

アキシアル型モータの研究

Development of Axial Motor

阿 部 昇 栄*
Shoei ABE井 上 順 二*
Junji INOUE石 川 聡*
Satoshi ISHIKAWA

要 旨

ABSTRACT

高トルク密度化をねらい、アキシアルギャップ型モータの研究をおこなった。トルク発生面を拡大するためにロータの両面を有効に利用できる対向ステータ型において、軸方向に磁化方向を持つ主磁石と周方向に磁化方向を持つ補助磁石と積層電磁鋼板とを組み合わせ接着固定した磁石埋め込み型ロータとすることで、容積当りのトルク密度をラジアル型モータのプラス 50% 程度にできることを確認した。また、この接着固定を基本とするロータ構造の製法課題に対して、ヨークの製法には捲回積層手法を採用し、磁石を挿入して磁気回路部を一体化した後、その内外周に非磁性強度部材であるリングを締め代嵌合で固定するという新構造を開発した。この構造において、十分な強度と剛性を持つことを確認するとともに、接着型製法に対してモータ効率もほぼ同等であり、最終的にはラジアル型モータに対して 1.34 倍の容積トルク密度を達成することが確認できた。

Research was conducted on an axial gap-type rotating machine with the aim of increasing the torque density. To expand the torque-generating surface, an interior permanent magnet (IPM) rotor was used in a double stator-type motor that enables effective use of both sides of the rotor. This IPM rotor combines main magnets with a magnetization direction in the axial direction, auxiliary magnets with a magnetization direction in the circumferential direction, and laminated electrical steel, and fixes these components in place using adhesive. The developed motor was confirmed to have a torque density per unit volume approximately 50% higher than that of a radial-type motor. In addition, to address the manufacturing issues for a rotor structure based on this bonded structure, the yoke was manufactured using the rolling laminate method, and a new structure was developed that inserts the magnets into the yoke, integrates them with the magnetic circuit, and then fixes them in place by interference fitting inner and outer rings that are nonmagnetic reinforcing components. This structure was confirmed to have sufficient strength and stiffness, and the motor efficiency was also approximately the same as that of a rotor manufactured using the adhesive method. The new structure was ultimately confirmed to achieve a volumetric torque density 1.34 times that of a radial-type motor.

1. ま え が き

近年、地球規模の環境意識の高まりから、自動車の低エミッション化と温室効果ガスである CO₂ 低減がさらに求められている。Honda では、これらの期待に応えるべく、電気自動車、ハイブリッド自動車、燃料電池電気自動車といった環境対応車を開発し、それらの普及によって地球環境への貢献を目指している。

こうした電動車両の適用拡大において、駆動源となるモータは、より小さな設計空間の中で所望のトルクと出力を発揮することを求められている。したがってモータ性能として、さらなる高トルク密度化や高出力密度化が必要とされている。出力性能の向上については、高回転化や昇圧による運転範囲拡大といった手段を用いることで達成することも可能であるが、それに伴い減速機や昇圧回路といった付帯部品の増加を伴う。またトルク性能の向上については、磁束量を増加さ

せるか電流量を増加させる必要があるが、材料の磁束密度や電流密度といった物性限界を改善することは材料の進化に頼らざるを得ない。本研究においては、付帯部品の増加を伴わず既存の材料を用いて形状的にトルク密度を向上させる新規のアキシアル型モータの構造とその製法について検討する。

モータの発生トルクは、トルクの発生面の面積およびトルク発生面での磁束密度によって決定される。制限された空間内でトルクの発生面積と磁束密度を向上させる構造をとることにより、同一体積でも発生トルクを向上させることが可能となる。従来のモータでは、ロータがステータ内部に配置されるラジアルギャップ型と呼ばれる構造をとっているため、トルクを発生するロータ表面積およびロータ内磁石の配置に制約があり、容積トルク密度向上の課題となっている。本稿では、

