

特集 ハイブリッド電気自動車 (HEV) の ATF を用いた モータ冷却構造の熱解析*

Heat Analysis of the Hybrid Electric Vehicle (HEV) Motor Cooling Structure Using ATF

鬼丸 貞久

Sadahisa ONIMARU

市岡 英二

Eiji ICHIOKA

松井 啓仁

Hirohito MATUI

水谷 竜彦

Tatuhiko MIZUTANI

田口 知成

Tomonari TAGUCHI

大高 健二

Kenji ODAKA

Recent hybrid electric vehicles (HEV) are provided with a motor cooling structure that uses automatic transmission fluid (ATF) for lubrication in the motor to improve cooling performance, as the authors of this paper previously proposed. We closely analyzed the heat flow in a motor that used ATF for cooling, by measuring the temperature at many points in the motor and evaluating a section of the motor under operating conditions, and successfully established that ATF improves motor cooling performance.

Key words: Hybrid vehicle, Electric motor, Cooling, ATF, Coil end, Stator, Heart resistance

1. 緒言

近年, CO₂ 排出量低減, 地球温暖化防止の観点から自動車に対する燃費の向上が求められている。それに対する技術として内燃機関と電気モータを組み合わせたハイブリッドシステムが注目されており, 1997年にハイブリッド電気自動車 (Hybrid Electric Vehicle 以下 HEV) が世界で始めて量産化された。一方 HEV は, 低燃費や環境性能だけでなく自動車の魅力のひとつである「走る楽しさ」の一層の向上が求められ, それに伴って車両駆動用モータの高出力化が必要となっている。

モータの高出力化のためにはモータ本体の電機設計やモータ制御・電気システムの改良とともに, 出力向上に伴う発熱量増加に対応するための冷却性能の向上が大きな課題となる。そこで冷却性能向上方法として, 筆者らは動力伝達部と軸受を潤滑する ATF (Automatic Transmission Fluid) をモータ冷却に利用することで飛躍的に冷却性能を向上する方法を考案した。この冷却性能向上法を用いることでモータを大幅に高出力化したハイブリッドシステムが新たに開発され, SUV (Sports Utility Vehicle) などの高性能 HEV に用いられている。

本研究では, ベンチ評価によって求めたモータ内の温度計測とモータ内の各部熱特性を模擬する部分モデル評価結果からモータ内の熱流れを解析することで, ATF を用いた冷却性能向上法の効果を明らかにしたので, その結果について報告する。

2. モータ冷却方法

2.1 冷却システム構成

本研究において対象とする HEV の冷却系の概要を Fig. 1 に示す。HEV 機器 (モータ, 発電機, インバータ) の冷却は, エンジン冷却系とは別に専用ラジエータを備えた水冷却系で行われている。冷却水にはエンジン冷却水と同様 LLC (Long Life Coolant) を用いる。専用ラジエータで冷却された冷却水は電動ポンプによってインバータ, 発電機, モータの水冷却ジャケットに流れ専用ラジエータに戻る。専用ラジエータはエンジン用ラジエータと共に車両前部吸気口に置かれている。

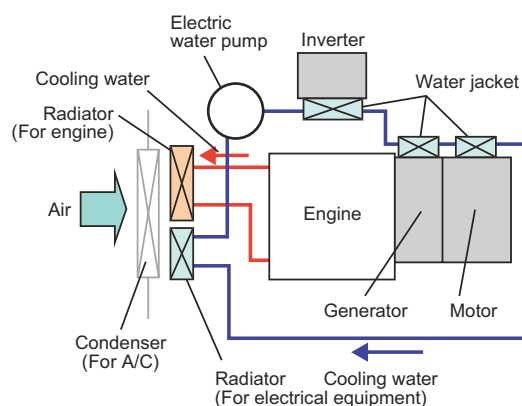


Fig. 1 Cooling system of hybrid electric vehicle

* (社)自動車技術会の了解を得て, “Review of Automotive Engineering Vol. 28 No.2 April 2007” より, 和訳・一部加筆して転載

