

高性能フェライト磁石の xEV向け主機モーターへの適用検討

Study on xEV Traction Motor Using High Performance Ferrite Magnets

相牟田 京平*
Kyohei Aimuta

菊地 慶子*
Keiko Kikuchi

釘持 茂**
Shigeru Kemmochi

西内 武司**
Takeshi Nishiuchi

高畑 良一***
Ryoichi Takahata

*
株式会社プロテリアル 研究開発本部
グローバル技術革新センター
Global Research & Innovative
Technology Center, R&D
Division, Proterial, Ltd.

**
株式会社プロテリアル 磁性材料事業部
Magnetic Materials Business
Unit, Proterial, Ltd.

株式会社日立製作所 研究開発グループ
グリーンインフライノベーションセンター
Research & Development Group,
Green Infrastructure Innovation
Center, Hitachi, Ltd.

今後生産量の急激な拡大が見込まれる電動自動車の主機モーターには、主に希土類磁石が利用されている。今後起こりうる重希土類原料の調達リスクを低減するため、重希土類原料を使用しないフェライト磁石の主機モーターへの適用可能性を検討した。フェライト磁石は希土類磁石対比で磁石特性が低く、モーターは低出力密度となるため、向上策を磁界解析で検討した。まず、高性能フェライト磁石(NMF®-15G)を適用し、マグネットトルクの低下を最小化しつつ、リラクタンストルクを大きくする磁石配置としてモータートルク減少を抑えた。本基本設計を基に、希土類磁石を適用したモーターと比較し、軸長を調整して同等トルクとした同回転数条件、最大回転数を増加させて出力密度を同等レベルにそろえた同体積条件を得た。これらの検討を踏まえ高性能フェライト磁石を適用したモーターを試作評価した結果、出力102 kWを得ることができ、電気自動車の主機モーターへの適用可能性を実証した。

In traction motors for electric vehicles, rare-earth magnets are mainly used. However, in order to reduce the procurement risk associated with heavy rare earths, here we consider the use of a high-performance ferrite magnet for traction motors. Since ferrite magnets have poorer magnetic characteristics than rare-earth magnets, and motors employing ferrite magnets exhibit a lower power density, it is necessary to improve their performance using a magnetic field analysis. In this study, a high-performance ferrite magnet (NMF®-15G) was used to minimize the reduction in magnet torque. The magnet position in the rotor was also optimized to increase the reluctance torque. Finally, the shaft speed and motor volume were optimized to achieve an output power density comparable to that for a motor using a rare-earth magnet. Based on this optimized design, a prototype motor using a ferrite magnet was constructed and evaluated. An output power of 102 kW was achieved, indicating that a traction motor suitable for electric vehicles could be successfully realized.

■ Key Words : 高性能フェライト, 主機モーター, 回転数
■ Production Code : NMF®-15 series

■ R&D Stage : Research

1. 緒言

気候変動の抑制に向けて、日本を含めた各国が温室効果ガス排出量の削減目標を定めるとともに、自動車メーカー各社においても自動車の電動化推進に向けた取組みが加速している。このような背景から、すでに広く普及している HEV (Hybrid Electric Vehicle) に加えて、BEV (Battery Electric Vehicle) や PHEV (Plug-in Hybrid Electric Vehicle) の生産量が急激に拡大しており、今後も大幅に増加することが見込まれている。

一般的に、これら電動自動車(以下、FCV (Fuel Cell Vehicle) なども含め xEV と呼ぶ)には、駆動モーター用の永久磁石として、ネオジム (Nd)-鉄 (Fe)-ボロン (B) 焼結磁石 (当社製品名: NEOMAX[®]) が活用されてきた。しかし、xEV の需要拡大により、Nd-Fe-B 焼結磁石の主原料である軽希土類元素の Nd や、重希土類元素の一種で耐熱性確保のために添加されるジスプロシウム (Dy)・テルビウム (Tb) の調達リスクや価格変動リスクが顕在化する可能性が指摘されており、現に2020年以降、希土類原料の大幅な高騰が起きている。

このような課題に対し、当社プロテリアルは、特に資源的な制約が大きな Tb の使用量を従来の省重希土類磁石よりも大幅に削減しながら高性能化を実現した Nd-Fe-B 焼結磁石 (NMX[®]-G1NH シリーズ) を開発¹⁾するとともに、従来希土類磁石が使用されてきた用途への高性能フェライト磁石の適用を提案している。本稿では、量産されている中で最高レベル (2023年8月現在、当社調べ) の磁気特性を有する当社の高性能フェライト磁石 NMF[®]-15 の xEV 主機モーターへの適用可能性について検討した結果を報告する。

2. フェライト磁石

2.1 フェライト磁石の特徴

現在工業化されているフェライト磁石は、1950年代以降に開発されたバリウム (Ba) フェライト磁石、ストロンチウム (Sr) フェライト磁石に代表される、六方晶のマグネトプランバイト構造を主相 (以下 M 相と呼ぶ) とする材料である。Ba フェライト磁石や Sr フェライト磁石は、化学式 $AFe_{12}O_{19}$ (または $AO \cdot 6Fe_2O_3$, A は Ba や Sr など, O は酸素) で記述される。この材料は、**図1** に示すように、マグネトプランバイト構造中の Fe の磁気モーメントがサイトごとに“上向き”または“下向き”となっており、

