

SPORT HYBRID i-DCD 新型用モータの低鉄損技術

Technologies for Low Iron-loss in New SPORT HYBRID i-DCD Motor

藤代 智*

Satoshi FUJISHIRO

相馬 慎吾*

Shingo SOMA

鈴木 雄一*

Yuichi SUZUKI

梶野 大樹*

Daiki KAJINO

要 旨

新型1モータ SPORT HYBRID i-DCD 用モータにおいて、一般流通電磁鋼板材によるコスト低減と重希土類フリー磁石の採用による調達リスク回避をおこなった。ステータコアに使用する鋼板を従来の板厚 0.25 mm から 0.35 mm に変更した。板厚が増えることによる鉄損増加に対しては、ステータコアのカシメ点数と位置の見直しにより渦電流の低減によって対応した。また、ステータホルダ内径に波形状加工を施し、接触面積を削減させステータコア圧入時の残留応力を緩和することでも鉄損を低減させた。重希土類フリー磁石採用による磁石耐熱性への対応としては、磁石の配置を平行配置からロータコア内径へ深埋めしたV字配置に変更させた。これに加えて、磁石の分割数を軸方向4分割から周方向2分割に並べ、工程簡略化をおこなうながら損失を同等にすることができた。

ABSTRACT

The use of generally available materials for the electromagnetic steel sheets in a new motor for a one-motor SPORT HYBRID i-DCD has reduced costs, while the application of heavy rare earth-free magnets has assisted in the avoidance of procurement risk. The thickness of the steel sheets employed in the stator cores was increased from the previous 0.25 mm to 0.35 mm. The increased loss resulting from increased sheet thickness was responded to by modifying the number and position of the caulking dowels used in each stator core in order to reduce eddy current. Iron loss has also been reduced by machining corrugations into the inner circumference of the stator holder in order to reduce the contact area and thus reduce residual stress from press-fitting. In order to help ensure magnet heat resistance with the application of heavy rare earth-free magnets, the configuration of the magnets was changed from a parallel configuration to a V-shaped configuration fitted deep inside the inner circumference of the annulus formed by the rotor cores. In addition to this, the number of divisions of each magnet was changed from four divisions arrayed in the axial direction to two divisions arrayed in the circumferential direction, simplifying the production procedure and helping to realize a level of loss equivalent to that of the previous motor.

1. まえがき

近年、自動車産業においては地球環境への影響から CO₂ 排出量を削減することが重要な課題となっており、電動化技術開発が益々盛んになってきている。モータ、インバータ、バッテリーという主要コンポーネントのコストはまだ高いため、世界的に広く普及していないのが現状である。より多くのお客様に乘っていただく価格帯を実現したハイブリッドシステムとして、Honda は 2013 年に 1 モータ SPORT HYBRID i-DCD を発売した。このシステムに用いた永久磁石型モータ（以下従来モータ）は Honda が独自に開発したモータであり、最高効率 96% 以上という性能

を実現した。従来モータは電磁鋼板に 0.25 mm の薄板高グレード材を採用することで電磁部の低損失化を実現していた。しかし薄板高グレード材はコストが高いことやグローバルに展開する際の材料調達リスクがある。

そこで、2016 年に発売した FREED Hybrid に本新型モータ（以下新型モータ）を適用した。一般的に流通している 35A270 グレードの電磁鋼板を用いながら、高効率なモータを実現する鉄損低減技術の開発をおこなった。

また、従来モータは高い耐熱性を実現するために、磁石に重希土類であるジスプロシウム、テルビウムを添加している。重希土類は特定の地域でしか採掘されないため材料調達リスクを伴う。そのため、重希土類フリーの技術開発

