

小型高電流密度モータのための密閉冷却構造

Hermetically Sealed Cooling Structure for Small High-current Density Motors

加藤 慎二¹

Shinji KATO

福井 健太郎¹

Kentaro FUKUI

上田 拓¹

Taku UEDA

西井 文哉¹

Fumiya NISHII

要 旨

電動車両駆動モータ用に高電流で小型化による発熱量の増加を吸収できるモータ冷却構造を開発した。従来の冷却手法はステータコイルの露出している箇所に冷媒を滴下するものであり、冷媒の届かないステータスロット内部のコイルにおいては熱伝導に頼った間接的な冷却となっていた。本研究ではステータを密閉構造とすることで、コイル全体を油没させて直接冷却する技術確立した。本技術により従来の冷却手法に対して2倍以上の冷却性能となることを試作モータにて実証した。また冷媒の流量を増加させることでさらなる冷却性能の向上が見込めることも確認した。

ABSTRACT

A motor cooling structure for electrification vehicle drive motors capable of absorbing the increases in heat generation from miniaturization with high current has been developed. The conventional cooling method involves dripping refrigerant onto exposed parts of the stator coil, relying on thermal conduction to indirectly cool the coil inside the stator slots where the refrigerant cannot reach. In this study, we have established a technology that directly cools the entire coil by hermetically sealing the stator to immerse the entire coil in automatic transmission fluid. Using a prototype motor, the technology has been demonstrated to have more than twice the cooling performance of the conventional cooling method. It was also confirmed that further enhancements in cooling performance can be expected by increasing refrigerant flow rate.

1. まえがき

近年、車両の走行中におけるCO₂排出削減への要求からBattery Electric Vehicle (BEV)やFuel Cell Vehicle (FCV)といった電動車両の普及が急速に拡大している。電動車両に使用される駆動用モータには、レアメタルや銅といった材料供給リスクが懸念される金属材料⁽¹⁾が多く使用されているため、従来からの基本性能要求(高出力、高トルク、高効率)に加え、材料の使用量低減につながる小型化も重要な要求性能になると著者らは考える。

モータの小型化をおこなう場合には、大きく分けて二つの手法が考えられる。一つは、モータの高回転化である⁽²⁾。モータ出力はトルクと回転速度の積であり、トルクと

体格は比例するため高回転化することでモータ出力を維持したまま、モータを小型化できる⁽²⁾。この場合、減速機やロータの回転体の高強度化が必要となり、一般的に希少金属を多く含む高強度材料を使用しなければならない⁽³⁾。また、減速機が高減速比となることで、フリクションロスが増加しドライブユニット全体の効率が低下する⁽⁴⁾。もう一つの手法は、モータに高電流を印加することでトルク密度および出力密度を向上させる手法である。この場合、単位面積当たりの発熱量が増加するため、従来の冷却手法⁽⁵⁾、⁽⁶⁾よりも高い冷却性能が求められる。

本研究では、希少金属などの材料供給リスクを考慮し、高電流密度化による小型化を実現するために、従来に対して2倍以上の冷却性能を有する密閉冷却構造を提案した。

¹ 先進パワーユニット・エネルギー研究所

E-mail: shinji_01_kato@jp.honda

なお著者らは密閉冷却構造を用いることでモータのトルク密度および出力密度を従来に比べ約2倍に向上させることに成功している⁽⁷⁾。

一般に駆動用モータの冷却手法は、ハウジング内に水路を形成し冷却液である Long Life Coolant (LLC) を流す水冷方式と、Automatic Transmission Fluid (ATF) を冷媒として、コイルの露出している部分に滴下して直接冷却する油冷方式に分けることができる⁽⁵⁾。水冷方式は、ステータコアを介した熱伝導で冷却されるためスロット内部の巻線は高い冷却性能を有しているが、ステータコアを介さないコイルエンド部の冷却効果が弱まる⁽⁵⁾。一方、油冷方式は、コイルエンド部を直接冷却できるが、冷媒の届かないスロット内部の巻線は導体自身の熱伝導での冷却となる⁽⁵⁾。どちらの方式も熱伝導に依存した冷却部位が存在し、モータを小型化する時に課題となる単位面積当たりの発熱量増加への対応は容易でないと考えられる。そこで、本研究では油冷方式をベースに、スロット内部を含めたコイル全体を直接冷却する手法を開発した。本稿では最初に冷却適用技術の概要について紹介する。次にテストピースでの冷却効果のコンセプト実証、そして密閉冷却構造の課題と対応についてそれぞれ説明する。最後に試作モータによる実測試験にて効果確認をした結果を示す。