(1) 対向アキシアル型モータ構造によるトルク発生面の面積拡大

* 四輪 R&D センター

(2) 磁気レンズ効果を有するハルバッハ型磁石配置の二つの技術を組み合わせることで、モータの容積トルク密度向上をねらう。

2. 対向型アキシアルギャップモータの特徴

2.1. ラジアルギャップ型との違い

Fig. 1 に従来のラジアルギャップモータおよびアキシアルギャップモータのトルク発生面を示す。ラジアルギャップ型モータにおいては、トルクを発生する鎖交磁束面は円筒形ロータの表面であり円環形状となる。これに対して、アキシアルギャップ型モータの場合、ステータとロータが軸方向に対峙し、鎖交磁束面は円盤状の形となる。さらにロータの両側にステータを配置する、あるいはステータの両側にロータを対向して配置することで、トルク発生面の面積を2倍にすることができる。さらにこの場合、ロータコアのバックヨーク部あるいはステータコアのリターンパス部を省けるので、軸寸法は2倍より短く作ることができ、容積当りのトルク密度を向上することが可能である⁽¹⁾。

2.2. 両面ハルバッハ型 IPM モータ

前述のようにモータトルクはトルクの発生面の面積とその表面磁束密度で決定される。本研究では、トルク発生面の面積を増加させる対向アキシアルギャップ型構造を選定した。そこでトルク発生面の磁束密度を高め、より高いトルク密度をねらうため、磁石の配置をハルバッハ型磁石配

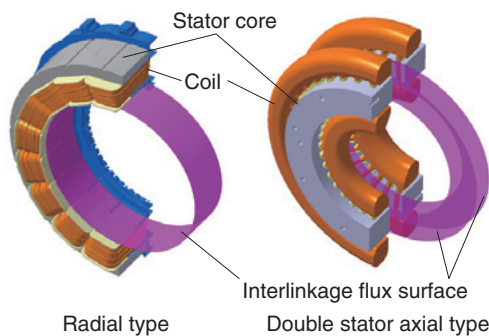


Fig. 1 Interlinkage flux surface

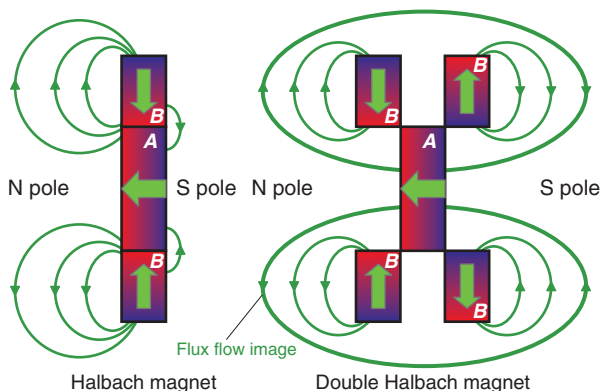


Fig. 2 Double Halbach magnet arrangement

Table 1 Specifications

	IMA motor	Axial motor
Number of poles	12	12
Magnet	Nd-Fe-B	Nd-Fe-B
Stator diameter [mm]	258	258
Rotor diameter [mm]	179	220
Motor length [mm]	80	88
Volume [L]	4.2	4.6

置とすることとした⁽²⁾⁻⁽⁴⁾。

アキシアル型の場合、通常一つの極内に着磁方向と軸方向が一致するように磁石を配置し、隣の極には180度向きを変えた磁石を配置する。この繰り返しでN極S極が交互に連続するロータとなる。これに対して、Fig. 2のように着磁方向が直角となるように配置することで、片側の磁束が強められる磁気レンズ効果を使い、Fig. 3のように、その効果がロータの両面に発揮されるようなダブルハルバッハ型磁石配置とした。

また、ステータと対向する主磁石の軸方向両側には磁気抵抗の小さい電磁鋼板を配置し、主磁石と補助磁石に囲まれた空間には、非磁性材からなるロータの保持部材(フレーム)を配置する構造とした。これにより、ステータ側へ通る磁束を強めると共に、磁石が埋め込まれた Interior Permanent Magnet (IPM) ロータとした。

2.3. トルク密度の検証

トルク作用面の面積拡大と磁束密度向上によるトルク密度向上効果を確認するために、試作機を設計製作した。Fig. 4に示すように2006年モデルCIVIC IMA用のモータと同じ6極対で、外径サイズも同じである。詳細仕様をTable 1に示す。

