

## インホイール駆動システム向けダイレクト油冷技術の開発

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

## Development of direct-cooling technology for in-wheel drive system

Tetsuya Suto Makoto Ito Akeshi Takahashi Ryuichiro Iwano Takafumi Hara

We are developing a small and lightweight direct-drive system towards realization in-wheel EVs. To achieve the world-class 2.5kW/kg power density of motor, we developed a direct-cooling motor that immersed core, coils and magnets in cooling oil and improved cooling efficiency. We conducted heat-run test on the test bench, it was demonstrated that direct cooling is effective and continuous operation is possible. Additionally, it was found that the coil temperature can be controlled by the flow rate of the cooling oil. In this paper, we report the concept of direct cooling and the results of the measurement.

**KEY WORDS:** EV and HV system, motor drive system, in-wheel motor, direct cooling (A3)

## 1. ま え が き

近年、脱炭素社会の実現に向けた投資活動や技術開発が活発となり、特に自動車分野では法規制の改正と併せてガソリンエンジン車からEVへの転換が進められている。

従来のEVでは、ガソリンエンジン車の駆動技術を流用し、エンジンを駆動用モータに置き換えドライブシャフトを介しホイールを駆動させている。これに対して、モータをホイール内に搭載し直接駆動するのがインホイールモータである。ホイールを直接駆動することによる効率の高さや制御の自由度の高さ、駆動系を全てホイール内に格納することによる車体骨格構造の自由度の高さおよびそれに伴う車室空間の拡大など、インホイールモータならではの利点は数多く存在する。バッテリー搭載スペースの増加と機械的ロスの低減は、従来EVで課題であった航続距離の拡大にも寄与する。しかしながら、ホイール内の重量が増加するほか、既存のブレーキやサスペンションなどの大幅な改造が必要であった。

そこで、本研究グループでは、モータとインバータおよびブレーキを一体化した小型・軽量のインホイールモータ「Direct Electrified Wheel」の開発を進めてきた。従来は、インバータを構成するパワー半導体に冷却水が付着し漏電することを防ぐため、電気的に絶縁された専用の冷却水路のスペースが必要であったが、本開発ではモータとインバータを一体化するとともに、絶縁性の高い冷却油でパワー半導体を直接冷却した後、そのままモータに循環してコイルも直接冷却する構造とすることで冷却配管のスペースの大幅な削減を図る。さらに、高密度に配置したコイルを全て冷却油内に常時油浸し、圧送した冷却油でダイレクトに油冷することで、冷却効率を向上しモータを小型化、世界トップクラスの出力密度2.5kW/kgの達成をめざす。

1) (株)日立製作所(319-1292 茨城県日立市大みか町 7-1-1)

## 2. Direct Electrified Wheel の概要

開発したインホイールモータ「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60kW、最大トルクは960Nmである。最大出力時のモータ出力密度は2.5kW/kgである。これにはインバータ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。

Table 1 Specification of “Direct Electrified Wheel”

No.	Item	Unit	Number
1	Power density of motor	kW/kg	2.5 <sup>※1</sup>
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	A <sub>rms</sub>	280

※1: Weight includes the motor housing and driveshaft.

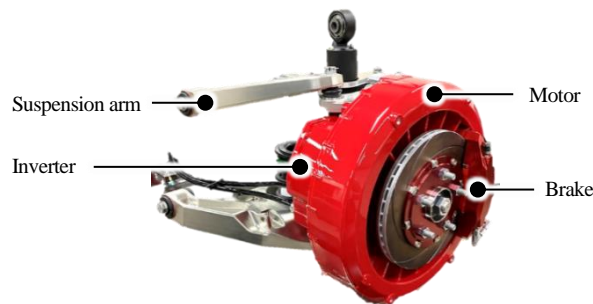


Fig. 1. External view of “Direct Electrified Wheel.”

### 3. ダイレクト油冷

#### 3.1. コンセプト

EV 駆動用モータでは、高出力密度化のために空冷ではなく液状冷媒を用いて冷却するのが一般的である。液冷の方式としては、大別して水冷方式と油冷方式がある。水冷方式は、Fig. 2(a)に示すように、モータ筐体にウォータージャケットと呼ばれる水路を設けて、筐体を介して冷却水によりモータを冷却する。油冷方式は、Fig. 2(b)に示すように、絶縁性の冷却油をモータ内部に流し、コイルやコア、磁石などを直接冷却油に接して冷やす。油冷方式は、発熱部位から冷媒に直接熱伝達させるために水冷方式と比較して冷却効率を高めやすいが、エアギャップに冷却油が浸入する構造の場合にはロータの回転により攪拌損失が生ずる。このため、減速機と組み合わせて使用する高回転型のモータでは、ロータの油浸を部分的にして、ロータで冷却油をかき上げてコイルに接触させたり、冷却油をコイルに噴霧する構造とすることが多い。

