

# 特集 小型ハイブリッド車のモータステータの開発\*

## Motor Stator for Small Hybrid Vehicle

金岩 浩志  
Hiroshi KANEIWA

加藤 充  
Mitsuru KATO

梅田 敦司  
Atsushi UMEDA

高崎 哲  
Akira TAKASAKI

神谷 宗宏  
Munehiro KAMIYA

水谷 竜彦  
Tatsuhiko MIZUTANI

A down sized distributed winding stator for B segment vehicles has been developed by utilizing a newly developed coil, winding (stator) structure, and production method. Due to the limited space of the engine compartment for small vehicles, high voltage downsized motor was required. To minimize the end winding size, the stair shaped coils were stacked orderly. The newly developed coil has a thick resin insulation layer on the enamel layer, and serves as insulation paper contributing to the downsizing. This stator structure downsized the height by approximately 15 % and width by approximately 10% compared with our latest distributed stator.

Key words : EV and HV systems, motor, insulation, motor stator, coil

### 1. まえがき

近年、資源の枯渇問題や地球温暖化への関心が高まっており、自動車に対しても低燃費性および低負荷環境性（CO<sub>2</sub>排出削減）が要求されている。そのため、低燃費およびCO<sub>2</sub>削減に有利なハイブリッド車（HV）が急速に普及している。

HVの駆動用モータは、始動時の主動力、加速時の動力アシスト、制動時のエネルギー回収等の役割を果たし、ハイブリッドシステム上で重要な役割を担う。HVの動力性能の向上、更なる低燃費化および低コスト化への要求から、駆動用モータには出力増加や体格・重量低減による高出力密度化が要求されている。

このような背景のなか、低燃費、低コスト化に有利な排気量1500ccの小型車クラスへのHVシリーズ展開が期待されてきた。しかし、小型車ではエンジンルームの搭載スペースが小さくなるため、従来の高出力モータを搭載することは難しく、モータの小型化が必要であった。さらに、高電圧に対する絶縁性能の確保等の制約により、従来モータの単なる寸法小型化だけでは、モータの出力性能と搭載性の両方を成立させることは困難であった。

そこで、今回はモータステータの小型化を目指して、ステータの巻線、絶縁構造を見直し、高電圧絶縁性能を確保しつつ量産性を備えた、小型HVに搭載可能なモータステータを開発したので報告する。

### 2. 開発の狙い

Fig. 1に車両エンジンルーム内のHVトランスアクスル（T/A）およびモータ構造の概略を示す。車の動力性能を確保し、かつ軽量化およびスモールHVの限られた許容スペースにT/Aを搭載するため、モータの出力および絶縁性能を確保しつつ、モータおよびT/Aの寸法を低減する。

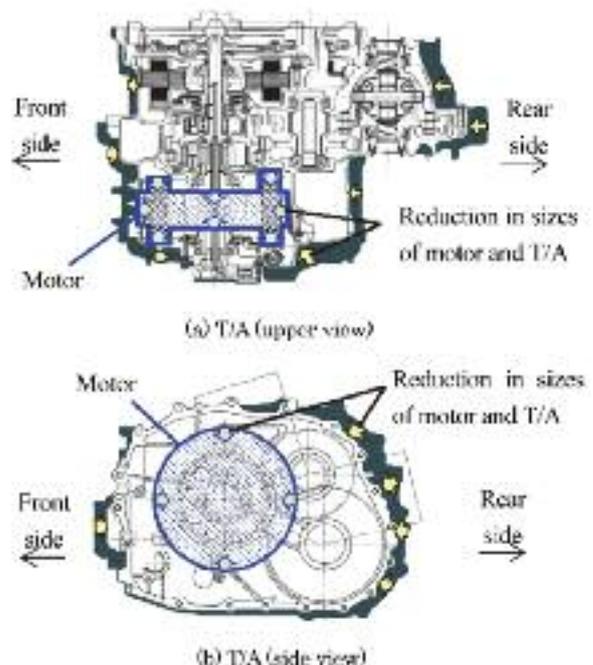


Fig. 1 T/A housing and motor

\*（社）自動車技術会の了解を得て「2012年春季大会学術講演会前刷集」No. 20125129 より一部加筆して転載

### 3. 開発方針，課題達成へのアプローチ

#### 3.1 モータステータ小型・軽量化の方針

Fig. 2に，ステータ構造の概略図を示す．ステータの容積は主にコアとコイルエンドが占めている．T/Aが小型HVへ搭載できるように，モータステータのコア（スロット）とコイルエンド両方の構造を見直し，体格を低減する．