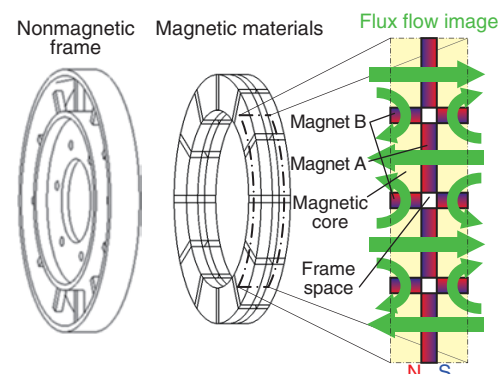


Fig. 3 Double Halbach-type rotor structure

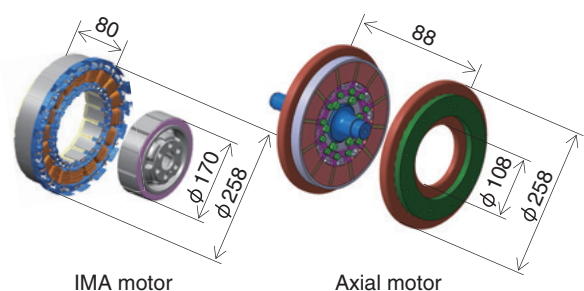


Fig. 4 Motor dimensions

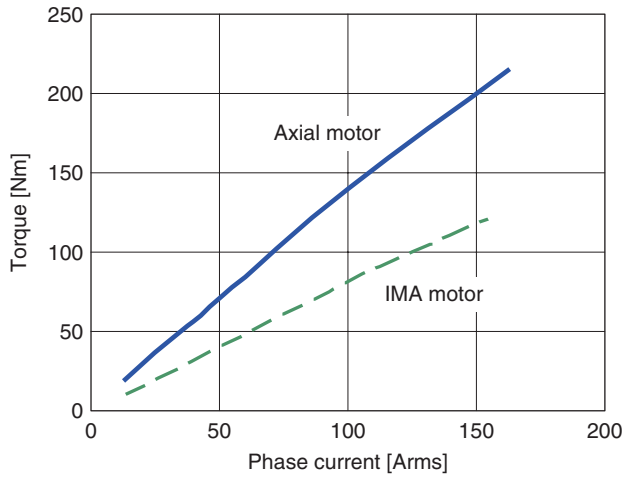


Fig. 5 Comparison of current-torque characteristics

試作したモータのトルク特性を実測した結果を Fig. 5 に示す。発生トルクを比較すると、1.63 倍のトルクを発揮することが確認できた。容積トルク密度は、従来ラジアルギャップモータの 1.48 倍、磁石の使用量を換算した比較でも、1.22 倍となっており、対向アキシャルモータ型は、ラジアル型に比べ、トルク密度を大きくできることが確認できた。

3. 製法を考慮したロータ構造の改良

3.1. ロータの課題

ラジアル型モータの磁石埋め込み方式である IPM ロータの場合、磁気回路は軸方向では変化せず、2 次元的な磁気回路となるため、ロータヨークは薄板電磁鋼板を打抜き積層し、回転支持とトルク伝達をおこなうシャフトにそれを圧入等で固定するのが一般的である。磁石の入る部分も打抜き成形しておくことで、積層した後に磁石を保持する空間ができる。したがって、磁気特性と機械的強度を両立した形状で電磁鋼板を打抜き成形すれば良いので、製法的に大きな課題はない。

それに対して、アキシャル型のロータには以下の三つの課題がある。

- (1) 3 次元磁路ヨークの材料選定とその成形
- (2) 非磁性強度部材（ステンレス材）の加工性
- (3) 磁気回路部材と強度部材の固定一体化

Fig. 6 にトルク特性計測のために製作したロータの構造を示す。アキシャル型モータ用の磁石の成形や着磁に特別な課題はないが、ロータ磁気回路は径方向で同一ではなく 3 次元磁気回路となるため、磁路を構成するヨークをどのように作るかが課題 (1) である。3 次元磁路に用いるヨーク材料としては、一般的に圧粉材や焼結材があるが、積層電磁鋼板に較べると鉄損が大きいため、本研究では電磁鋼板を選択した。薄板電磁鋼板でアキシャル型ロータ用 3 次元磁路を構成する際に、薄板電磁鋼板を同心円状に積層す