2. 冷却適用技術

2.1. 目標冷却性能

本研究では冷却性能を従来よりも2倍に向上させることを目標とした。2倍の冷却性能向上がモータの性能に与える影響を示すために推算を以下でおこなう。

まず電動車両用としてシングルモータでも十分な駆動力を確保できるように、減速機のレシオ成立範囲とフリクションのバランスを考慮して最大トルク 280 Nm, 最大出力 150 kW, 最高回転数 15,000 rpm のモータを開発すると仮定する。従来比2倍の冷却性能が実現できれば電流密度も2倍以上となり結果としてトルク密度、出力密度が従来の1.7倍以上となる。これにより従来のモータに対して体積にして40%の小型化が可能となる。

2.2. 冷却手法のコンセプト

冷却性能の向上には伝熱の式(1)より発熱体であるコイルと冷媒との間の熱抵抗を小さくすることが重要である。式(2)より熱抵抗は伝熱面積と熱伝達率で決まる。熱伝達率は伝熱が対流によるものか伝導によるものかを示す無次元量であるヌセルト数をもちいて式(3)のようにあらわすことができる。ヌセルト数は慣性力と粘性力の比を示すレイノルズ数と正の相関があり、式(4)よりレイノルズ数は流体の流速に比例する。つまり流速を増やすことで熱伝達率を向上させることができる。以上のことから伝熱面積

の増加と流速の増加による熱伝達率の向上を狙った構造を提案する。

$$Q = \frac{(T_{\text{coil}} - T_{\text{ATF}})}{R} \quad (1)$$

$$R = \frac{1}{Ah} \quad (2)$$

$$Nu = \frac{hL}{k} \quad (3)$$

$$Re = \frac{UL}{\nu} \quad (4)$$

Q : Amount of heat removed (W)

R : Thermal resistance (K/W)

T_{coil} : Temperature of coil (K)

T_{ATF} : Temperature of ATF (K)

A : Heat transfer area (m^2)

h : Heat transfer coefficient ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)

Nu : Nusselt number

L : Characteristic length (m)

k : Thermal conductivity (W/mK)

Re : Reynolds number

U : Flow velocity (m/s)

ν : Dynamic viscosity (m^2/s)

Fig. 1 に従来の冷却手法⁽⁶⁾について、Fig. 2 に今回開発した冷却手法について、概要と断面図をそれぞれ示す。従

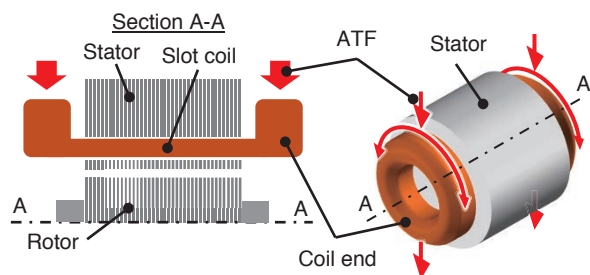


Fig. 1 Conventional motor cooling structure

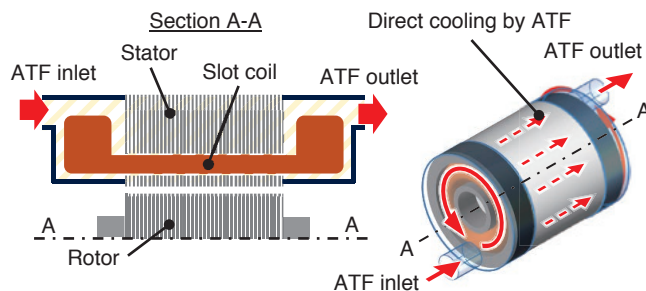


Fig. 2 Proposed cooling method

来の冷却手法ではコイルエンド部の直上から冷媒である ATF を滴下しコイルを冷却している。従来手法ではスロット内部のコイルは ATF の熱伝達ではなく、コイルエンド部からの熱伝導を利用した熱移動となり、またコイルエンド部においても ATF がかかる表面部分に伝熱面積が限定されるため、コイル全体としての抜熱量も限定される。

