

技術資料

Technical Data

ネオジム熱間加工磁石の形状／配向制御技術を活用した
自動車駆動用埋込磁石同期モータの設計検討高橋龍司^{*1}, 日南田純平^{*1}, 加納善明^{*2}Design Studies on an Interior Permanent Magnet Synchronous Motor
with Shape- and Orientation-Controlled Hot-Deformed Neodymium
Magnets for Automotive Traction Drives

Ryuji TAKAHASHI, Jumpei HINATA and Yoshiaki KANO

Synopsis

This paper presents a design study of an interior permanent magnet synchronous motor (IPMSM) for automotive traction applications using shape- and orientation-controlled hot-deformed Nd-Fe-B magnets. Crescent-shaped magnets arranged along the vector potential contour lines, that occur only when excitation with q -axis current is applied to a uniform-permeability rotor, are used to enhance reluctance torque. In addition, the controllability of the magnet shape and magnetic orientation inherent to hot-deformed magnets is used to improve demagnetization resistance under high-temperature conditions. The motor performance and demagnetization characteristics were evaluated using two-dimensional finite element analysis assuming automotive operating conditions. The results showed significant improvements in maximum torque and output power compared with a reference motor. Furthermore, the results of experimental tests using a prototype motor demonstrated good agreement with the analytical results, confirming the effectiveness of the proposed design approach.

1. 緒言

近年、地球温暖化の深刻化を背景として、各国で温室効果ガス排出削減の取り組みが加速している。日本においても2050年カーボンニュートラルの実現を目標に産業構造の転換が進み、運輸部門では電動化が急速に進んでいる¹⁾。これに伴い、自動車メーカー各社から、モータによる電気駆動を採用したハイブリッド車(HEV)や電気自動車(EV)、プラグインハイブリッド車(PHEV)など低環境負荷対応車が市場投入されている。その駆動源となるモータには、車両の駆動力特性・燃費性能を満

足しつつ低コスト化が求められている。

電動車用モータの高性能化・低コスト化を両立するにはトルク密度の向上が重要であり、その手段として、磁石トルクに加えてリラクタンストルクを活用できる埋込磁石同期モータ(以下、IPMSM)が広く採用されている。

自動車駆動用途では、マグネットトルクはインバータ主回路保護の観点から制限されるため、リラクタンストルクの増加が性能向上に大きく寄与する。リラクタンストルクの増加には、 q 軸電流のみを通電した場合に生じるFig. 1の等ベクトルポテンシャル線に沿ってフラックスバリアを配置(同図では、一例として1極あたり3層

2026年3月31日 受付

* 1 大同特殊鋼(株)技術開発研究所 (Corporate Research & Development Center, Daido Steel Co., Ltd.)

* 2 大同大学, 工博(Dr. Eng., Department Electrical and Electronic Engineering, Daido University)

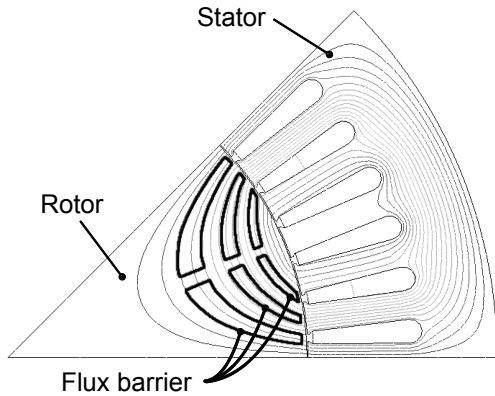


Fig. 1. Vector potential contour lines.

配置)し、同バリア内に磁石を配置するロータ構造が望まれている。しかしながら、現在、自動車駆動用として採用されている IPMSM の多くは、直方体の希土類焼結磁石の使用を前提に多角配置としたロータ構造が多い。この理由は、焼結法で大量に生産が可能で安価に製造できるためであるが、モータ特性の観点では、最適なロータ形状を用いているとは言い難い。

このような背景のもと、筆者らはリラクタンストルク向上の実現に向け3層逆円弧配置の新しいロータ磁気回路形状を提案し、同一モータ体格・電源仕様の下での直方体状磁石を搭載した比較対象機に対し、最大トルク約10%増、最大出力および定出力ライン20%以上の向上を実現した実機特性を示した²⁾。