*四輪 R&D センター

をおこない⁽¹⁾、新型モータに適用した。本稿では、ステータの低鉄損化技術と重希土類フリー磁石の分割適正化について紹介する。

2. 搭載システムとモータ仕様

2.1. 搭載システム

新型モータを採用した1モータ SPORT HYBRID i-D2D のトランスミッションは、7速変速ギヤと一つのモータを内蔵している。FIT クラスに搭載可能なコンパクトサイズである。また、モータの巻線方式は分割ステータコアに銅線を巻き付ける突極集中巻方式を採用している。小型化と効率向上という相反する目標の両立を図りながら開発をおこなった。このトランスミッションの外観形状を Fig. 1 に示す。本システムは走行状況に応じてエンジンとモータの接続を切離することで、エンジンとモータで駆動するハイブリット走行、エンジンのみのエンジン走行、モータのみの EV 走行が可能である⁽²⁾。

2.2. モータ仕様

Fig. 2 にモータの外観図を示す。モータは大きく分けてステータとロータで構成される。ステータはトランスミッションケースへ締結され、三相の巻線コイルにインバータから通電することで回転磁界を発生させロータへ連続的にトルクを発生させる役割をもつ。

ステータコンポーネントでは、コーキングによってカシメられた電磁鋼板を積層してステータコアを構成している。絶縁性を保つために2分割されたインシュレータで挟み込み、マグネットワイヤを巻き付けている。その分割さ

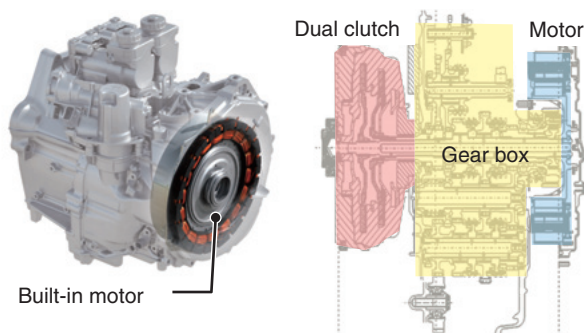


Fig. 1 Layout of 1-motor SPORT HYBRID system

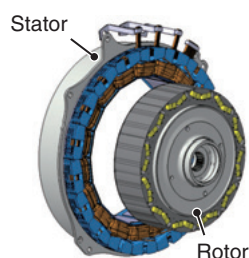


Fig. 2 Motor components

Table 1 Comparison of specifications

	Previous motor	New motor
Type	IPMSM	
Phase	3	
Number of poles	6	
Coil turns	55	
System voltage [V]	173	
Maximum motor power [kW]	22	
Maximum motor torque [Nm]	160	
Volume [L]	2.57	
Stator	Plate thickness [mm]	0.25
	Number of caulking points	2
	Holder	Press fit
Rotor	Magnet layout	Axial: 4
	Heavy rare earth magnet	Applied
	Number of magnets	96
	Magnet Br [T]	1.27
	Magnet H _{cj} [kA/m]	>2294
		>1500

れたコアを18個で円周状に構成した後ステータホルダへ圧入して位置を規制している (Fig. 3)。

一方、ロータはトランスミッションへトルク伝達するために、磁束を生み出す磁石が挿入された電磁鋼板のロータコアをロータシャフトに圧入して構成されている。一般的に磁石は、損失低減のため複数個に分割されており、新型モータでは48個の磁石を用いている (Fig. 4)。