本研究では Fig. 2 に示すようにコイルエンド部のコイルだけではなくスロット内部のコイルも含めてコイル全体を油没させる密閉冷却構造としたことで従来比 2.2 倍の伝熱面積を確保した。さらに、片側のコイルエンド部から ATF を圧送させスロット内部を通り回転軸方向において反対側のコイルエンド部より ATF を排出することでコイルと接触する ATF の流速を増やし熱伝達率を向上させた。

3. 冷却効果のコンセプト実証

3.1. 熱流体解析

前述の冷却コンセプトの一部を模擬した熱流体解析の結果を Fig. 3 に示す。熱流体解析として CFD シミュレーションをおこなった。解析モデルは、モータステータにおける一つのスロット部のみを再現し片方のコイルエンド部から

ATF を流入させ、スロット内部を通り反対側のコイルエンド部から ATF を排出するモデルとした。また、解析条件として境界条件は Inlet 側を流速一定、Outlet 側を大気解放とし、ステータヨークの外表面とカバー外表面は熱流束ゼロとしている。コイルからの放熱を模擬するために、コイルの壁面には従来の冷却方式で使うモータの 2 倍の発熱量に相当する熱流束を与えた。

CFD 結果を見ると最高温度が巻線の耐熱温度以下であることが確認できる。また、巻線の最高温度部位は従来のようにスロット内部の巻線ではなく ATF の排出側コイルエンド部の巻線になっている。密閉冷却構造によりスロット内部のコイルを含むコイル全体を ATF で直接冷却可能とすることで、巻線の最高温度部位はステータから露出しているコイルエンド部となることを確認した。

3.2. テストピースによる確認試験

前述の CFD モデルをベースにステータの 1 スロット部を模擬したテストピースを製作した。Fig. 4 にテストピースを示す。テストピースはコイルの通電加熱のための電力供給端子を備えている。コイル端に冷媒を滴下する従来の冷却構造と、本研究で考案した密閉冷却構造をそれぞれ模擬できる構成とされている。従来の冷却構造はコイル両端のカバーから冷媒を滴下することで模擬し、カバーを一部開放することで冷媒を排出できるようにした。密閉冷却構造は Inlet 側から冷媒を供給し、スロット内コイルの隙間を通して Outlet 側から排出することで模擬した。スロット内の構造について従来の冷却構造はコイル、絶縁紙、ワニスで構成されている。密閉冷却構造はスロット内にはワニスを使用せず、コイル、絶縁紙の構成としている。

試験方法はコイルを通電加熱したときの巻線温度を計測し、従来の冷却構造と密閉冷却構造で比較した。試験条件としては冷媒である ATF の温度と流量、コイルの投入電力を両冷却構造で合わせた。

Fig. 5 に各冷却構造におけるコイル発熱時の電流密度と巻線温度の関係を示す。巻線温度はコイル長手方向に等間隔で 5 点熱電対を用いて計測し、そのうちの最高温度をプロットしている。密閉冷却構造は従来冷却構造に比べ巻線温度が低く、モータ体積を 40% 小型化した場合を考慮した投入電力である従来比 2 倍の電流密度においても最高温度が巻線の耐熱温度以下であることが確認できる。

従来の冷却構造は ATF で直接冷却できるがコイルの露出している部分のみであるため、コイルエンドは直接冷却されるがスロット中央部のコイルは相対的に冷えにくい。密閉冷却構造はスロット内を含めたコイル全体を ATF で直接冷却できるため、伝熱面積を大きくすることができ、冷却効果が大きくなったと考えられる。テストピースでの試験にてコンセプト通りの密閉冷却構造を再現することができた。