これに対して、提案するダイレクト油冷では、モータ内部を全て冷却油で満たし発熱部位と冷却油との接触面積を増大するとともに、冷却油を圧送し流速を上げて発熱部位から冷却油への熱伝達率を向上することで、従来の油冷と比べて冷却効率をさらに高める。概念図を Fig. 3 に示す。実際には流速をコントロールするために、環状の流路をいくつか設けている。この冷却構成では、冷却油の流速を上げるほど発熱源の温度上昇を抑えられると考えられるが、本開発では冷却油の流速とコイル温度との定量的な関係を実機にて検証する。

Fig. 4 はインホイールモータ全体の流路のイメージ図である。流路入口をインバータに設け、パワー半導体を冷却した冷却油を隣接するモータに導入し、環状流路でモータの発熱部位を冷却して熱交換器に送るような流路としている。また、高温になるブレーキと高熱に弱いロータ磁石およびインバータとの間に冷却油を介在させることで、ブレーキからの伝熱を緩和するとともに、ブレーキキャリパも冷却油で間接的に冷却することで、モータ、インバータ、ブレーキの小型化と一体化を可能にした。冷却油は、車体側に搭載したオイルポンプで圧送し、同じく車体側に搭載した熱交換器で冷却して系統を循環させる。

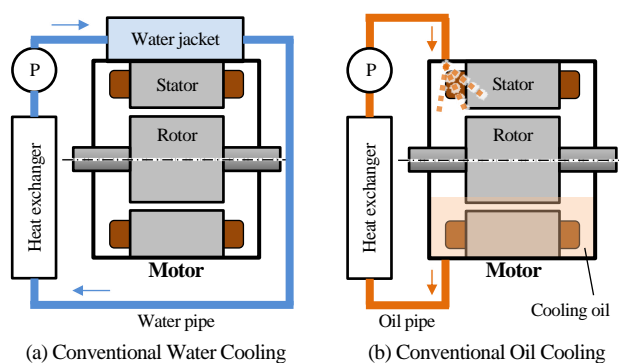


Fig. 2. Conventional method of liquid cooling.

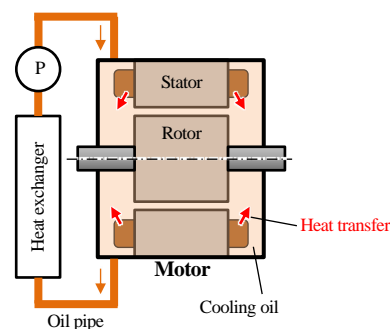


Fig. 3. Direct cooling method.

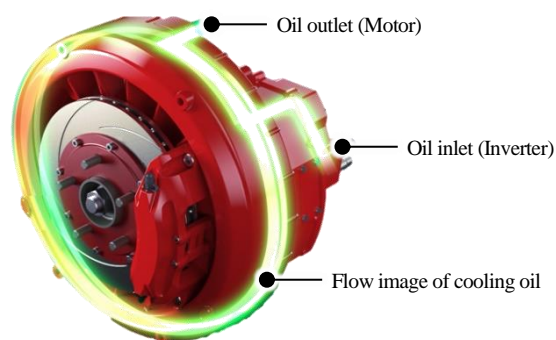


Fig. 4. Concept of direct cooling.

### 4. 冷却性能の評価

#### 4.1. 試験方法

ダイレクト油冷の冷却性能を評価するために、インホイールモータを試験ベンチに組み込みヒートラン試験を行う。

Table 2 に試験条件を示す。回転数は  $100\text{min}^{-1}$  で固定し、冷却油流量は  $2\text{L/min}$ ,  $5\text{L/min}$ ,  $8\text{L/min}$  の 3 条件で試験を行う。コイルエンドの温度上昇が  $60\text{K}$  程度になるまで電流を増大していく。

Fig. 5 は試験装置の外観である。インホイールモータのホイール側を試験ベンチに締結し、油循環装置で冷却油を冷却しながら循環して、コイルエンド温度と冷却油の出口温度が飽和するまで通電する。各部の温度が飽和したときには、通電電流を増加して銅損を増やし、再度温度が飽和するまで通電を継続する。コイルエンドの温度は、あらかじめ当該部に貼り付けておいたサーミスタで計測する。

Table 2 Condition of heat-run test

No.	Item	Unit	Number
1	Rotation speed	$\text{min}^{-1}$	100
2	Flow rate	$\text{L/min}$	2, 5, 8
3	Temperature measurement point	-	Coil end, Outlet of cooling oil
4	temperature rise of coil end	K	< 60