他方、当社ではNd-Fe-B熱間加工磁石の製造プロセスにおけるネットシェイプ成形技術の開発を進めている。熱間加工磁石は塑性加工により金型断面がそのまま磁石の横断面形状となるため、三日月形状を含む異形状磁石を比較的高い歩留まりで製造することが可能である³⁾。また、金型設計に応じて配向方向に自由度を与えることができるため、焼結磁石では実現が難しかった磁石形状と配向方向を組み合わせた磁気回路設計に対応でき、モータ設計における自由度を拡張できる点に特徴がある。一方で、重希土類フリーの熱間加工磁石は、微細組織に起因して比較的高い保磁力を有するものの、重希土類元素で粒界改質した焼結磁石と比べると保磁力が低く、高温環境下での逆磁界による減磁リスクに配慮する必要がある。したがって、材料特性に加えて、磁石形状・配置・配向を工夫した減磁抑制設計が不可欠である。

本稿では、HEV駆動用モータをリファレンスとし、文献2)の検討内容を踏まえつつ、熱間加工磁石の形状・配向制御技術を活用してリラクタンストルクをより効果的に利用できるロータ構造を検討した。具体的には、三日月形状磁石と配向制御を組み合わせることで、リファ

レンスモータ比で最大トルク10%以上の向上を目指すとともに、減磁抑制設計により十分な耐減磁性を確保できることを示す。さらに、設計形状に基づき試作機を製作し、リファレンスモータと同一条件での実機試験により、提案磁気回路構造の有効性を検証した結果を紹介する。

2. リファレンスモータと設計目標値

2.1 リファレンスモータ諸元

Table 1 および Fig. 2 にリファレンスモータの仕様と概略図を示す。同モータは、市販の自動車駆動用モータを想定した8極48スロット分布巻IPMSMであり、ロータ構造は重希土類元素を添加した直方体のNd-Fe-B焼結磁石をロータ内部に多角配置した構造である。設計検討では、同モータの仕様および性能を基に設計における制約条件と目標値を定める。形状制約として、ステータ外径、ロータ外径、コア軸長およびエアギャップ長はリファレンスモータと同一の $\phi 210$ mm, $\phi 137$ mm, 79 mm および0.75 mm とする。磁石は試作を考慮し、熱間加工磁石を使用した(Br-R.T.: 1.34T, Hc_J-R.T.: 1675 kA/m)。

Table 1. Specifications of the reference motor.

Item	Value	Unit
Stator outer diameter	210	mm
Rotor outer diameter	137	mm
Stack length	79	mm
Air gap length	0.75	mm
Number of stator slots	48	-
Number of rotor poles	8	-
No. of winding turns	6	turns
DC link voltage	600	Vdc
Max. phase current	180	Arms
Magnet type	Hot-deformed Nd-Fe-B	-
Br @R.T.	1.34	T
Hc _J @R.T.	1675	kA/m

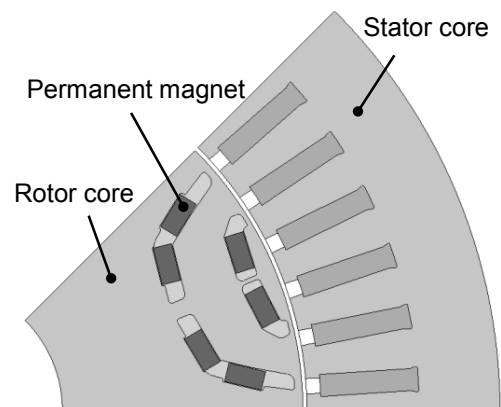


Fig. 2. Cross-section of the reference motor.

電源条件は最大電流 180 Arms, インバータ直流電圧 600 V_{dc} とした. 制御方式は, 基底回転数までは正弦波 PWM 制御, それ以降の高速回転域は 1 パルス制御を適用する. 磁石の耐減磁性の評価は, 磁石温度 180 °C における減磁率で評価する. 磁石の許容温度 180 °C は, 自動車駆動用モータの巻線に一般的に用いられる絶縁規格 H 種の温度限界を考慮して決定した⁴⁾. 減磁率は, 磁石に巻線電流による逆磁界を印加し, その前後における無負荷時(無通電時)の誘起電圧基本波振幅の減少割合で評価する. 同評価における巻線への通電条件は, 磁石への逆磁界が最も大きくなる d 軸負方向最大電流 (180 Arms, 電流位相角 90 deg.) とした.

リファレンスモータの性能把握および設計検討には, 計算時間に優れる二次元有限要素非線形磁場解析 (2D-FEA), 解析ソルバとして, JSOL 社製 JMAG-Designer 23.1 を使用した.

2. 2 設計目標値

Fig. 3 に磁石温度 75 °C におけるリファレンスモータの回転数—トルク特性および回転数—出力特性を, Fig. 4 に磁石温度に対する減磁率を解析した結果を示す. Fig. 3 および Fig. 4 より, リファレンスモータの最大トルクおよび最大出力はそれぞれ 179.7 Nm, 104.8 kW で, 磁石温度 180 °C における減磁率は 1.2 % であることがわかる. この結果から設計目標値を以下のように設定した.