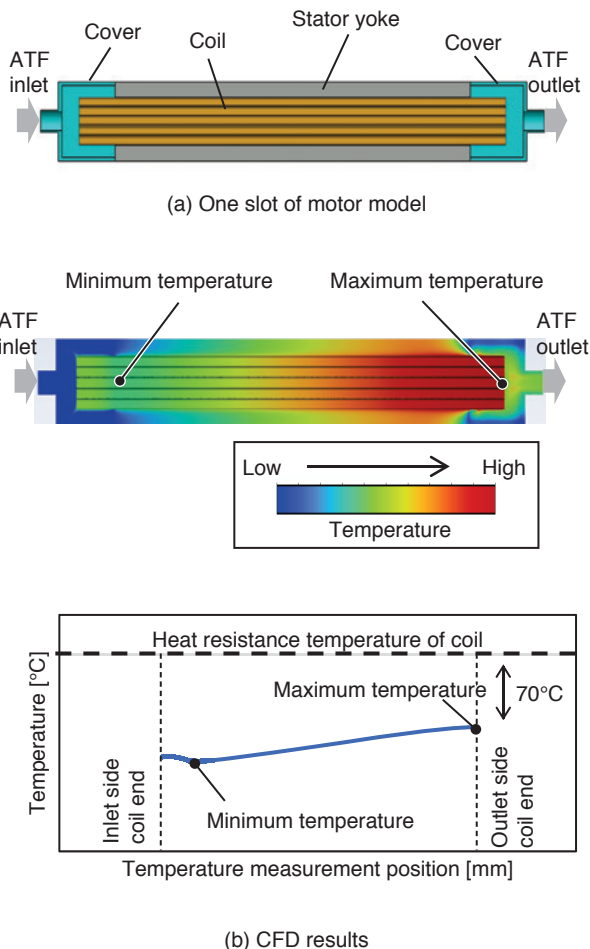
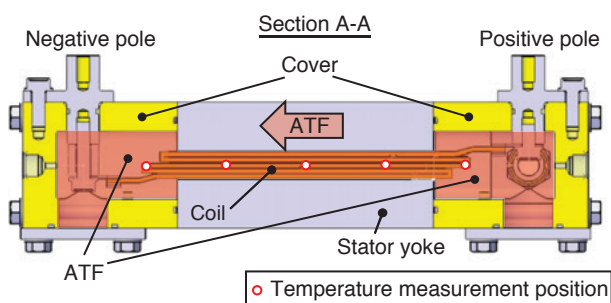
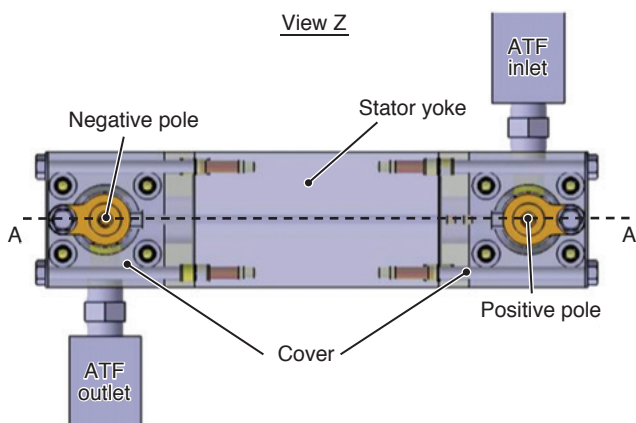
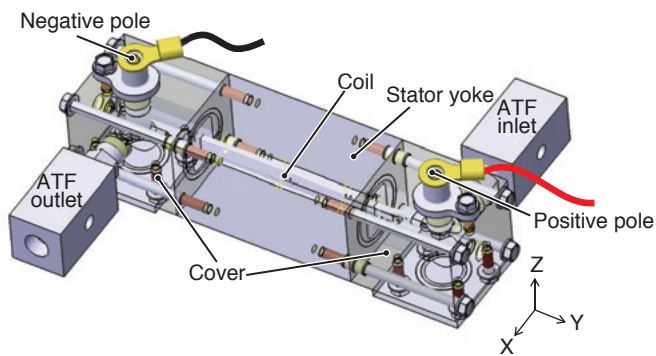
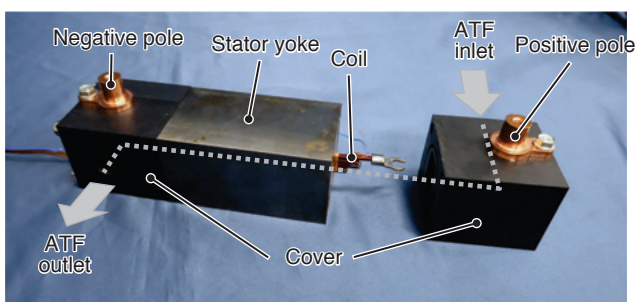