2.2 モータ冷却構造

Fig. 2 に ATF を利用したモータの冷却構造を示す¹⁾²⁾モータはロータ・ステータ・ケースで構成され、巻き線には分布巻きが用いられている。モータのケースは動力伝達部（動力分配機構、モータリダクション機構、ディファレンシャルギヤ等からなる）のケースと一体に構成されている。ケースの一部には水冷ジャケットが設けられ前述の専用冷却系から送られる LLC で冷却される。モータと動力伝達部の中には潤滑用の ATF が封入されている。モータ下部に溜まった ATF はモータ端面に設けられたオイルポンプによって汲み上げられ、モータ駆動軸内を通して動力伝達部へ送られる。この ATF の一部がモータ軸受に供給され潤滑に用いられる。動力伝達部内に溜まった ATF はディファレンシャルギヤのリングギヤで掻き揚げられ動力伝達部ケース上部に設けたキャッチタンクに送られる。キャッチタンクに送られた ATF は動力伝達部の潤滑に用いられると共に、その一部がモータケースに設けた二つの連通口を通してステータのコイルエンド部に供給される。同時に ATF の一部がステータとケース間の隙間に浸透する。このとき、次の二つの働きによってモータの発熱が効率的にケースに伝わり冷却性能が向上する。

- (a) ステータ～ケース間の隙間に ATF が浸透し空気と入れ替わることで、その間の熱抵抗が低減しステータの発熱が効率的にケースに伝わる。
- (b) ATF がコイルエンドにかかることでコイルエンドの熱が ATF に移り、更に ATF がケースに接触することで熱がケースに伝わる。

3. 解析の進め方

モータ内の熱流れ解析モデルを作成することで (a) と (b) の二つの働きの効果を明確化する。作成する熱解析モデルの全体構成を Fig. 3 に示す。モータのステータ、ケースを分割して各部を接点（集中定数）で表し、接点間を熱抵抗で結んでモデル化したものである。モータの発熱部位はコイルエンドとステータ内のコイル（銅損で発熱）とステータの鉄心（鉄損で発熱）に分けられる。ここでは、コイルエンドを周方向に 8 分割、ステータ内のコイルと鉄心をそれぞれ軸方向に 3 分割、周方向に 8 分割、ケースは外周部を軸方向に 5 分割、周方向に 8 分割、ケース端面を周方向に 8 分割している。水冷ジャケットがある場所に相当する接点は LLC へ放熱し、それ以外は空気へ放熱するとした。また、コイルエンド部に ATF を供給することによる効果を表すためコイルエンド端部から ATF へ放熱する接点を設けた。なお、一般に分布巻きモータはステータに比べロータの発熱量は小さいため、今回はステータとケースのみをモデル化しロータは省略している。