Table 1 に従来モータと新型モータの諸元表を示す。

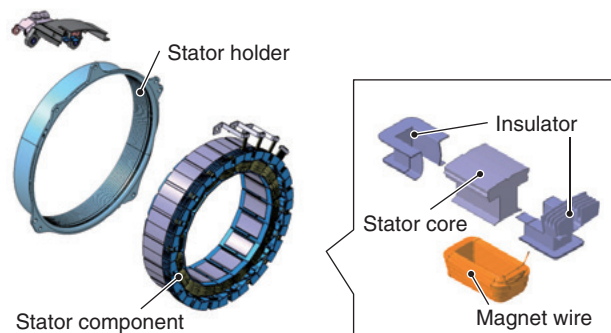


Fig. 3 Stator component parts

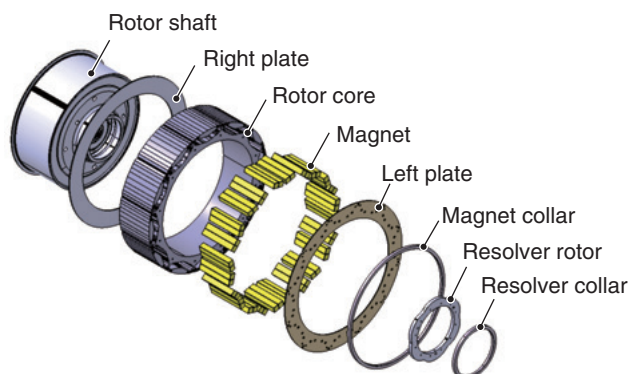


Fig. 4 Rotor component parts

3. 開発のねらい

従来モータでは、ステータコアの鉄損を低減するため 0.35 mm、0.50 mm より薄い 0.25 mm かつ高グレード材を採用してきた。一般的に流通しているグレード材を用いることができれば、グローバルな材料調達性を確保できるため、コスト低減効果が見込まれる。新型モータでは、グローバル調達も視野に入れ、ステータコアに板厚 0.35 mm の 35A270 グレードの電磁鋼板を採用した。

ステータコアに用いられる電磁鋼板の鉄損は式 (1) で求められる。鉄損は右辺第一項のヒステリシス損失と第二項の渦電流損失の和からなり、鋼板の厚みに影響を受ける。

$$W = fB^{1.6} + f^2 B^2 t^2 \quad (1)$$

B : Flux density

f : Frequency

t : Thickness

鋼板の厚みが 0.25 mm から 0.35 mm へ増えたことでモータ運転時の鉄損は、従来モータに対して 50% 増加することが磁場解析よりわかった。その鉄損増加の影響により、モータ効率は低下し、車輛の燃費低下を招くため、低損失化技術が必要となる。

また、重希土類フリー磁石を適応することで磁石耐熱性の対応が必要となる。そこで、磁石配置を従来モータの平行配置からロータコア内径へ深埋めした V 字配置に変更した。鉄損に含まれる磁石損失を低減するには磁石の分割数を増やすことで解決できる。しかしながら、一般的に磁石は細かく分割するほど鉄損が低減するが、磁石分割数が増えると加工費が増加する。このため、磁石鉄損と加工費低減の両立が必要となる。

そこで、新型モータの鉄損を従来モータと同等にするため、下記 2 項目の技術を構築した。

- (1) ステータの低鉄損失化技術
- (2) 重希土類フリー磁石の分割適正化

4. ステータの低鉄損失化技術

4.1. カシメ形状の最適化

ステータコアは磁束を通しやすい電磁鋼板材を積層したものであり、それぞれの鋼板はプレス時に成形されたコーキングによってカシメられており、その形状を維持している。従来モータは Fig. 5 に示すように積層時のねじれを抑制するため、離れた位置に円形のコーキングを 2 ケ所設定していた。

また、電磁鋼板は表面に絶縁被膜を塗布してあり、鋼板間の渦電流を絶縁することで損失を抑制している。しか

し、コーキングはプレスで成形する際に絶縁被膜を剥がし、隣り合う鋼板と接触するため、その導通部で渦電流損が発生する。

渦電流損失は式 (1) に示すとおり磁束密度の影響も大きく受ける。高回転領域は周波数が高く、また高トルク領域では磁束密度が高くなるため損失はさらに増加すると考えられる。よって Fig. 6 に示すとおり、磁束密度の変化が少ないコアティース中央部に 1 ケ所にカシメを設定することとした。カシメ点数を 1 ケ所にすることの課題として電磁鋼板を積層する際のコアのねじれがある。そこで、コーキング形状を円形から小判形状とした。コーキング形状に 2 面幅を設けたことにより、分割されたステータコアの回転方向を拘束することができた。

Fig. 7 に JC08 モード最多負荷頻度点にて磁束密度を解析した結果を示す。磁束密度が低い位置にコーキングを配置すると、ロータの位相に伴う磁束密度の変動も抑えられるため鉄損が低減できる。