Fig. 3 Fluid analysis



(a) CAD model



(b) Actual model

Fig. 4 Test piece

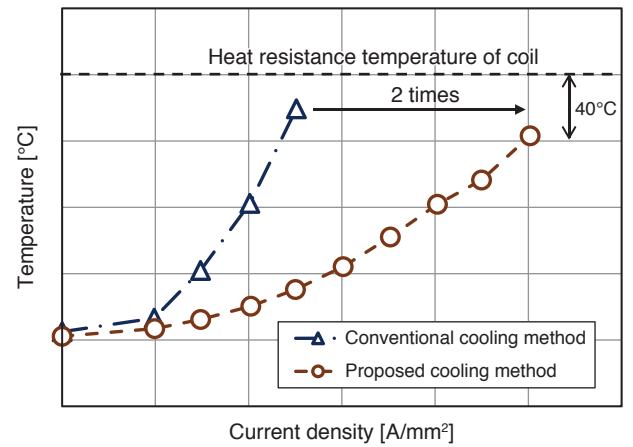


Fig. 5 Relation between current density and coil temperature

4. 密閉冷却構造の課題と対応

密閉冷却構造ではコイル全体を ATF に油没させ、ATF を流して循環させるため、実際のモータに適用する上では絶縁性を確保した上で次の三つの技術課題を解決する必要がある。

- (1) コイルとステータヨークをスロット内で固定する
- (2) スロット内に油路を形成する
- (3) コイルエンドを油密にするためカバーでシールする

三つの技術課題のうち、まず技術課題(1)、(2)について図を使って詳細を説明する。Fig. 6 に従来のモータのスロット断面図を示す。スロット内部のコイルを絶縁紙で巻くことでコイルとステータヨーク間の絶縁を確保している。この構造に対して本冷却手法を適用すると絶縁紙とコイルの間に ATF を流す必要があるため、絶縁紙の重なり

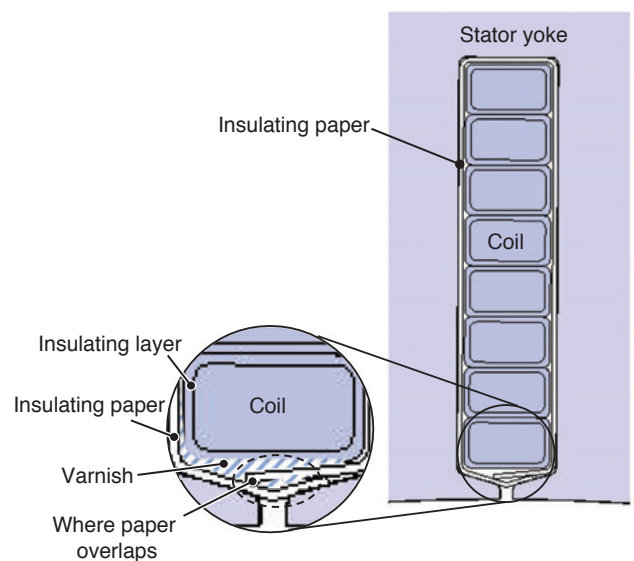


Fig. 6 Cross section of slot for conventional motor

部から ATF の漏れが発生する。また、従来のモータではスロット内部のコイルと絶縁紙とステータヨークの隙間にワニスを含浸させることで各部を固定しているため、本冷却手法に必要な ATF の流路となる空間がふさがってしまう。

課題 (1), (2) を解決するために考案した構造の概要を Fig. 7 に示す。新規に開発した絶縁紙の表面に発泡接着層を付与したシートを適用することで絶縁紙重なり部のシール性向上とワニスを使用せずにコイル固定力の確保を図った。またコイル形状をステータヨークに面している側は接触面積を広くとれるように、また、コイルに面している側は空間を大きくとれるような角部の円弧形状を持つコイルを採用することでスロット内のコイル固定力と油路を確保している。

Fig. 8 に設定したスロット内部の詳細構造を示す。角部が複数円弧から形成される特殊な断面形状を持つコイルに対して加熱によって発泡接着する絶縁紙で囲う構成となっている。コイルの角部形状は、導体間に油路とする空間が

確保されるよう、コイル近傍は円弧の複列形状とし、また絶縁紙との接着面積を広くとるよう絶縁紙と接する側の直線部をコイルと接する部分より長く設定している。

最後に技術課題 (3) について説明する。従来構造では冷媒をコイル端に滴下していたため、コイルエンド部のシールはそもそも必要無かったが、本稿で示す密閉冷却構造を形成するためには、コイルエンド部からの冷媒の漏れを防ぐ必要がある。Fig. 9 に本モータのコイルエンド部のシール構造を示す。Fig. 8 に示すステータ内径側に設けられている多数の歯のような形状をしているティース部のシールのため、ステータ端面に樹脂製のカフサポートを配置している。カフサポートと絶縁紙間は絶縁紙の発泡接着層で隙間を埋めてシール性を確保している。コイルカバーとカフサポート間には O リングを適用することでシール構造を形成した。