各接点間の熱抵抗はモータ内部の温度分布計測結果

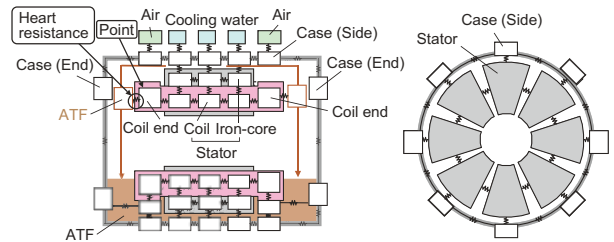


Fig. 3 Heat analysis model

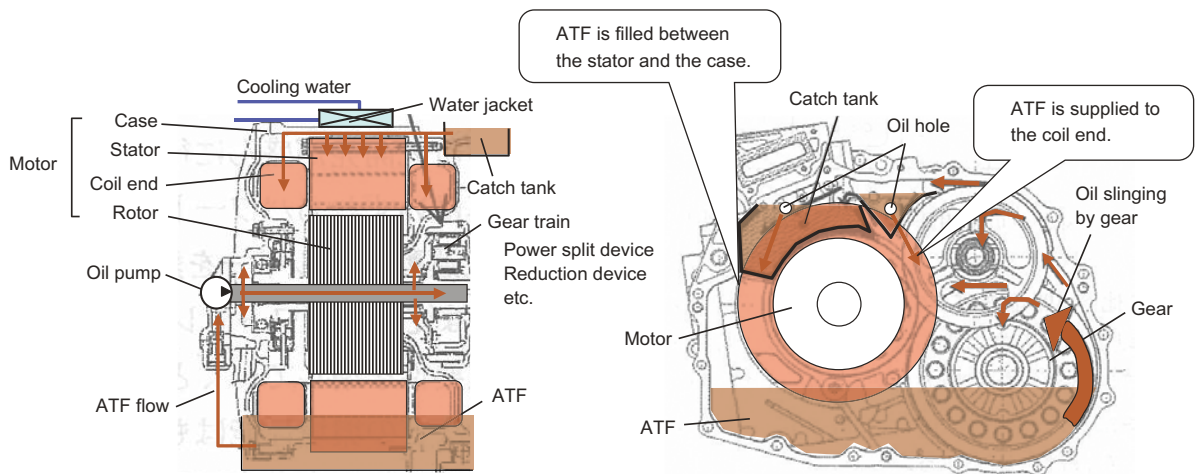


Fig. 2 Motor cooling system of hybrid electric vehicle to use ATF

と、磁場解析等で求めたモータ内各部の発熱量から算出する。コイルエンドや鉄心のように部材間の接触熱抵抗の影響で方向によって熱伝導率に大きな差が生じる部分は、温度計測結果からだけでは正確な熱抵抗を求めることが困難なので、別途部分サンプルを用いた評価を行い方向ごとの熱伝導率を求める。なお、発熱量と温度分布から熱抵抗を算出する方法は従来の多くの文献³⁾⁴⁾に記載されている。ATF冷却の効果に関しては、ステータ～ケース間隙間へのATF充填 (a) とコイルエンドへのATF供給 (b) の効果をそれぞれ模擬する評価を行い、ATF冷却を行った場合の熱抵抗を算出し熱解析モデルへ織り込む。

以上のように作成した熱抵抗モデルを用いてATFを用いた冷却による効果を明らかにする。

4. 評価と考察

4.1 モータ内多点温度計測

モータ内部の温度計測は、内部に多数の熱電対を埋め込んだ評価用モータを用いて行う。評価用モータ (Fig. 4) には実車搭載時と同様にATFが封入されており、ステータ下部はモータ内に溜まったATFに漬かった状態となっている。水冷ジャケットはケース外周の一部に設けられており、それ以外の面からは空気に放熱する。評価はATFを利用した冷却の効果を分離するためATFによる冷却を止めた状態で行う。

周方向の温度分布評価結果を Fig. 5 に示す。周方向の温度分布を見ると水冷ジャケット設置位置 (計測点 A, B) の温度が低く、ステータ温度は水冷ジャケット位置の影響を受けることが分かる。また、計測点 E は ATF に漬かっているためコイルエンド表面の温度が低い。

半径方向の温度分布評価結果 (Fig. 6) を見てみると、特にステータ鉄心の外周とケース内壁間の温度差が大きく、この部分が発熱部からケースへの伝熱を阻害していることが分かる。評価に用いたモータはステータ鉄心の端部でケースに接合されており、鉄心外周とケース内壁には隙間がある。この隙間が伝熱を阻害しているものと考えられる。隙間が空気層となっている部分 (G 断面) に比べ ATF で満たされている部分 (E 断面) は温度差が少なく ATF を隙間に充填することによる熱抵抗低減効果が現れている。