Fig. 2に示すコアのスロット断面において，スロットの中に入るコイル導体の割合（占積率）が大きいくほど，より大きな電流を流すことができ，モータ出力を向上できる．すなわち，同一出力のモータでは，占積率を向上させるほどコアの体格を低減できる．そこで，コイルおよびスロット形状を見直し，スロット断面の導体の占積率を向上することにより，コアの体格を低減することとした．

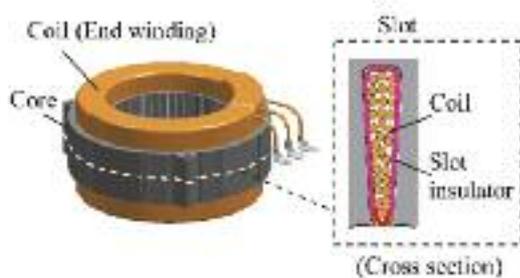


Fig. 2 Motor stator

次に，コイルエンドの体格低減の考え方について述べる．Fig. 3に，コア内周面からみた，巻線方式別のコアとコイルエンドの形状を示す．巻線方式は，集中巻方式と分布巻方式に大別でき，コイルエンドの体格だけでなく性能にも影響をおよぼす．集中巻は各磁極の重なりがなく，コイル同士の干渉が少ないためコイルエンドの幅（ $L_c$ ）を短くできる反面，出力トルクあたりの磁石の使用量が多いことや，コギング（NV）が大きくなる傾向にある．一方，分布巻は各相の磁極に重なりがあり，コイルエンドにてコイルが交差する形状を有するため，コイルエンドが大きくなり，製法も複雑になるが，出力トルクあたりの磁石量が少なく，コギングも低くなるという特徴がある．

モータの仕様（出力・損失・ノイズ等），許容寸法，製法の容易さ，コスト等の各種制約条件によって最適な巻線方式は異なる．今回は，モータの要求仕様（高出力，低NV等）を考慮して，出力特性が有利な分布巻を選択し，コイルエンドの形状見直しによるコイルエンド体格の低減を行うこととした．

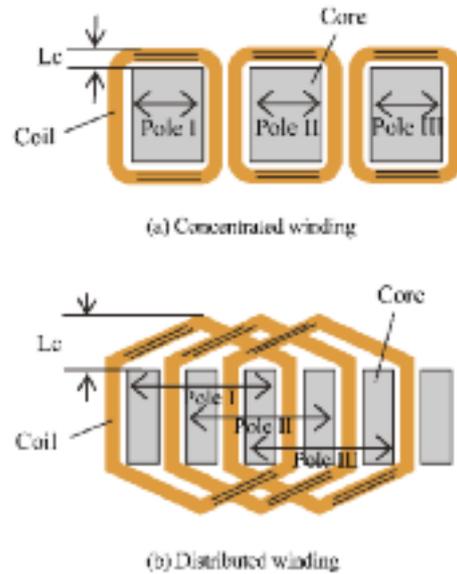


Fig. 3 Concentrated and distributed windings

ここで，コイルエンドの体格低減の背反として，コイル皮膜ダメージの発生，コイル間の隙が狭まり絶縁離隔が不足することや，コイルへの絶縁部材の組付け性が悪くなることが考えられる．高出力・高電圧モータでは絶縁機能が重要なため，体格低減と絶縁確保を両立できるよう，コイルエンドの絶縁方式もあわせて見直した．