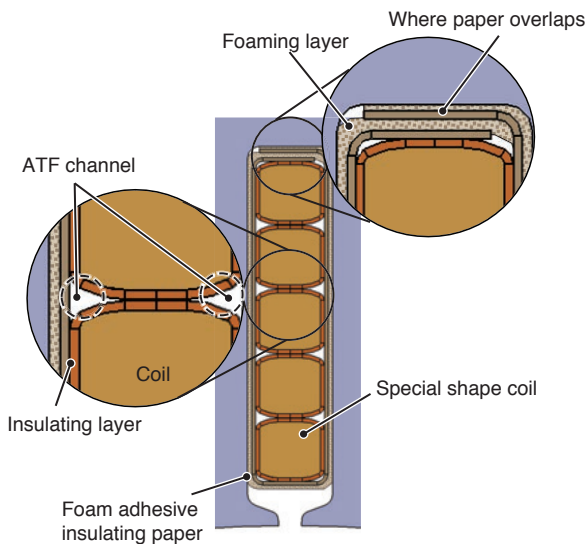


Fig. 7 Cross section of slot for proposed motor

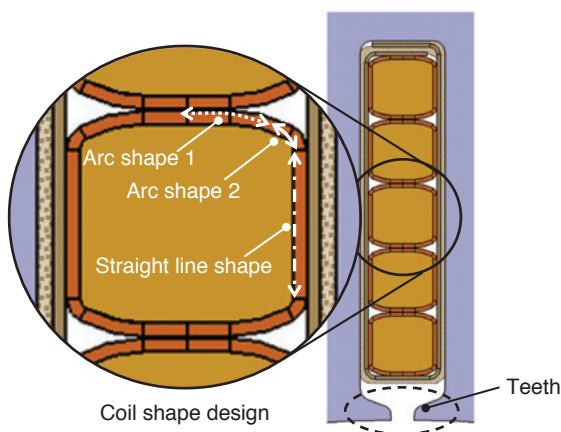


Fig. 8 Slot configuration

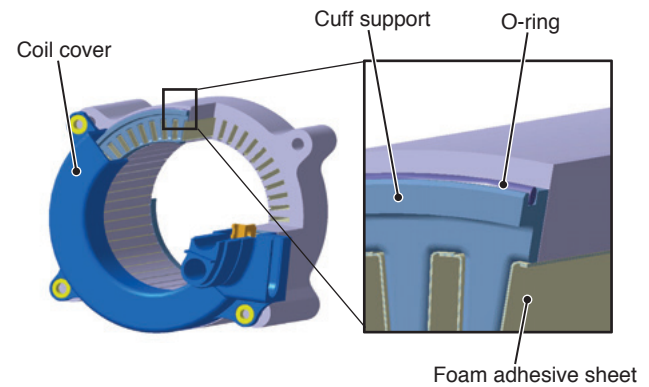


Fig. 9 Sealing structure (coil is not shown)

5. 密閉冷却構造の実証実験

5.1. 試作機の概要

Fig. 10 に試作機の外観を示す。密閉冷却構造を適用した試作モータを製作し、本冷却構造における圧力損失特性、冷却性能特性の確認をおこなった。

5.2. 基本諸元

Table 1 に本モータの基本諸元を示す。従来の 40% のサイズで同等トルクとするために電流密度は 2 倍となっている。巻線の占有面積を減少させることで、小径でありながら適切なターン数設定ができる仕様とした。

Fig. 11 に本モータに適用した磁気回路断面を示す。本モータはステータ外径が従来よりも小径である。そのため、磁石磁束に頼ったマグネットトルクが制限される。本モータでは、磁石量を確保しながらリラクタンストルクが最大となる多層円弧磁石形状を採用した。

Table 1 Motor specifications

Motor type	IPMSM
System voltage	350 V
Number of poles	8
Number of turns / slot	5
Current density	Twice conventional density
Coil type	Segment conductor