- (1) 最大トルク ≥ 197.7 Nm (+10 %)
- (2) 最大出力 ≥ 104.8 kW
- (3) 180 °C 環境下における減磁率 ≤ 0.5 %

3. 形状／配向制御磁石を有効利用した IPMSM の設計

3. 1 リラクタンストルクを最大化する磁石形状の検討

IPMSM のトルク式は (1) 式で表され, 右辺第 1 項は永久磁石磁束と q 軸電流による磁石トルク, 第 2 項がロータの突極性に起因するリラクタンストルクである⁵⁾.

$$T = p_n \Phi_m i_q + p_n (L_d - L_q) i_d i_q \dots\dots\dots (1)$$

ここで, p_n : 極対数, Φ_m : 磁石磁束, i_d , i_q : d, q 軸電流, L_d , L_q : d, q 軸インダクタンスである.

同一電源条件で磁石トルクを増加するには, 磁石の残留磁束密度 Br の向上もしくは磁石量の増加が必要となり, モータの材料コストが増加する. 一方, リラクタン

ストルクは, 磁石を挿入するフラックスバリアの形状および配置によって決まるため, 材料コストを増やさずに高トルク化を実現できる. Fig. 5 (a) は透磁率が均一なロータに q 軸電流にのみ通電した際のフラックスラインで, 緒言で述べた通り, このフラックスラインに沿ったフラックスバリアを配置し, 同バリア内に磁石を配置すれば, (1) 式中の L_q を高くでき, リラクタンストルクを最大化できる.

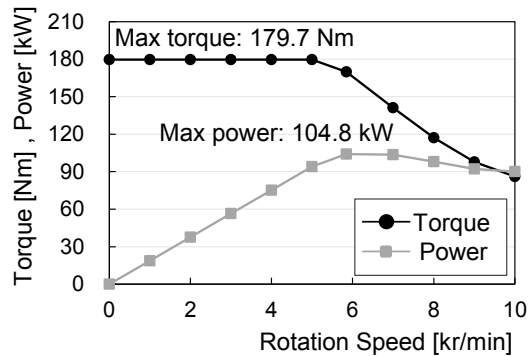


Fig. 3. Torque and power vs. rotation speed characteristics of the reference motor.

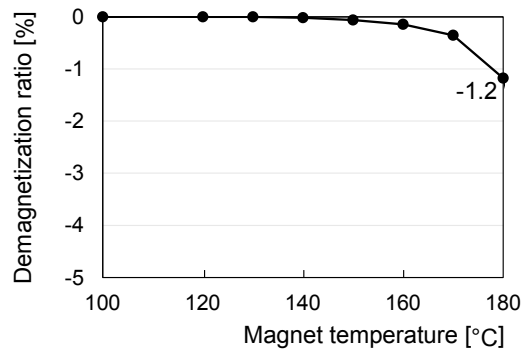


Fig. 4. Demagnetization ratio vs. magnet temperature characteristics of the reference motor.

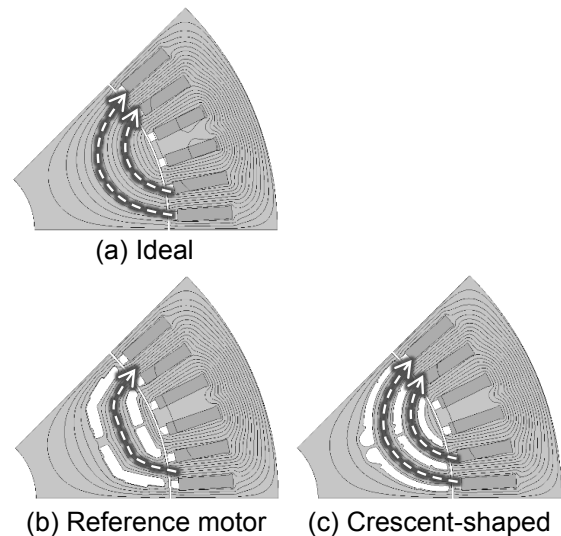


Fig. 5. Flux lines under q-axis current only.