以上の考えから，モータステータの体格低減を以下のように進めた．

- ・導体の占積率を向上し，コア体格を低減する．（3.2章）
- ・コイルエンド体格低減のための，コイルエンド形状および絶縁部材が不要な，新規の絶縁構成を適用する．（3.3章）

#### 3.2 導体占積率の向上

導体占積率の向上は，導体を丸線から平角線に変更し，スロット形状を平角線形状に合わせることで達成した．Fig. 4に，ステータコアの（a）従来および（b）開発品のスロット断面形状を示す．コイルの平角線化により，丸線間に存在する空間および絶縁層を導体で占め，スロットあたりの導体の占積率を10%向上した．

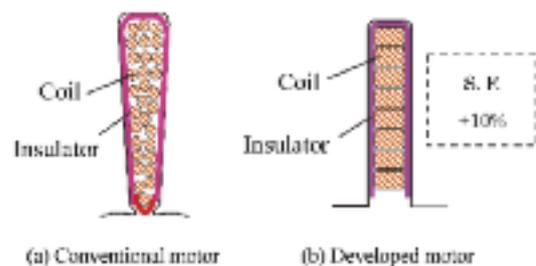


Fig. 4 Cross section of stator core

3.3 コイルエンドの体格低減

Fig. 5に、コア内周面側からみた、(a) 従来および (b) 本開発の分布巻ステータのコイルとコアの形状を示す。

コイルエンドの体格低減化のため、(1) コイルの階段形状化に加え、(2) コイルの厚皮膜化による相间絶縁紙の廃止、(3) コイルの溶接接合による巻線化、(4) 分割コアの採用を行った。以下に、各方策の目的および概要を述べる。

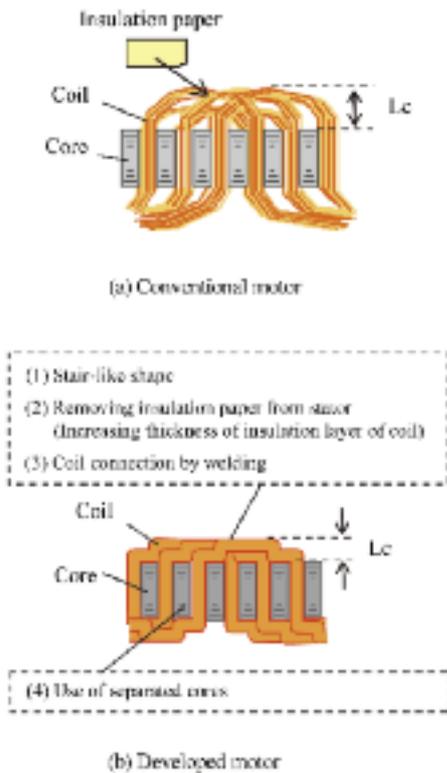


Fig. 5 Structure of stator

(1) コイルの階段形状化

Fig. 6に、コイルエンド低減のアプローチを示す。Fig. 6(a)に平角線を用いた場合の従来のコイルエンド形状<sup>1)</sup>を、Fig. 6(b)に開発ステータのコイルエンド形状を示す。ここで、Fig. 5(a)に示すように、従来(丸線)ステータのコイルエンドでは、コイル素線の形状・配置ばらつきが発生して隙が発生し、モータ軸方向のコイルエンド幅(Lc)が長くなる傾向にある。次に、Fig. 6(a)に示すような平角線を用いた従来ステータのコイルエンドでは、コア端面に対してコイルが斜めに立ち上がるため角度分の高さ増加が発生する。そこで、Fig. 6(b)に示すように、コイル形状をコア端面に対して並行と斜めの向き(階段状)にすることによって、コイルエンド幅を低減した。