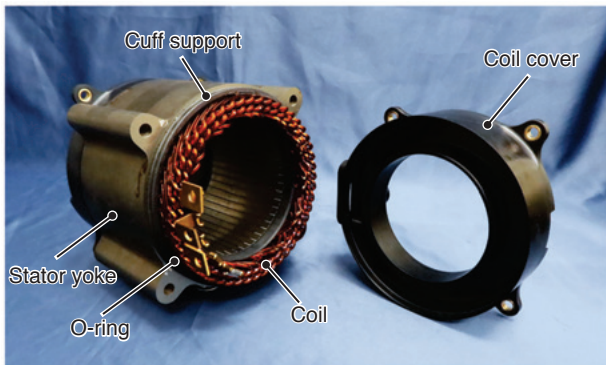


Fig. 10 Prototype motor

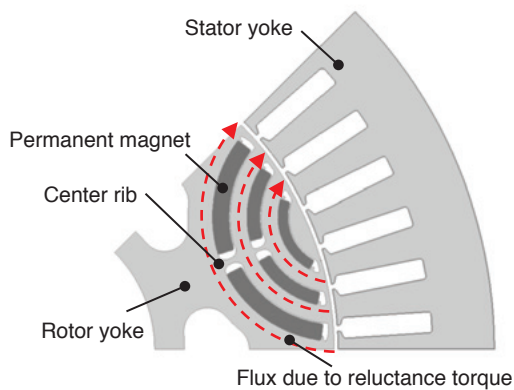


Fig. 11 Magnetic circuit model

5.3. 圧力損失特性

本冷却構造の課題として密閉構造であるため、ATFを圧送するときの圧力損失がある。スロット内部の微細な空間にATFを流すため、電動オイルポンプで圧送する必要がある。そのときの圧力損失が大きいと、大流量に対応した電動オイルポンプが必要となり、ドライブユニット全体の効率に影響してしまう。

本冷却構造における冷却油路の成立性を確認するために圧力損失の測定をおこなった。Fig. 12に流量に対する圧力損失の関係と電動オイルポンプの定格出力ラインを示す。なお、電動オイルポンプ仕様は、出力40 W、容積効率50%であり、車載用として一般的なものである⁽⁸⁾。各目標流量における圧力損失が電動オイルポンプの出力ライン以下であることから、本冷却構造においては、一般的な車載用の電動オイルポンプで圧送可能であることを確認した。

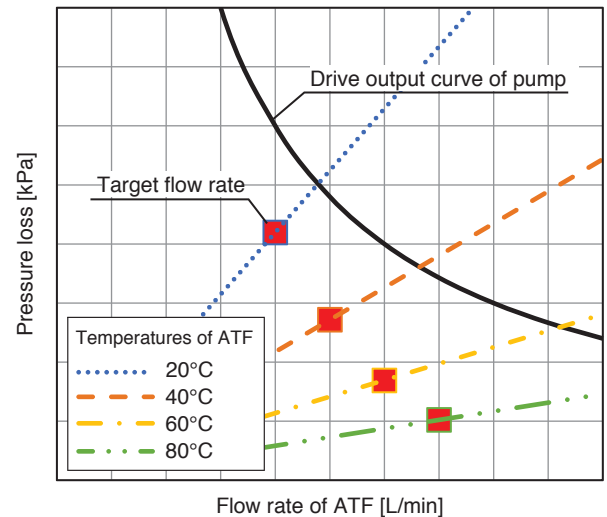


Fig. 12 Relation between flow rate and pressure loss

5.4. 冷却性能特性

試作モータと従来モータの冷却性能を比較する。従来の冷却構造と密閉冷却構造ではモータの構造含め異なる点が多いため、冷却性能を比較できるような評価方法とした。試験条件として冷媒となるATFの温度と流量は同じ条件とし、コイル温度が管理温度で平衡状態となるまでに投入できる電力のうちの銅損を冷却量として評価した。つまり銅損が大きい程、高い冷却性能を有するということになる。Fig. 13に実際にコイル温度と銅損を計測したときの時系列データの一例を示す。

Fig. 14に冷媒流量に対する冷却性能の関係を従来と比較したグラフを示す。本冷却手法により、従来手法に対して2倍以上の冷却性能となることを確認した。また、冷媒流量に対する冷却量の増加傾向が本冷却手法と従来手法で異なることがわかった。従来手法は冷媒流量に対する冷却量が飽和傾向である。これは冷媒流量を増加させてもコイルエンド滴下後に反射して飛散してしまい、冷却に寄与し