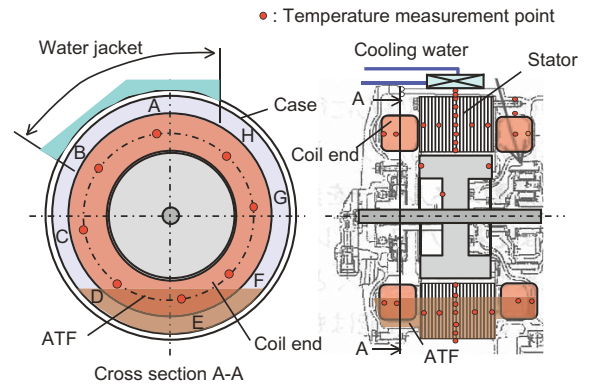


Fig. 4 Motor for evaluation to measure temperature distribution

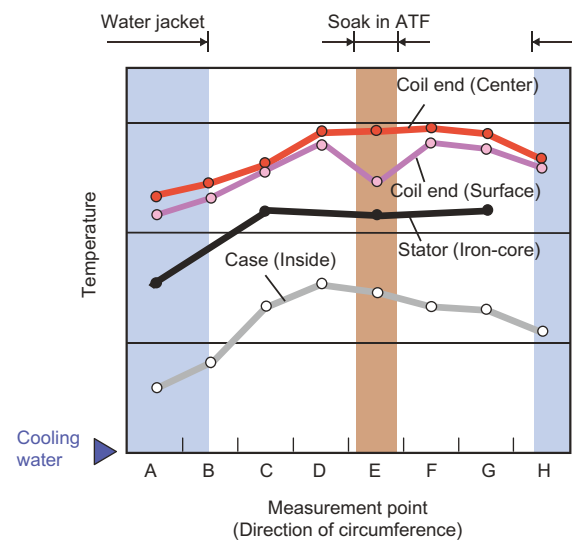


Fig. 5 The distribution of the temperature (Circumferential direction)

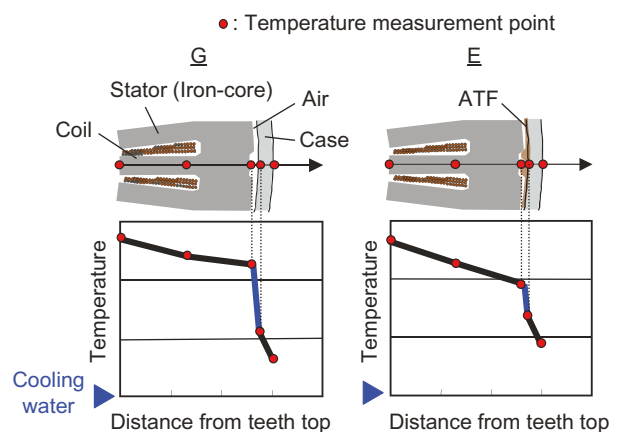


Fig. 6 The distribution of the temperature (Radial direction)

4.2 部分サンプルによる熱伝導率評価

コイルエンドはステータ鉄心部のスロット内に挿入した銅線を別のスリットに挿入するために折り返した部分である。この部分は銅損によって発熱し、かつ放熱部位であるケースまでの伝熱経路が長いこと温度が上がりやすい。そのためコイルエンドの温度によってモータの最大出力が制限される場合が多い。軸方向の伝熱は銅線に沿って行われるため熱抵抗が小さくなるが、周方向へはU, V, W各相の銅線の接触部で電気を絶縁するエナメル皮膜を通して伝熱する必要があるため熱抵抗が大きくなる。そのため軸方向と周方向で熱伝導率に大きな異方性がある。

そこで、コイルエンド部分を切り出した部分サンプルを用いてそれらを分離して求める評価を行った。評価方法を Fig. 7 に示す。周方向の熱伝導率計測はコイルエンドの1/4を切り取ったサンプルを用い片側の端部にヒータ、反対側に冷却器を設けることで周方向に沿った熱流れをつくり、各測定点の温度差と伝熱距離およびヒータの発熱量から求める。軸方向はコイルエンド全周を用いヒータと冷却器で挟んで同様に評価を行う。評価結果の定常状態になったときの温度差から以下の式で各方向への熱伝導率を求める。

$$\lambda = (L \cdot Q) / (A \cdot \Delta T)$$

λ : 熱伝導率 (W/m・K)

L : 伝熱距離 (m)

Q : 熱量 (W)

A : 断面積 (m²)

ΔT : 計測点間の温度差 (K)

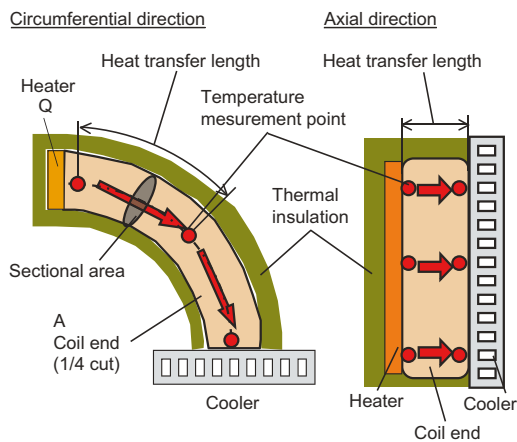


Fig. 7 Evaluation method

ステータ鉄心についても、電磁鋼板を積層して構成しているため、鋼板間の接触部を通じて熱が伝わる軸方向と鋼板内を熱が伝わる周方向で熱伝導率に異方性がある。そこで、コイルエンドの場合と同様に評価し軸方向と周方向の熱伝導率を求める。