4.2. 低接触圧入

新型モータのステータは円周状に 18 個に分割したコアを円筒のステータホルダへ圧入することで構成される。また、電磁鋼板の鉄損は圧縮応力下で増加することが知られており⁽³⁾、接触箇所を削減して高応力部を限定した方が全

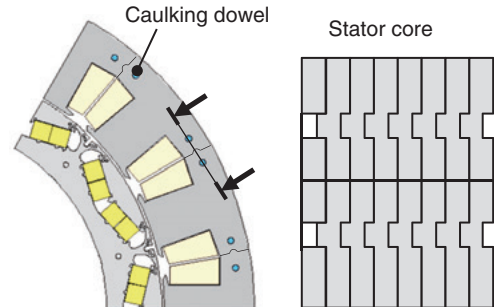


Fig. 5 Caulking dowels in stator cores

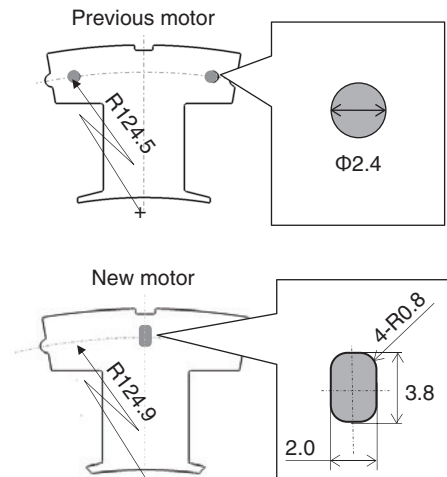


Fig. 6 Caulking shape

体の鉄損を低く抑えられると考えた。

新型モータでは、ホルダの圧入面に波形の形状を加工することでステータコアとステータホルダを波形の頂点で線接触させた。

Fig. 8 に応力解析による低接触圧入された後のステータコア圧入応力を示す。Fig. 8 図中 (5), (6) 部分の接触箇所は高い圧縮応力を受けている一方、(1) 部分は低い圧縮応力となっている。全体の圧縮応力のコンターを見ると接触面積に応じて鉄損は徐々に増加すると推定される。また、ステータコアに発生する鉄損を応力分布ごとに計算した結果、本低接触圧入によりステータ全体で平均 11% 鉄損が低減すると推定された。

Fig. 9 に実際に加工したステータホルダ内径部の写真を示す。ステータホルダの圧入面に仕上げ加工を施し、ステータホルダとステータコア間の圧入時の締め代設定が容易となる。そのため、必要な保持力と鉄損の最適設定で締め代を管理できる。