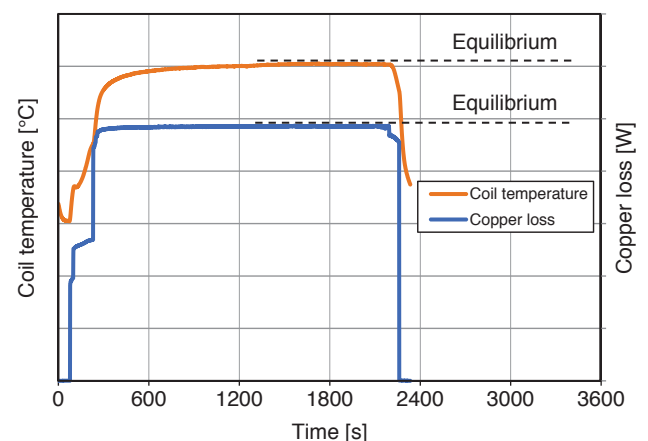


Fig. 13 Time series measurement data

ないような冷媒が増えてしまうためと考えられる。一方、本冷却構造は冷媒流量に対する冷却量が線形的に上昇する傾向である。これは油没構造であるため、冷媒流量の増加が流速の増加となり熱伝達率の増加につながるためと考えられる。本試験では、最大で冷却性能が4倍になることを確認した。

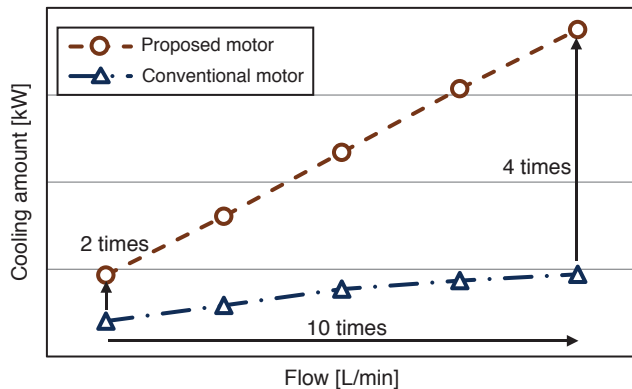


Fig. 14 Measurement of cooling capacity

6. まとめ

高電流密度によるモータ小型化を実現させるため、密閉冷却構造を開発した。また、これらを適用したテストピース、試作モータを製作し、冷却性能を実証した。

- (1) 巻線全体を油没し循環させることでコイルを直接冷却し、伝熱面積の拡大と熱伝達率の増加を実現することで、従来比2倍以上の冷却性能を達成した。
- (2) 密閉冷却構造は冷媒流量の感度が高く、冷媒流量の増加により更なる冷却性能の向上ができる。

参考文献

- (1) https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/shigen_nenryo/kogyo/pdf/007_03_00.pdf, (2021)
- (2) https://www.aichi-steel.co.jp/news_item/20210107_news.pdf, (2021)
- (3) 田中一郎, 屋鋪裕義, 岩本繁夫, 高丸広毅, 中山大成: 省資源型高強度電磁鋼板 SXRC の開発, まてりあ, 第49巻, 第1号, p. 29-31, (2010)
- (4) 山本建: 高回転におけるトラクションドライブと歯車の伝達性能測定 (50000rpm での性能比較), 日本機械学会論文集, Vol. 87, No. 903, 論文 No. 21-00209, p. 1-13, (2021)
- (5) 杉本慎治, 郡大祐: 水冷・油冷を併用したモータの冷却効果および損失評価の検討, 電気学会論文誌D (産業

応用部門誌), Vol. 138, No. 5, p. 378-383, (2018)

- (6) 黒木次郎, 大塚浩: SPORT HYBRID i-MMD システム用のモータと PCU の開発, Honda R&D Technical Review, Vol. 25, No. 2, p. 41-47
- (7) 上田拓, 井上順二, 加藤慎二: 密閉冷却構造を用いた小型高性能モータの開発, 自動車技術会 2022 年秋季大会学術講演会講演予稿集, No. 93-22, No. 20226043, (2022)
- (8) Liu, Y., Zhou, Y., Qu, D., Zhang, F., Bao, X.: Electric oil pump design of hybrid continuously variable transmission, IET Electric Power Applications, Vol. 13, Issue 8, p. 1089-1096, (2019)

■ 著 者 ■



加藤 慎二



上田 拓



福井健太郎



西井文哉