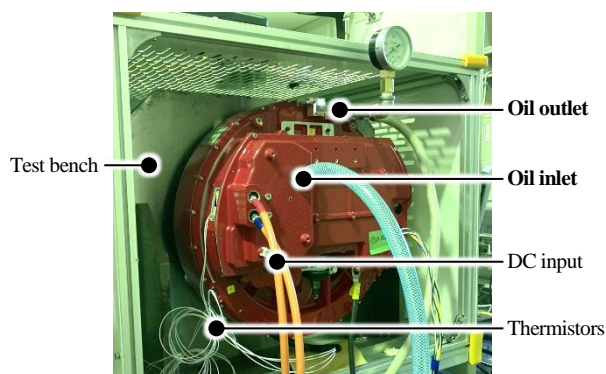


Fig. 5. External view of test equipment.

#### 4.2. 試験結果

Fig. 6 にヒートラン試験の結果を示す。このときの冷却油流量は 8L/min である。横軸が損失、縦軸がコイルエンドおよび冷却油の温度上昇である。損失には銅損、鉄損、機械損を含むが、回転数一定で試験をしているので損失の増加分の大半は銅損である。損失とコイルエンド温度上昇が比例していることが確認できた。図中の赤破線は最大出力に対して 50% 出力相当の運転条件における損失であるが、コイルエンドの温度上昇は 50K を下回っており、ダイレクト冷却による高い冷却性能を実機にて確認できた。

Fig. 7 は冷却油の流量を変化させたときのコイル温度上昇の推移である。流量変化の影響を見るため、回転数と損失は一定にしている。流量反比例で温度上昇を低減できており、コイルから冷却油への熱伝達を流量によって制御できることを実証することができた。

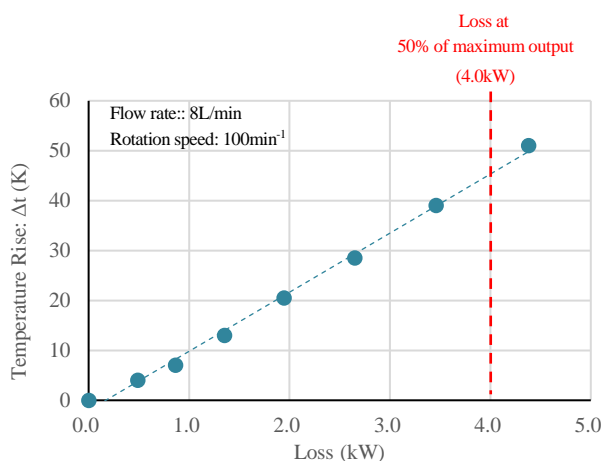


Fig. 6. Relationship between loss and temperature rise.

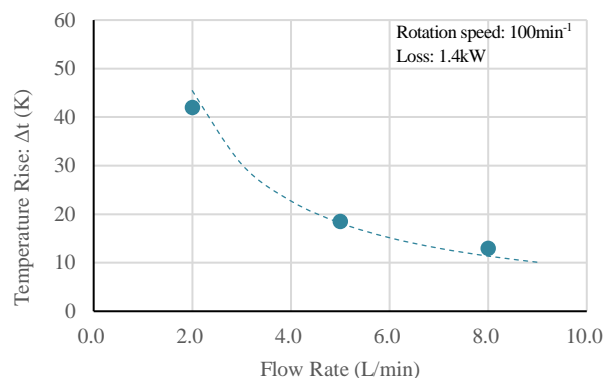


Fig. 7. Relationship between flow rate and temperature rise.

#### 4. まとめ

本開発では、モータ内部を冷却油で満たしコイルやコアなどの発熱部位を圧送した冷却油で直接冷却するダイレクト油冷のコンセプトを考案した。テストベンチ上でインホイールモータ実機のヒートラン試験を実施し、連続運転時のコイル温度を実測した結果、最大出力に対して 50% 出力相当の運転条件においてもコイルの温度上昇は 50K 以下であり、ダイレクト油冷の冷却効果を確認することができた。また、全損失に占める直流銅損の比率が大きいダイレクトドライブモータにおいて、冷却油の流速とコイル温度が反比例の関係となることを確認した。

今後は Fig. 8 のような EV 試作車に搭載した Direct Electrified Wheel の性能検証を進めていく。



Fig. 8. Prototype EV.

#### 参考文献

- (1) <https://www.hitachi.co.jp/New/cnews/month/2021/09/0930.html>
- (2) L. Shao, A. E. H. Karci, D. Tavernini, A. Sornioti 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)
- (3) W. Wang, X. Chen and J. Wang, "Motor/Generator Applications in Electrified Vehicle Chassis—A Survey," IEEE Transactions on Transportation Electrification, vol. 5, no. 3, pp. 584-601 (2019)