リファレンスマータでは、直方体磁石の使用が前提のため、Fig. 5 (b) のようにフラックスバリアが多角配置となっており、Fig. 5 (a) の磁束の流れを妨げる箇所が存在する。

このため、磁束が局所的に飽和する箇所が発生し、リラクタンストルクの最大化が難しい。これに対し、当社の熱間加工磁石は、その製法から自由度の高い断面形状を実現でき、Fig. 5 (c) に示すようなフラックスラインに沿った三日月状の磁石を加工レスで製造することが出来る。従って、同図中の磁石形状とフラックスバリアを用いることで、リラクタンストルクの最大化が期待できる。

3. 2 三日月状磁石によるトルク向上効果

Fig. 6 は、ロータのフラックスバリア層数を3層に固定した下で、磁石形状を矩形、円弧、三日月状とした場合の最大トルクを比較した結果である。リラクタンストルクの活用を最大にするには、フラックスバリア層数も設計パラメータの一つとなるが、文献2)の検討結果から、自動車駆動用途のモータ外径において、最もリラクタンストルクを向上できる層数は3層であることから、本稿では3層構造を採用した。各磁石の磁化方向は、矩形は平行方向、円弧・三日月形状は磁石内径の中心点を焦点としたラジアル方向とした。Fig. 6 中段は最大トルク発生時の磁束密度分布を示しており、矩形磁石は円弧・三日月形状磁石に対し、磁石層間の距離が狭

く、ポイント1の磁気飽和が顕著となっている。円弧形状磁石はフラックスラインに沿った磁石配置により、ポイント1の磁気飽和を緩和できているが、ポイント2のロータ外周部で、磁気飽和が発生している。これに対し三日月形状磁石は、

- ・ロータ外周部に近い程、フラックスバリアおよび磁石が薄肉となる構造
- ・円弧形状磁石と同様にフラックスラインに沿うように磁石を配置できる

ため、ポイント1および2の磁気飽和を緩和できる。その結果、Fig. 6下段に示すように三日月形状磁石は矩形形状磁石に対して、最大トルクを7%増加できる。そこで、次節以降では三日月形状磁石の使用を前提に、想定される課題の解決とトルク向上を実現するロータ構造を設計した結果について述べる。

3. 3 三日月形状磁石適用時の課題

Fig. 7 は、リファレンスマータおよび三日月形状磁石（配向：ラジアル方向）を適用したIPMSMを対象に、減磁率を解析した結果である。磁石温度180℃における減磁率は、リファレンスマータの1.2%に対し、三日月形状磁石は2.9%と大きく、設計目標を満たしていない。この原因を調査するため、三日月形状磁石を搭載したIPMSMについて、磁石温度180℃におけるパーミアンス係数分布を解析した結果をFig. 8に示す。同図よ

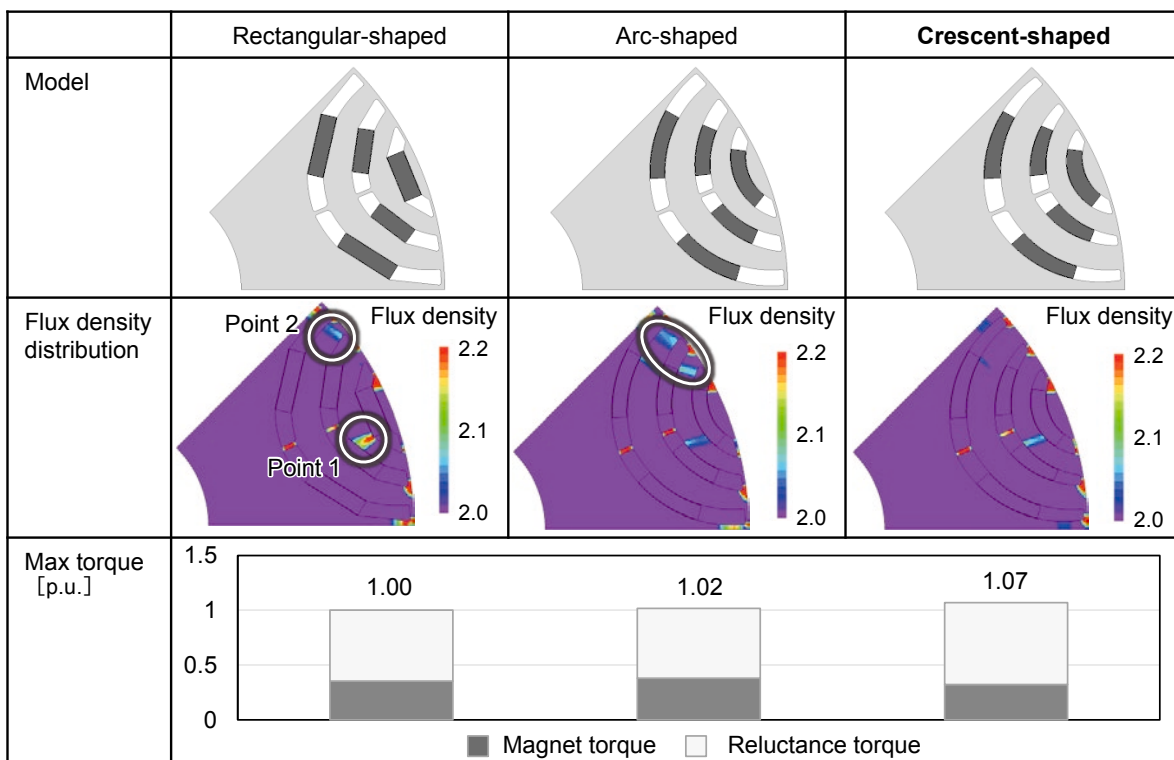


Fig. 6. Comparison of three-layer IPM motor configurations using different magnet shapes.