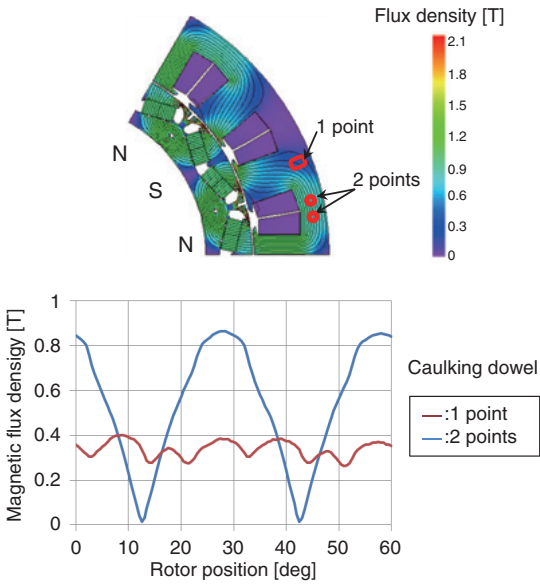


Fig. 7 Number of caulking points and results of analysis

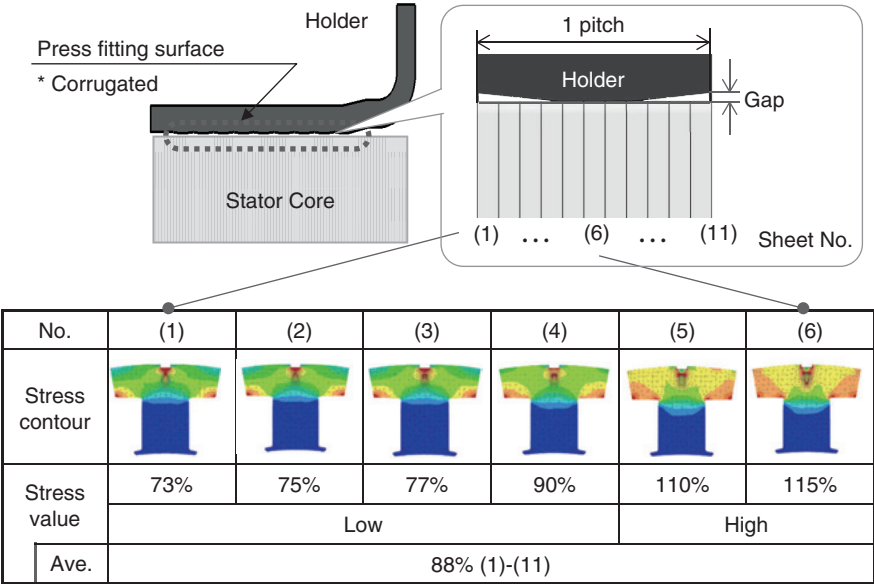


Fig. 8 Low-contact press-fitting characteristic

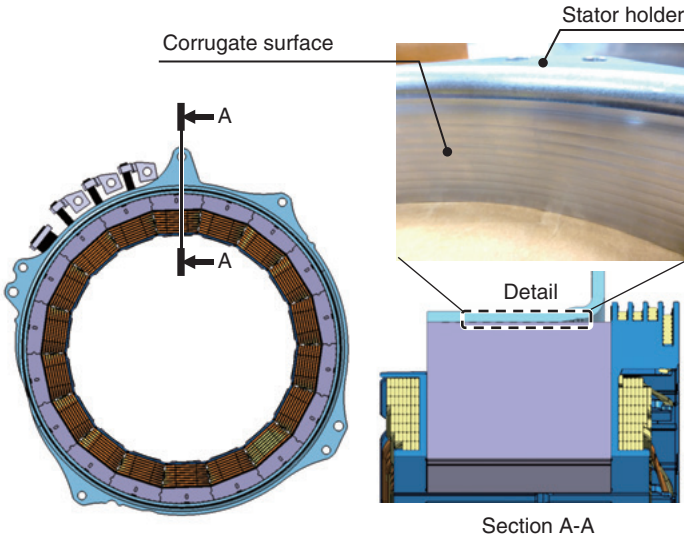


Fig. 9 Corrugated surface of stator holder

5. 重希土類フリー磁石の分割適正化

自動車に搭載される主駆動用モータは、使用環境が高温、強反磁界であるため、磁石には高い耐熱性すなわち保磁力 (H_{cj}) が求められる。重希土類フリー磁石を採用するにあたり、耐熱性の低下が課題となる。そのため、磁気回路による対策⁽¹⁾および、逆磁界を低減することが必要である。

磁石の分割数を増やすことで磁石内部渦電流損失の低減効果が得られることが知られている⁽⁴⁾。従来モータでは、磁石発熱を抑えるために極あたりに軸方向に4分割に並べる必要があり合計96個使用していた。一方、磁石の分割数に応じて加工コストの増加が生じるため、分割数を少なくすることも求められている。

Fig. 10で磁石に逆磁界を与えた時の磁石内部で発生する渦電流のコンター図を示す。磁石内で発生した渦電流が互いに打消し合うことで磁石端部と内部で磁石に発生する差があることがわかる。この結果、磁石内部に発生する渦電流を受ける面積を小さくするのが有効であると考えられる。