以上に示すように、本開発では新形状の階段状コイルを考案し、コイルエンドの体格低減を行った。

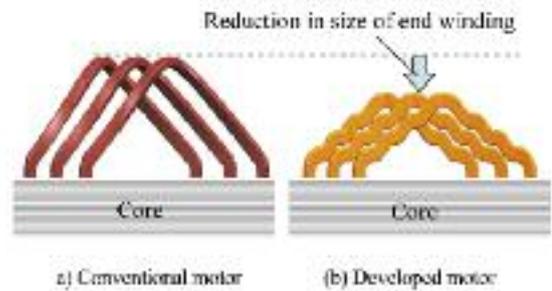


Fig. 6 Shape of end winding (Rectangular coil)

(2) コイルの厚皮膜化による相间絶縁紙の廃止

コイルエンドでは、電位差を持つコイル同士(主に異相のコイル)が接触するために、コイル同士の絶縁が必要である。特に高電圧モータでは、導体間の絶縁距離が不足すると、コイル間で部分放電<sup>2)</sup>が発生し、最終的に絶縁破壊を引き起こす恐れがある。そのため、部分放電を発生させないように、Fig. 5(a)に示すように、異相コイル間に絶縁部材(紙)を挟みこみ、導体間の絶縁距離を確保する。この場合、絶縁紙のコイル間への挿入スペースが必要となるため、絶縁紙はコイルエンドの体格が増加する一因であった。

そこで、コイルエンドの体格を低減するために、絶縁紙を廃止することとした。そのため、コイル導体間の絶縁距離をコイル皮膜で確保する必要があるが、今回、新規に厚皮膜コイルを開発した。Fig. 7に従来(エナメル皮膜)コイルと厚皮膜コイルの構造を示す。コイルの皮膜は2層構造とし、内層のエナメル層に加え、導体間の絶縁距離を確保するために外層に樹脂を被覆した。なお、樹脂材には、耐加工性を有し、かつ、使用環境に耐えうる材料を選定した。コイル皮膜の厚皮膜・2層化により、コイル皮膜の絶縁性能を向上することができた。

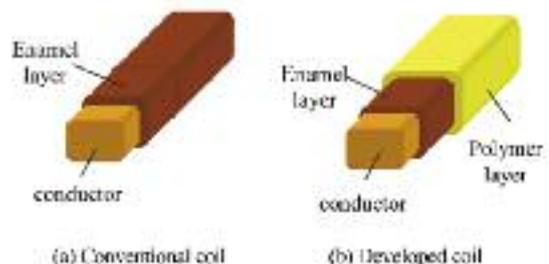


Fig. 7 Stator coil

Fig. 8に、コイル皮膜厚と部分放電開始電圧 (PDIV) の関係を示す。コイルの絶縁確保のためには、皮膜厚を増やし必要PDIVを確保する (= 部分放電を発生させない) ことが必要である。必要皮膜厚は、階段成形等の加工による皮膜厚の減少分を考慮して、厚めに設定する必要がある。その一方で、皮膜厚が厚くなるほどスロット内の占積率が低下するため、絶縁性能確保と占積率の両方を考慮して、最適なコイル皮膜厚を決定した。

コイル厚皮膜化により、相間絶縁紙なしで絶縁性能を確保することができた。これにより、相間紙挿入を前提としたコイルエンド形状や組付け工程の制約がなくなり、コイルエンド体格低減に寄与することができた。

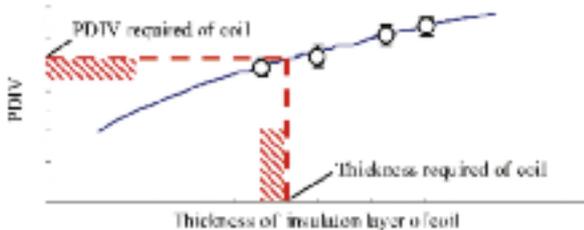


Fig. 8 Correlation between PDIV and thickness of insulation layer

(3) コイルの溶接接合による巻線化

Fig. 9にステータコイルの巻線構造を示す。コイルは渦 (スパイラル) 状の波巻とし、コイル線同士を溶接接合することにより一連の巻線とした。溶接部は導体が露出するため、樹脂にて絶縁被覆処理を行い、絶縁性能を確保した。なお、コイルエンドではコイルがすべて階段形状で互いに干渉することがなく配置されるため、巻線化において、コイル同士の潰れやコイル絶縁皮膜へのダメージを抑制することができる。