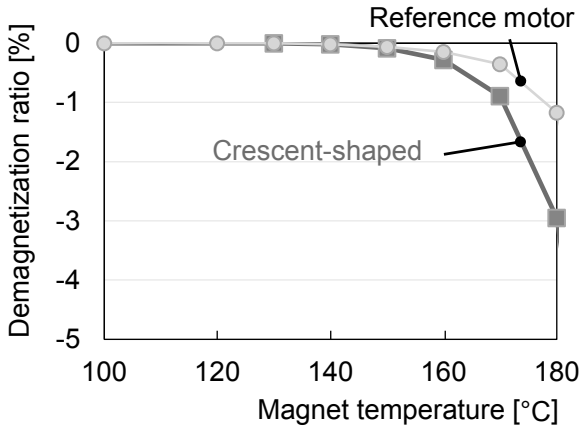


Fig. 7. Demagnetization ratio vs. magnet temperature characteristics.

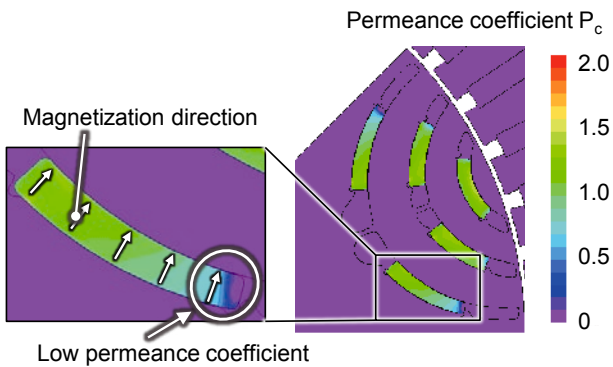


Fig. 8. Permeance coefficient of the three-layer IPMSM with crescent-shaped magnets.

り、3層目の磁石端部（ロータ外周部側）のパーミアンス係数が0.7以下となっており、磁石温度180℃において、不可逆減磁が生じている。これは、巻線への通電により逆磁界が印加された状態において、磁石端部を薄肉化したことによりパーミアンス係数が低下した結果である。次節では、この課題に対する解決策を検討する。

3. 4 磁化方向制御による耐減磁性向上

本稿では、三日月形状磁石の磁石端部におけるパーミアンス係数を高める方法として、熱間加工磁石の特徴である配向制御に着目した。熱間加工磁石は、加熱して異方成長した結晶粒に対し塑性加工を加えることで、圧縮方向に対して磁化容易軸であるc軸を揃えることができる。したがって、圧縮方向を制御することで、磁化方向に自由度を与えることが可能となる。

Fig. 9は、3層目の磁石にかかる逆磁界のベクトルを解析した結果である。解析では、磁石を空気に置換することで、巻線起磁力によって生じる磁石への逆磁界のみを表現している。同図より、磁化方向を前節までで検討したラジアル方向とした場合、逆磁界ベクトルの方向が

磁化方向と対向するため、逆磁界の影響を大きく受け、減磁が発生しやすい。

一方、Fig. 10はフラックスバリアの厚みをFig. 9と同一にしたまま、磁石端部の角度をラジアル方向から傾斜させつつ端部の磁化方向も端部の角度に合わせて傾斜させている。このようにすると、磁石端部において磁化方向と逆磁界の方向が180度の対向角度からずれるため、逆磁界の影響を受け難くなり、耐減磁性が向上する。加えて、磁化方向を傾斜さ Fig. 11は磁石端部の角度およ

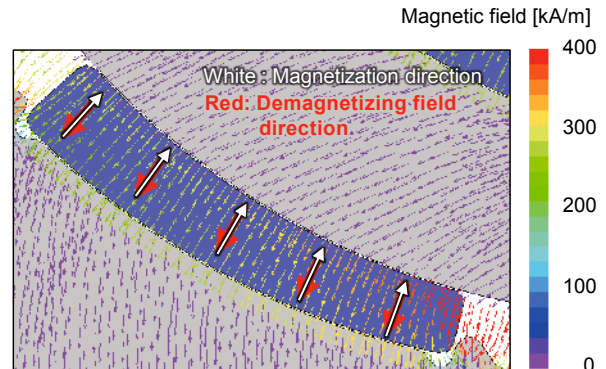


Fig. 9. Magnetic field vectors around the enlarged third-layer crescent-shaped magnet.