そこで、磁石分割数が最小限かつ従来モータ同等の鉄損になるように3次元磁場解析によってパラメータスタディを実施した。その結果、Fig. 11に示すとおり従来モータの

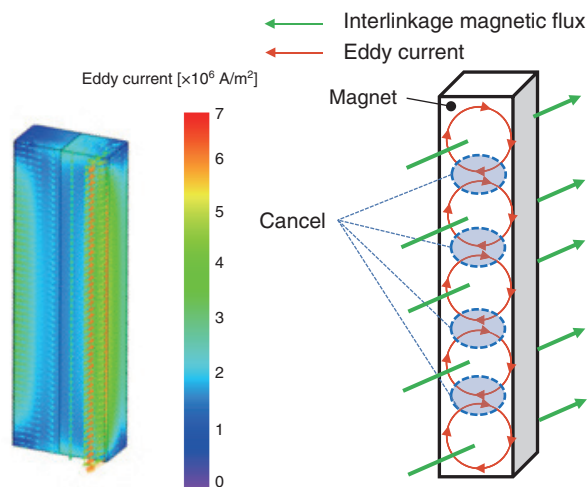


Fig. 10 Analysis of magnet loss

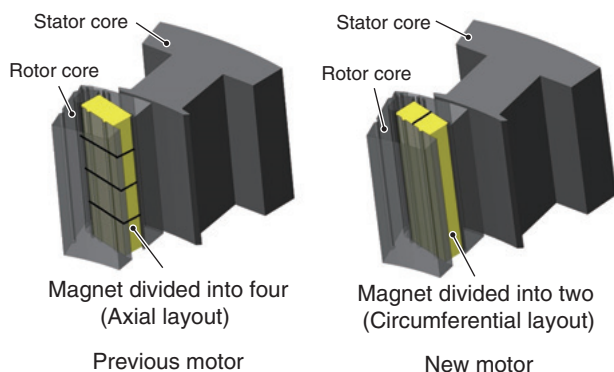


Fig. 11 Magnet division

磁石を軸方向に4分割に並べるのに対して、新型モータでは磁石を周方向に2分割に並べた。

次に、Fig. 12に磁場解析結果にて磁石分割の有無および分割配置の違いによる磁石損失結果を示す。解析条件は新型モータ体格で磁石内部渦電流損失が最も発生する7000 rpm、-30 Nmにおいて実施した。磁石を分割することで鉄損が半減できることに加え、本稿の分割手法により、従来モータ同等以下の損失にできる見通しが得られた。