る形が渦電流の発生を最も抑制できる。しかしながら、軸方向に着磁された主磁石と同様な扇型とするためには、1 枚 1 枚周方向の長さや曲率が異なる電磁鋼板を積層する必要がある。これには長さ寸法違いの抜き型と曲率成形プレス加工が必要となる。他の製法として、擬似同心円形状となるが、フープ状に巻かれ接着固定された素材から、ワイヤーカットなどの各層間の絶縁を確保できる加工方法で扇型に切り出すというやり方もある。いずれにしても、ラジアル型ロータのヨークに較べると大量生産には適さない製法といわざるを得ない。

課題 (2) は、回転体としての強度と剛性を確保するための部材（フレーム）の加工性である。フレーム部材に磁束が通りやすいとロータ内での磁束短絡が生じ、トルクに寄与しない磁束が増加することになるため、非磁性材を使用する必要がある。一般的な非磁性材料として、軽量で加工もしやすいアルミ合金材があるが、限られた空間（寸法）で必要な剛性を確保できないため、オーステナイト系ステンレス材⁽⁵⁾を採用した。しかしながら、難加工材であるこの材料で、Fig. 6 に示すような細いスポーク状の部位を持つ寸法精度の良い部品を一体成形するには削り出し加工が必要となる。これも、大量生産には適さない製法である。

課題 (3) は極ごとにはばらばらに成形された磁石とヨークを回転体とするために強度部材であるステンレスフレームに一体化固定する方法である。寸法公差を許容した組立構造とすると、隙間のある組木細工のようなものとなるため、隙間を充填する接着固定となる。しかしながら、高速回転時のフレームの弾性変形や運転によるロータの温度上昇の条件に適合する接着材は現時点では見当たらないため、電動車両用途には適さないモータとなる。

3.2. ロータ課題の解決手法

これら三つの課題を解決するために、ロータヨークをノッチングプレスによる捲回巻成形後に磁石を挿入して磁気回路部を一体化する。また、その外周側をアルミダイキャストで加圧して固定したものに遠心力強度を担う外周リングを締め代嵌合する多重円環圧入構造を開発した。

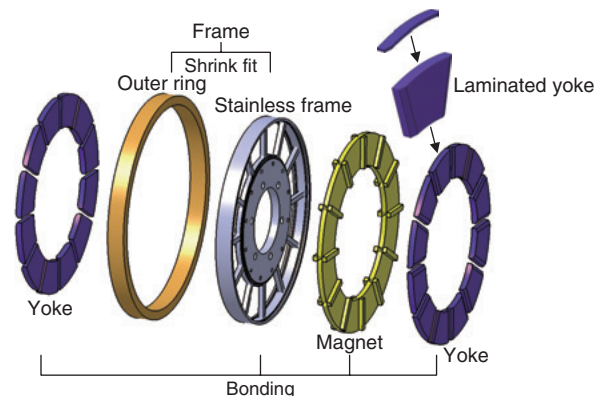


Fig. 6 Bonded fragment structure

3.2.1. 積層鋼板捲回巻ヨーク

ロータヨークは、トルク密度向上を確認した試作機の形状から、誘起電圧波形を正弦波に近づくように改良するため、補助磁石に接する角部に面取りを施したものに变更した。そのヨーク形状をベースに、必要最小限の連結部と補助磁石保持用のつめ部を設けた形状 (Fig. 7 右図) で、ノッチングプレス捲回巻製法を採用した。