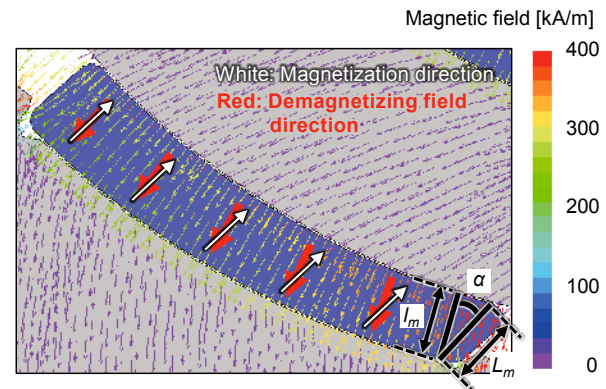


Fig. 10. Magnetic field vectors around the enlarged third-layer shape- and orientation-controlled crescent magnet.

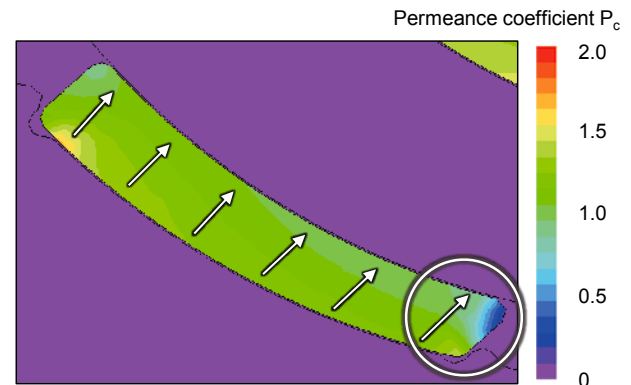


Fig. 11. Permeance coefficient inside the enlarged third-layer shape- and orientation-controlled crescent magnet.

び磁化方向を傾斜させたモデルを対象に、Fig. 8と同様の条件の下で解析したパーミアンス係数分布の解析結果である。同図より、磁石端部のパーミアンス係数がラジアル方向に対して高くなっていることがわかる。

3. 5 設計検討結果

Table 2 および Fig. 12 に設計したモータの磁石仕様および断面構造を示す。三日月形状磁石を3層に配置し、磁石端部の角度と磁化方向はラジアル方向に対して、約30度傾斜させている。なお、磁石の磁気特性および磁石量はリファレンスモータと同一とすることで、磁石形状、磁化方向、磁石配置の効果を表現できる設計仕様としている。

Fig. 13 に磁石温度 75℃における設計モータの回転数-トルク特性および回転数-出力特性の解析結果を示す。同図より、設計モータの最大トルクは 202.8 Nm で、リファレンスモータの最大トルク 179.7 Nm に対して 12.8%の向上を示した。さらに、設計モータの最大出力は 118.7 kW となり、リファレンスモータの最大出力 104.8 kW に対して 13.3%の向上を示し、最大トルクおよび最大出力の目標値をいずれも達成した。

Fig. 14 に減磁率の解析結果を示す。磁石温度 180℃に

Table 2. Magnet specifications of the reference and designed motor.

Item	Reference	Designed	Unit
Magnet type	Hot-deformed Nd-Fe-B	←	-
Br @R.T.	1.34	←	T
HcJ @R.T.	1675	←	kA/m
Magnet shape	Rectangular	Crescent	
Orientation	Parallel	Controlled orientation	
Magnet volume	1	←	p.u.

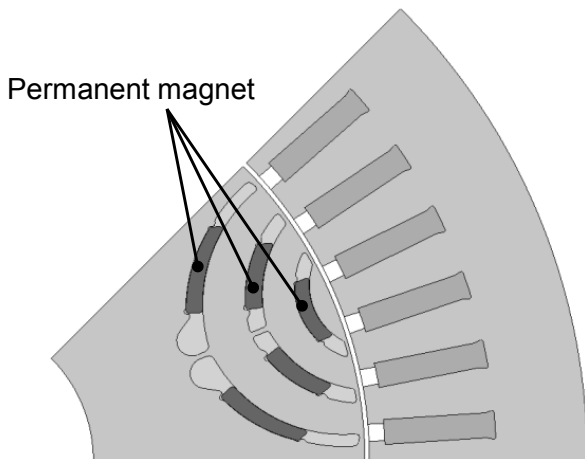


Fig. 12. Cross-section of the designed motor.