以上の評価結果から、コイルエンドとステータ鉄心の熱伝導率には次のような異方性があることが確かめられた (数値は熱伝導率の比を表す)。

コイルエンド 周方向：軸方向 ≒ 1：10
鉄心 径方向：軸方向 ≒ 3：1

4.3 ステータ～ケース間への ATF 充填効果

Fig. 4 で示した評価用モータを用い、ステータ～ケース間の隙間に ATF を流すことによる効果を評価した。Fig. 8 に供給する ATF の流量と G 断面におけるケースとステータ鉄心の温度を示す。ATF を流すことにより鉄心～ケース間の熱抵抗が低減する。このときの隙間の様子について別途透明ケースを用いたオイル流れ可視化モータ (Fig. 9 図中オイル流れの太い矢印がキャッチタンクからコイルエンド表面へのオイル流れ、細い矢印が鉄心～ケース隙間へオイルを充填する流れを示す) を用いて観察し、隙間への ATF 充填状態と流量の関係を求めた。その結果、鉄心～ケース間隙間に ATF で充填できる流量を供給すれば温度低減効果が得られ、それ以上流量を増しても効果に差が無いことが分かった。このことから冷却性能向上効果は

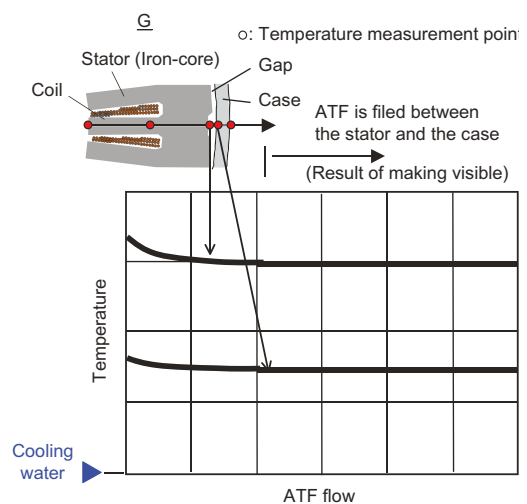


Fig. 8 The effect by ATF filling between the stator and the case

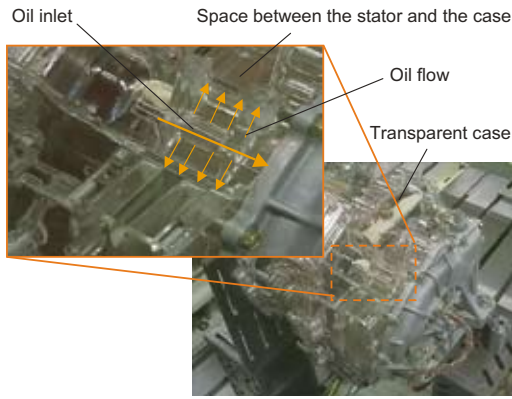


Fig. 9 Motor for evaluation to see ATF flow

ATF 流れが熱を運び去るのではなく、空気層が ATF に入れ替わることによって隙間部分の熱伝導率が向上するためであることが分かる。

4.4 コイルエンドへの ATF 供給による効果

コイルエンドへ ATF を供給することによる効果を明確化するため専用のベンチを製作して評価を行った。ベンチ構成を Fig. 10 に示す。ステータをステーに固定し通電することで発熱させる。ATF 供給は 2ヶ所から行い、その角度を振って評価を行う。

コイルエンド内の温度計測点 8 点の平均温度 T_{cm} と ATF の入口、出口の平均温度 T_{om} から次式でコイルエンド～ATF 間の熱抵抗を求める。

$$R = (T_{cm} - T_{om}) / Q$$

R : 熱抵抗 (K/W)

T_{cm} : コイルエンド平均温度 (K)

T_{om} : ATF の平均温度 (K)

