3. Flux Distribution (left: SPM, right: Halbach array).

## 4. 実験結果

4.1. 試作ロータ外観

開発したハルバッハ配列磁石ロータを適用したインホイー ルシステムを試作した. Fig.4 にインバータを含むインホイー ルシステムおよびロータの外観を示す. ロータは内周側に位 置したハウジングを介してシャフトに固定され,動力をホイ ールに伝達している.



Fig. 4. Prototype (left: external appearance, right: rotor).

## 4.2. ピーク特性

試作したインホイールシステムを試験ベンチに組み込み負 荷試験を実施した. Fig.5 に試験装置の外観を示す. インホイ ールシステムのホイール側を試験ベンチに締結し, インバー タ側から DC 電力と冷却油を入出力した. DC 電圧は 380 V と した. Fig.6 に最大出力 60 kW (600 min<sup>-1</sup>, 960 Nm) 時の電圧 と電流の実測波形を示す. 電流波形はインバータのキャリア 周波数に対応した高次の脈動成分を含むものの, 略正弦波と なっており, インバータを含めたインホイールシステムとし て安定に駆動できることを実機にて確認した.



Fig. 5. External View of Test Equipment.



Fig. 6. Measured Waveform under the Maximum Output at 960 Nm and 600 min<sup>-1</sup> (upper: voltage, lower: current).

# 5. まとめ

本研究では、今後の普及が期待されるインホイールモータ の技術課題を解決するための高出力密度化技術としてハルバ ッハ配列磁石ロータの優位性を示した.従来のSPM型と比較 して、Halbach array 型は 39 % 少ない磁石量でギャップ磁束 密度を 6 % 向上させることができることを FEM 解析を用い て示した.

開発したハルバッハ配列磁石ロータを適用したインホイー ルシステムを試作し、最大トルク 960 Nm、ピーク出力 60 kW を実測した.また、インバータを含むインホイールシステムと して、安定駆動が可能であることを実証した.

## 参考文献

(1) L. Shao, A. E. H. Karci, D. Tavernini, A. Sorniotti and M. Cheng: Design Approaches and Control Strategies for Energy-Efficient Electric Machines for Electric Vehicles-A Review, IEEE Access, vol. 8, pp. 116900-116913, (2020)

(2) C. Chen, Y. Cheng and F. Meng: Optimum Design of a Novel In-Wheel Suspension of the Electric Wheel, 3<sup>rd</sup> IEEE International Conference on Green Energy and Applications, p. 106-110 (2019)

(3) A. Binder: Elektrische Maschinen und Antriebe, 2.Auflage, Springer Vieweg (2017) (in German)