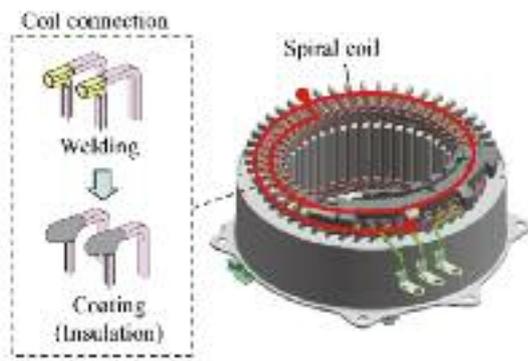


Fig. 9 Motor stator and coil connection

(4) 分割コアの採用

コンパクトな巻線とコアの組付け性を考慮して、分割コアおよび外筒を採用した。Fig. 10に分割コアおよび外筒の構成を示す。分割状のコアシートを積層してコアブロックを形成し、コイルに挿入した後、外周面側を外筒にて固定する。なお、分割コアはコアシートの歩留まり (シートの利用率) が向上するという利点を持つ。

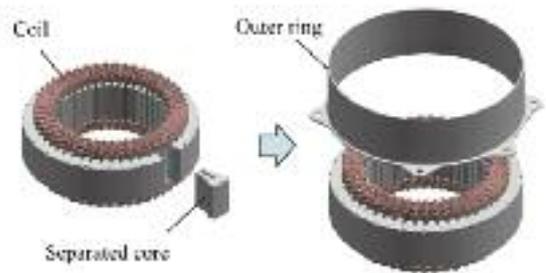


Fig. 10 Separated cores and outer ring

4. 構造および開発効果

Fig. 11に、本開発品のモータステータを示す。従来方式のモータステータに比べ軸長を15%、径を10% 縮小することができた。

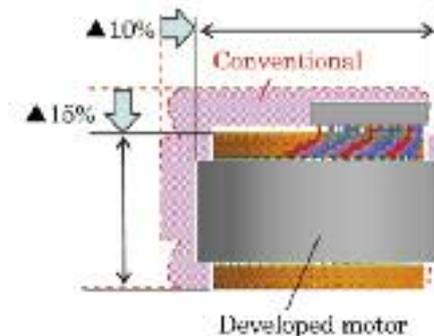


Fig. 11 Reduction in size of motor stator

5. むすび

小型ハイブリッド車に搭載可能なモータステータの開発を行った。以下項目に示すように、コイル形状やコイルエンド構造および絶縁構成を見直すことにより、ステータの体格を低減し、量産化を可能にした。

- (1) コイルの平角線化
- (2) 新コイルエンド (階段) 形状の採用
- (3) コイルの厚皮膜化による相間絶縁紙の廃止
- (4) コイルの溶接接合による巻線化

(5) 分割コアの採用

小型ハイブリッド車に搭載可能なモータを開発でき、ハイブリッド車の軽量化および燃費向上に貢献できた。

<参考文献>

- 1) 松原, 梅田, 大久保: 車両用交流発電機の高性能化, 自動車技術会春季大会前刷集299 (2000)
- 2) 例えば, 電気学会: 放電ハンドブック, 第5部第3章 (1974)

<著者>



金岩 浩志  
(かねいわ ひろし)  
電機技術2部  
HV用モータの開発に従事



加藤 充  
(かとう みつる)  
電機製造2部  
HV用モータの製造技術開発に従事



梅田 敦司  
(うめだ あつし)  
電機技術2部  
HV用モータの開発に従事



高崎 哲  
(たかさき あきら)  
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



神谷 宗宏  
(かみや むねひろ)  
トヨタ自動車(株)  
BR-EV・充電システム開発室  
EVシステムの開発に従事



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