Q : 発熱量 (W)

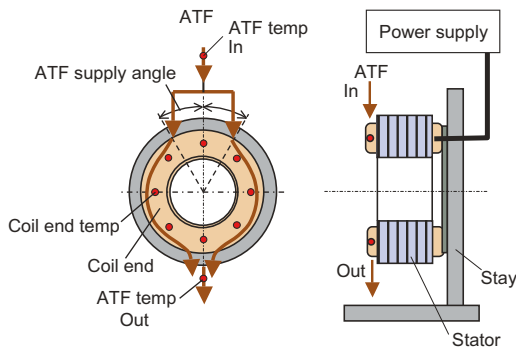


Fig. 10 The bench used to evaluate the ATF supply effect

熱抵抗の評価結果を Fig. 11 に示す。ATF の供給角度には熱抵抗が最も小さくなる最適角度があることが分かる。この理由について説明する。供給角度による ATF の流れ方の違いを観察し模式的に表したものを Fig. 12 に示す。供給角度が少なすぎると中央部に供給したオイルが左右にうまく回らず ATF が覆わない領域が左右にできる。逆に角度を広げすぎると中央部に ATF が供給されず、上下に ATF が覆わない領域ができる。したがって、この中間に ATF がうまく流れる角度が存在し、その角度において熱抵抗が最も小さくなる。

流量を振った場合について見ると、流量を増すことで熱抵抗低減効果は増加する傾向にあるが、その増加効果は流量が増すほど小さくなる。この結果から、目標とする熱抵抗が得られる最小の流量を求めることができる。Fig. 2 に示す冷却構造にこの知見を当てはめると、オイルキャッチタンクからの連通口の径を、実車走行状態で最小流量以上の流量が得られるように選定しておけば、必要な低減効果が得られることになる。

4.1 節で作成したモータ内全体の熱抵抗モデルと 4.2 節～4.4 節で求めた各部の熱抵抗評価結果を統合して ATF 冷却の効果を織り込んだ熱解析モデルを確立した。以下、作成したモデルを用いて ATF 冷却の効果について解析する。

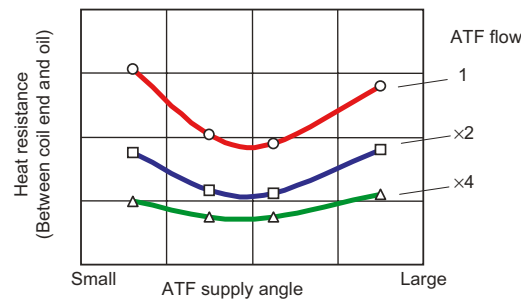


Fig. 11 Heat resistance (Between coil end and ATF)

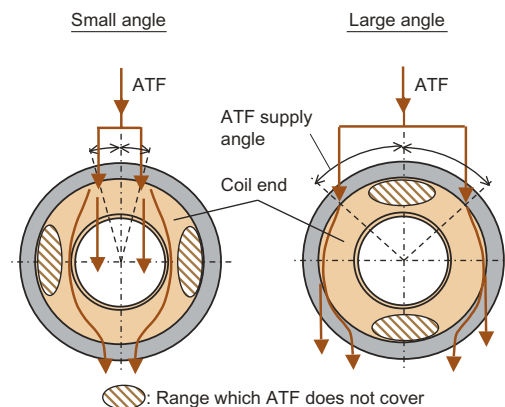


Fig. 12 Diagram of ATF flow

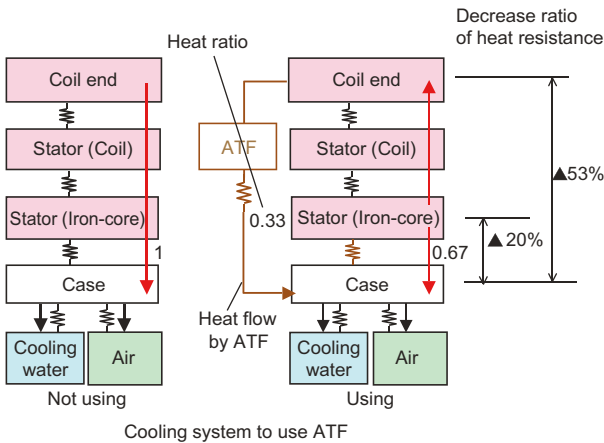


Fig. 13 Result of the trial calculation
(Heat flow, Heat resistance between stator and case)