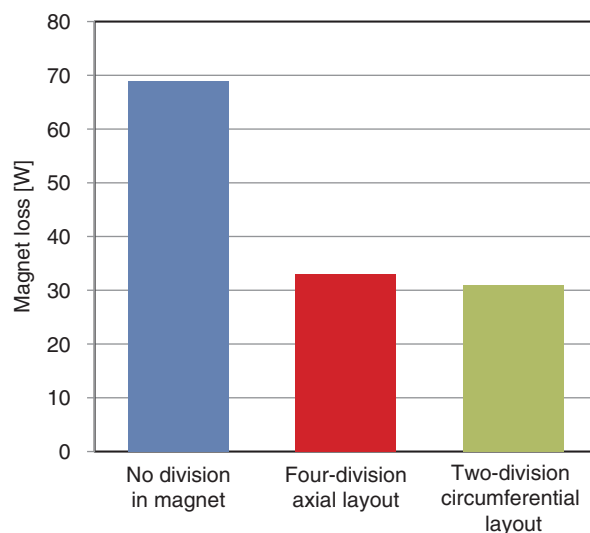


Fig. 12 Comparison of magnet loss

6. モータ損失評価結果

Fig. 13に従来モータと新型モータにおけるモータ損失の測定結果比較を示す。従来モータ損失から新型モータ損失を引いて、損失差分を濃淡で示している。燃費モードの

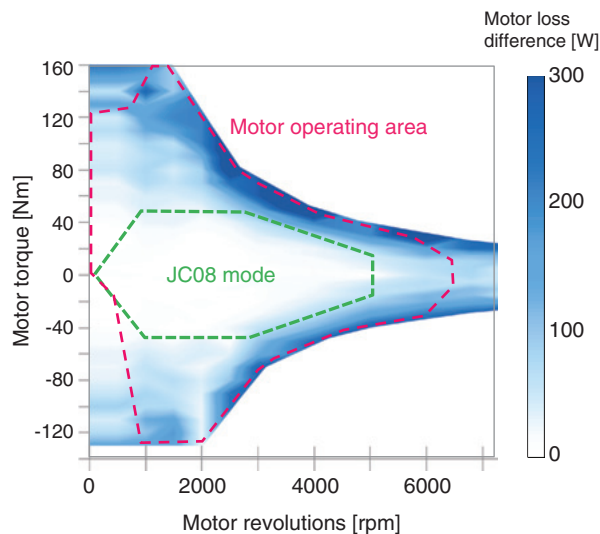


Fig. 13 Comparison of motor loss

JC08 運転領域では従来モータと同損失の結果が得られた。さらに、鉄損が大きい高回転領域および高トルク領域においては従来モータに対して損失が低減できた。

次に、JC08 モード走行時モータ損失への影響を示す (Fig. 14)。ここでは、単位時間あたりのモータ損失を積算し、従来モータをベース (100%) とする。従来モータに対して、ステータコアの一般材化によりモータ損失が増加するが、1 点カシメ、低接触圧入、磁石分割手法により、新型モータは従来モータ同等以下の損失であることを確認した。

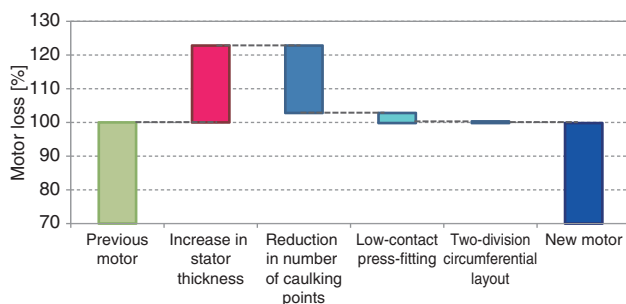


Fig. 14 JC08 mode motor loss

7. まとめ

重希土類フリーを実現した新型モータにおいて低鉄損技術を投入し従来モータと体格同等で同じ鉄損を満足させることができた。

- (1) ステータのカシメを磁束密度が低い位置に一カ所配置することで鉄損低減できる。また、ステータコアにホルダ圧入する際に接触箇所を削減させることで平均 11% の鉄損低減効果が得られた。
- (2) 重希土類フリー磁石の分割配置により必要最低限の分割数で従来品と同等鉄損にすることができた。

以上より、ステータコアの電磁鋼板に一般流通材グレードを使用し、さらに磁石の分割数を削減させることで従来モータよりコスト低減できた。

参考文献

- (1) 相馬慎吾, 藤代智, 白土英治: 重希土類フリー HEV 用モータの磁気形状研究, 自動車技術会学術講演会講演予稿集, No. 1-98, p. 39-43, (2016)
- (2) 四方哲, 鎌田剛史: 新型 HEV モータの開発, 自動車技術会学術講演会前刷集, No. 3-14, p. 1-4, (2014)
- (3) 尾田善彦, 石田昌義, 志賀信勇, 戸田広朗, 笠井勝司: 電磁鋼板の圧縮応力鉄損に及ぼす磁歪の影響, 平成

24 年電気学会全国大会, 第 2 分冊, p. 185-186, (2012)

- (4) 青山康明, 松岡孝一, 近藤稔: 永久磁石同期電動機の磁石分割による損失低減効果の解析, 平成 13 年電気学会産業応用部門大会講演論文集, p. 771-774, (2001)

■ 著 者 ■



藤代 智



鈴木 雄一



相馬 慎吾



梶野 大樹