Fig. 8 に示すように、ロータヨーク幅にそろえられたフープ状の素材から、磁石挿入部および非磁性ピン挿入部をパンチで抜いたものを巻きつけて両側のヨークを一度に

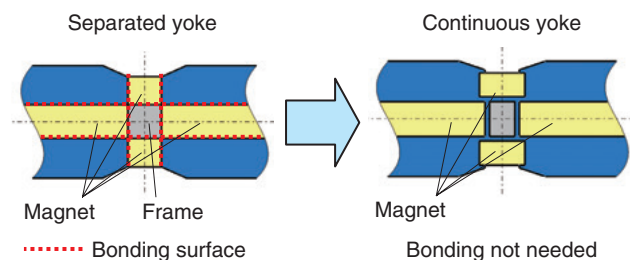


Fig. 7 Change in yoke structure

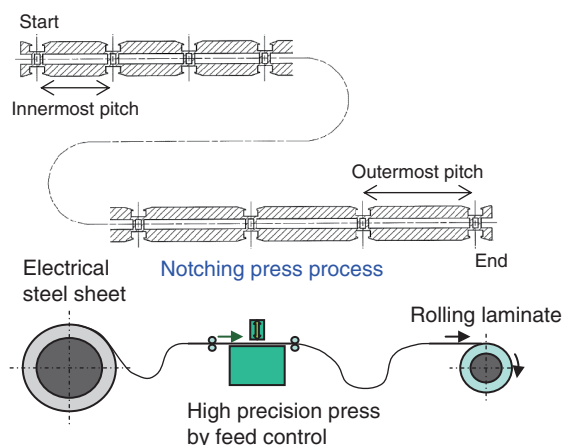


Fig. 8 Yoke manufacturing process using notching press

形成していく。主磁石挿入部およびヨークが扇型になるように、内径側の周長は短く外形側の周長は長く、一抜きごとに送り量 (ピッチ) を高精度に制御しながら連続的に抜きと捲付けを進めていく。捲回巻で成形されたヨークの写真を Fig. 9 に示す。

3.2.2. 多重円環圧入構造

上記の捲回巻で成形するヨークとともに非磁性部材でできた内側リングと外周リングで概略3層の多重円環圧入構造を設計し、回転強度と剛性を確保することにした。

Fig. 10 にその組立工程を示す。最終的な外周リングの圧入 (焼ばめ) 工程の前に、積層ヨークの外周面にアルミダイキャストによってアルミ層を設ける。これには以下のような効果がある。