において、設計モータの減磁率は $\leq 0.5\%$ となり、磁石の磁化方向と磁石配置の最適化により、耐減磁性の向上が可能であることを確認するとともに、目標値も達成した。

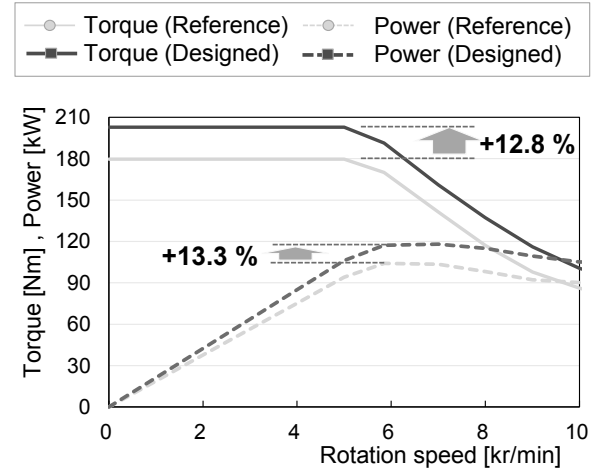


Fig. 13. Torque and power vs. rotation speed characteristics.

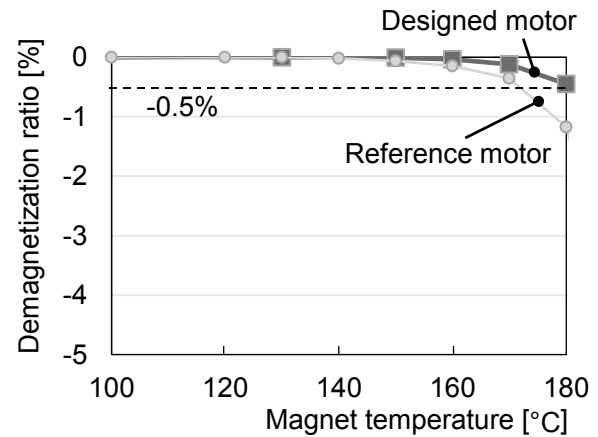


Fig. 14. Demagnetization ratio vs. magnet temperature characteristics.

4. 試作機実験検証

4. 1 設計ロータ外観

Fig. 15 は設計した三日月形状・磁化方向制御磁石挿入後のロータ外観である。試作ロータは、接着積層した電磁鋼板ブロックに対してワイヤ放電加工を施すことにより製作した。実験検証にあたっては、フラックスバリア部に着磁済の磁石を挿入した後、エポキシ樹脂を充填している。なお、リファレンスモータについても設計ロータと同一の製作方法によりロータを製作し、フラックスバリアには、同一の磁気特性を有する矩形・平行方向の熱間加工磁石を挿入している。

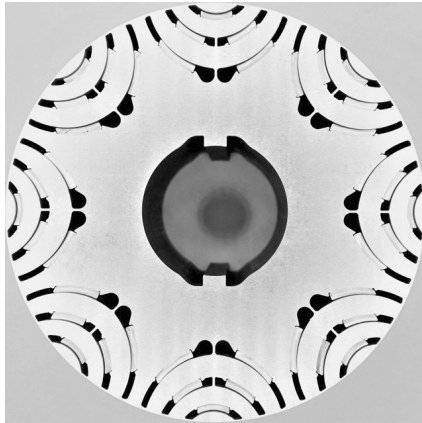


Fig. 15. Photograph of test rotor.

4. 2 試験装置

Fig. 16 は最大出力 400kW まで測定可能な当社保有のシンフォニアテクノロジー社製の大容量モータ評価装置であり⁶⁾、本装置を使用してモータ性能試験を実施した。モータの駆動には、青山モータドライブテクノロジー社製の三相インバータ（入力電圧 850 Vdc、最大電流 615 Arms）を用いた。負荷試験では、キャリア周波数 10 kHz の PWM 制御にて電流ベクトル制御を行っている。試験モータは、エスベック社製の恒温槽（最大 180 °C）内に設置され、車載内部の温度を模擬した試験が可能である。

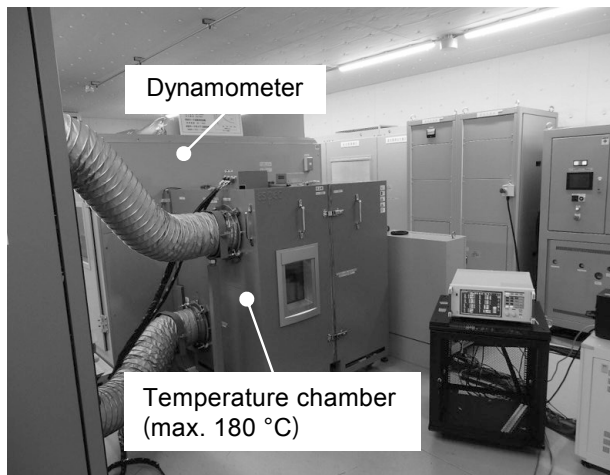


Fig. 16. Photograph of high-capacity dynamometer.