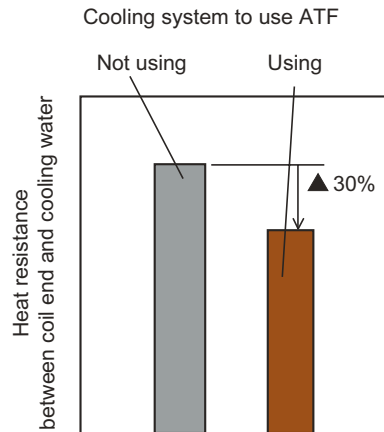


Fig. 14 Result of the trial calculation
(Heat resistance between coil end and cooling water)

4.5 ATF 冷却の効果試算

モータ内の熱流れの様子を試算した結果を Fig. 13 に示す。ここでは Fig. 3 の熱抵抗モデルを元に、コイルエンド・鉄心等をひとつのかたまりとし、コイルエンドから冷却水・空気へ熱が流れる 1 次元モデルで表している。ATF をステータ鉄心間に充填することでその部分の熱抵抗が 20% 減少する。更に、コイルエンドに ATF を供給することで発熱量の 3 割を伝える新たな熱流れルートが形成されていることが分かる。これらの効果でコイルエンド～ケース間の熱抵抗が半減することという結果が得られた。

Fig. 14 に実際のモータを用いた評価結果を示す。ATF を利用した冷却を用いる場合と用いない場合についてコイルエンド温度と冷却水温度を計測し、磁場解析等で求めたモータ発熱量との関係から熱抵抗を算出した。この結果から、実機においても 3 割の熱抵抗低減効果を確認することができた。

5. 結言

HEV 用モータの高出力化に伴う発熱量増加に対応するための ATF を用いたモータ冷却構造について、モータ内多点温度計測と各部の部分サンプル評価および ATF を用いた冷却による熱抵抗への影響を明確化する評価試験結果から、ATF による冷却効果を織り込んだモータ内熱解析モデルを確立した。このモデルを用いて解析を行った結果、ステータ鉄心～ケース間への ATF 充填による熱抵抗低減と、コイルエンドへ供給した ATF による冷却効果でコイルエンド～ケース間の熱抵抗が半減することを明らかとし、ATF を利用した冷却構造の有効性を実証することができた。

<参考文献>

- 1) 畑 祐志ほか：“FF SUV 用新ハイブリッドトランスミッションの開発”，トヨタテクニカルレビュー，Vol. 54, No. 1 (2005), p. 36.
- 2) 相原 浩：“新型 SUV-HEV 用モータの開発”，TECHNO-FRONTIERSYMPOSIUM 2005 モータ技術シンポジウムテキスト，C1-2-1 - C-1-2-10 (2005).
- 3) 高橋 研二ほか：“誘導電動機の接触熱抵抗と冷却性能”，日本伝熱シンポジウム講演論文集，Vol. 35 (1998) , p. 39. など多数
- 4) 岩井 裕ほか：エクセルとマウスでできる熱流体のシミュレーション，丸善株式会社 (2005). など多数

<著 者>



鬼丸 貞久
(おにまる さだひさ)
(株)日本自動車部品総合研究所
研究2部
HV 機器関連の熱解析, 冷却技術
開発に従事



松井 啓仁
(まつい ひろひと)
(株)日本自動車部品総合研究所
研究2部
HV 機器関連の熱解析, 冷却技術
開発に従事



田口 知成
(たぐち ともなり)
トヨタ自動車(株)
第1 車両性能開発部
HV 車両冷却系開発に従事



大高 健二
(おだか けんじ)
トヨタ自動車(株)
第3 ドライブトレイン技術部
HV トランスアクスルの開発に
従事



市岡 英二
(いちおか えいじ)
トヨタ自動車(株)
第3 ドライブトレイン技術部
HV トランスアクスルの開発に
従事



水谷 竜彦
(みずたに たつひこ)
トヨタ自動車(株)
HV ユニット開発部
HV 用モータの開発に従事