- (1) 加圧による積層体の固定
- (2) 外周層変形 (アンカー効果) による磁石の固定
- (3) アルミ層加工で外径寸法管理容易化

これらの効果により、回転強度、スラスト剛性、トルク伝達に必要な各層の面圧を確保することが可能となり、接着材の強度に頼る必要のないロータを製作することができた。

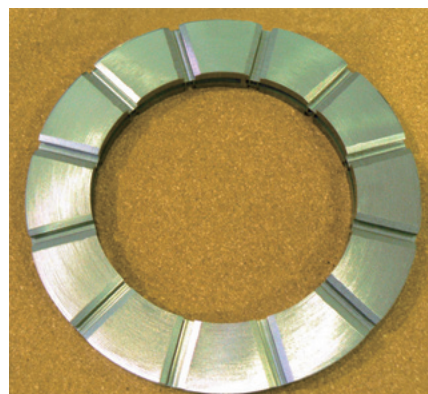


Fig. 9 Laminated roll yoke

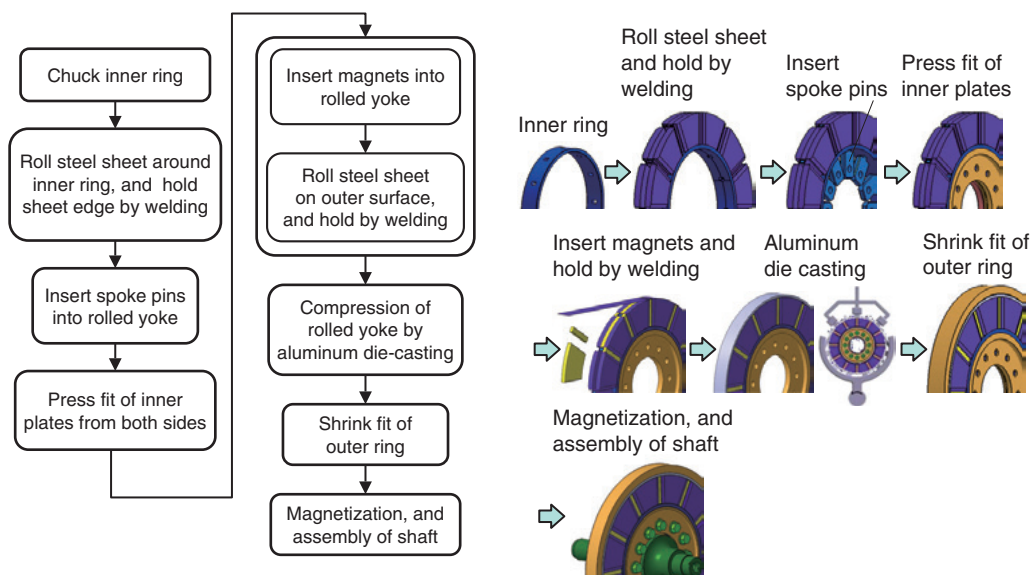


Fig. 10 Rotor assembly process

3.3. 強度と剛性の確認

試作した多重円環圧入型ロータで、回転強度、スラスト剛性、ねじりトルク剛性を実測したものをそれぞれ Fig. 11, Fig. 12, Fig. 13 に示す。

まず回転強度については、ステンレス材外周リングの外径の変形量を測定し、弾性変形範囲を超えない回転数を確認することとした。その結果、想定する最高回転数 6,500 rpm に対して、1.85 倍にあたる 12,000 rpm であっても弾性変形領域にあり、十分な強度を確保できていることが確認できた。

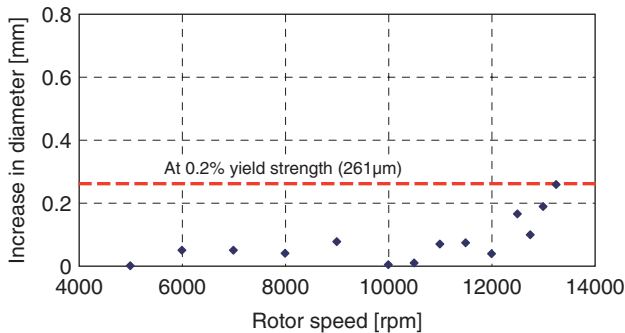


Fig. 11 Rotational strength

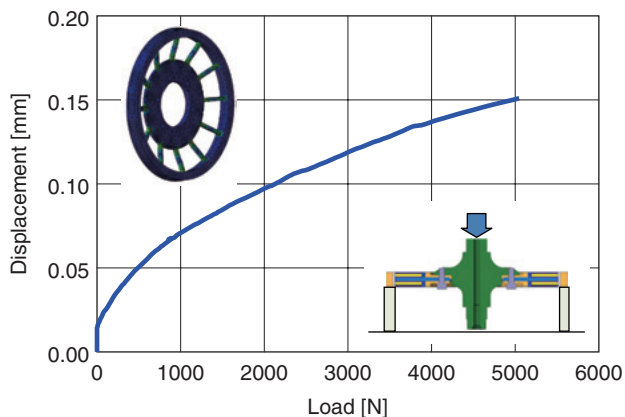


Fig. 12 Thrust stiffness

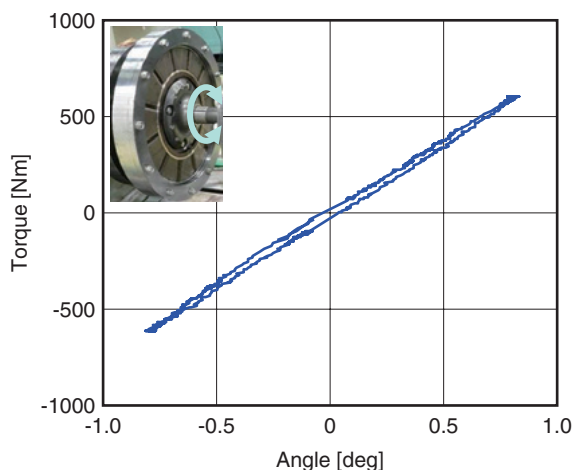


Fig. 13 Torsional stiffness

Table 2 Comparison of losses

	Bonded rotor	Rolled rotor
Iron loss [W]	692	630
Copper loss [W]	483	518
Motor loss [W]	1175	1148