4. 3 モータ特性測定結果

Fig. 17 に恒温槽設定温度 75 °C における回転数 - トルク特性および回転数 - 出力特性の測定結果を示す。同図より、試作モータの最大トルクは 184.5 Nm で、リファレンスモータの最大トルク 163.2 Nm に対し、13.0 % の向上を達成した。試作モータの最大出力は 104.0 kW で、リファレンスモータの最大出力 93.7 kW に対し、11.0 %

の向上を達成した。Fig. 18 は Fig. 17 内に示すポイント 3 点の効率の比較である。ポイント 1 は自動車の市街地走行、ポイント 2 は登坂走行、ポイント 3 は高速巡行を想定している。ポイント 1 ~ 3 において、リファレンスモータに対し、効率向上を確認できた。これは、最大トルク増加に伴い、各ポイントのトルクを発生するために必要な電流を低減できたためと考えている。

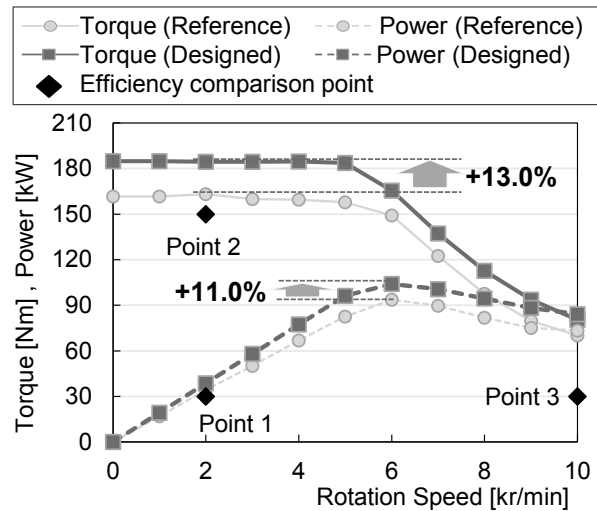


Fig. 17. Measured torque and power vs. rotation speed characteristics.

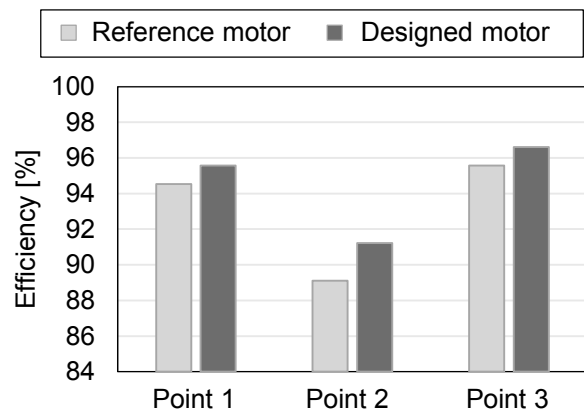


Fig. 18. Comparison of motor efficiency.

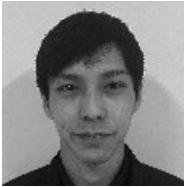
5. 結 言

本稿では、熱間加工磁石の形状・配向制御技術を活用した自動車駆動用 IPMSM のロータ構造を検討し、三日月形状磁石と磁化方向制御を組み合わせることで、高トルク化と耐減磁性の両立を図った。

解析および実機試験の結果、設計モータはリファレンスモータに対して最大トルク 13.0 % 向上を達成し、形状制御および配向制御の有効性を確認した。今後は、高温環境下での耐減磁性について実機検証を進める。

(文 献)

- 1) 経済産業省資源エネルギー庁: 自動車の“脱炭素化”
のいま(前編)～日本の戦略は? 電動車はどのくらい
売れている?
([https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteikyo/
xev_2022now.html](https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteikyo/xev_2022now.html), 2011-10-28)
- 2) 加納善明, 藪見崇生: 電学論 D, 140(2020), 4, 255.
- 3) 日置敬子: 粉体および粉末冶金, 69(2022), S3.
- 4) 日本産業規格: JIS C 4003:2010, 日本規格協会,
(2010), 4.
- 5) 武田洋次, 松井信行, 森本茂雄, 本田幸夫: 埋込磁石
同期モータの設計と制御, オーム社, 2001, 138.
- 6) 南山拓真, 日南田純平: 電気製鋼, 92(2021), 2,
125.



高橋龍司



日南田純平



加納善明