次にスラスト剛性については、外周リングを固定しシャフトにスラスト力を加えた（集中荷重相当の）ときの変位を測定した。最大スラスト力 5,000 N 時の変位は 0.15 mm であり、最低エアギャップ幅 0.6 mm に対して十分小さくなっている。さらに磁気吸引力によってロータに作用するスラスト荷重はヨーク表面に分布荷重として作用するため、CAE 計算上、シャフトにスラスト力を加えた場合の 62% の変位に収まると考えられ、十分な剛性が確保されていることが確認できた。

ねじりトルクに対する剛性は、最大トルク 200 Nm に対して 3 倍の 600 Nm の両振りトルクをかけても不連続な挙動は発生しなかった。したがって、トルク伝達に対しても、十分な剛性と強度を有することが確認できた。

3.4. トルクと効率の確認

組木細工構造ロータに対して、回転体構造信頼性を向上させたこの多重円環型ロータの単位体積あたりのトルク特性を Fig. 14 に示す。捲回巻ヨークとするために設けた連結部からの磁束短絡と、補助磁石サイズ縮小による磁石表面積低下によって、誘起電圧は 11% 低下しており、その低下度合いにほぼ比例しただけトルク特性が変化している。図からわかるように対向アキシシャルギャップ型モータのトルク密度の向上分は 2006 年モデル CIVIC IMA 用モータに対して、1.34 倍であることが実証できた。また、Table 2 は代表的な運転条件でのモータ損失比較である。トルク定数低下による銅損増加分と鉄損低下分が相殺され、モータ損失はほぼ同等となることが確認された。

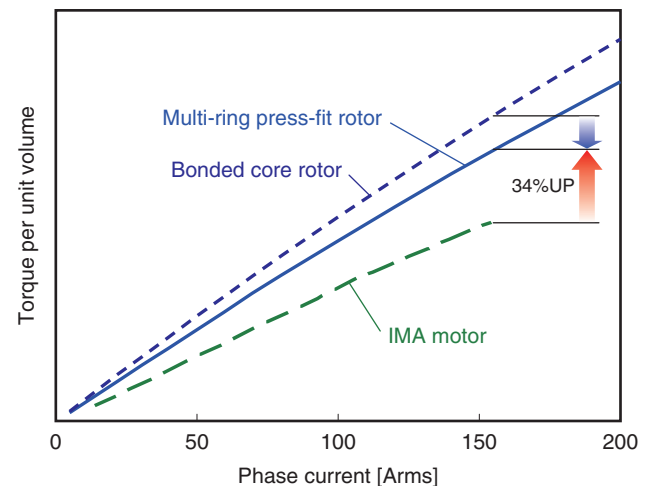


Fig. 14 Comparison of current-torque characteristics per unit volume

4. まとめ

モータの高トルク密度化をねらい、トルク発生面を二つ持つ対向アキシアルギャップ型モータの研究をおこなった。これまでのラジアルギャップ型モータと同様に、ロータはIPM型構造を採用し、実機の試作から性能評価をおこなった。その結果、ラジアルギャップ型に比べ体積あたりのトルク密度が向上することを確認した。

また、ロータの強度と剛性に課題を有するアキシアルギャップ型モータにおいて、電磁鋼板捲回巻ヨークとアルミダイキャストと非磁性リングを組み合わせ、構造信頼性の高いロータ構造を設計し実機にてその効果を確認した。

参考文献

- (1) Aydin, M., Huang, S., Lipo, T. A.: Axial Flux Permanent Magnet Disc Machines: A Review, In Conf. Record of SPEEDAM, p.61-71(2004)
- (2) Halbach, K.: IEEE, Trans., NS26 (1979), 3882, NIM169 (1989) 1 NIM 187 (1981) 109 NIM198 (1982) 213
- (3) http://www.pasj.jp/web_publish/lam28/proceedings/WP-45.pdf
- (4) 森本茂雄, 上野智広, 武田洋次: 埋込磁石構造PMモータの広範囲可変速制御, 電気学会論文誌D 産業応用部門誌, 第114巻6号, p.668-673(1994)
- (5) 日本工業規格 JIS G4304:2005, 熱間圧延ステンレス鋼板及び鋼帯

■ 著 者 ■



阿部昇栄



井上順二



石川 聡