それぞれの磁気モーメントの差分が磁化として取り出されるフェリ磁性の材料であり、このような特徴から、この磁石の残留磁束密度 (B_r) は、本質的に希土類磁石よりも低い値になる。一方、この磁石は保磁力 (H_c) とのバランスがよいことや、 H_c の温度係数が正、すなわち、高温側で H_c が向上すること、電装用モーターに適したアーク形状などの製品を大量生産できる粉末冶金プロセスが適用できること、化学的安定性が高く一般的な使用環境下で腐食が進行しないこと、主成分となる酸化鉄が鉄鋼プロセスで発生する副生成物から得られること、といった工業製品として有益な特徴を有しており、現在もコストパフォーマンスに優れた磁石として広く普及している。

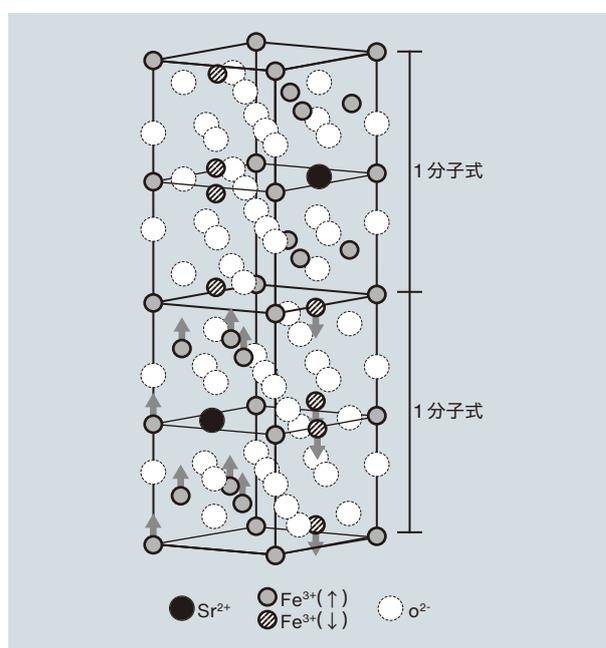


図1 マグネトプランバイト構造の模式図 (Sr フェライトの場合。図中矢印は磁気モーメントの向きを示す。)

Fig.1 Schematic illustration of magnetoplumbite structure for Sr ferrite. Arrows indicate the magnetic field directions

2.2 プロテリアルの高性能フェライト磁石

当社が生産している高性能フェライト磁石 (NMF) の特性域を**図2**に示す。フェライト磁石は特に電装用途への適用を中心に採用が拡大してきた。1990年代中盤までは、Sr フェライト磁石の微粉碎や成形・微量添加元素などのプロセス技術の進展により、磁石特性を向上させてきた。一方、1990年代後半になって、Sr フェライト (主相組成式 $SrFe_{12}O_{19}$) の Fe の一部を Co に、Sr の一部をランタン (La) に置換した、Sr-La-Co フェライト磁石が開発・量産化された²⁾。さらに、2000年代になって、Sr

の代わりにCaを活用したうえで組成を適正化したCa-La-Coフェライト磁石でさらに高い性能が得られることが見出され³⁾、これをもとに組成改良やプロセス適正化が進められて製品化に至っている。中でも、NMF-15シリーズは、量産フェライト磁石の中で最高クラスの磁気特性を発現する(2023年8月現在, 当社調べ)。

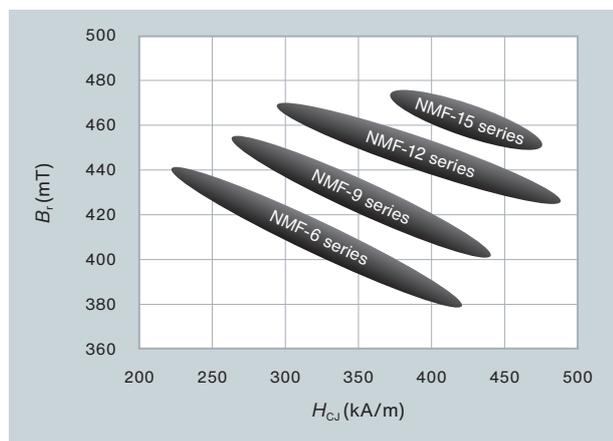


図2 高性能フェライト磁石 NMF® の磁気特性 (2023年8月現在)

Fig.2 Magnetic properties of high-performance NMF™ ferrite magnets

3. フェライト磁石を用いた主機モーターの設計

3.1 解析による検証

フェライト磁石をxEV主機モーターに適用検討するために、まずは市場に流通しているEVモーターを調査し、基準とした。図3に基準としたモーターの1/8断面図を示す。出力110 kWモーター、8極48スロットの分布巻IPM(Interior Permanent Magnet)モーターで、ローターは平板形の1枚とV字形の2枚を合わせた、▽形の磁石配置である。以後、本モーターをリファレンスモーターと称する。ステーター構造を同一として、フェライト磁石を用いたローター構造の最適化を検討した。具体的には以下の2点を検討した。その際、減磁耐力、機械強度も考慮した設計としている。

1. フェライト磁石の低磁力化に伴う、モータートルク低下を最小限に抑えながら、不足分は積厚増加によって補い、同回転数条件で同等出力を得る(検討①: 同回転数条件)
2. 駆動条件(最大回転数)を変更し、同等体積で同等出力を得る(検討②: 同体積条件)

図4にリファレンスモーターの回転速度を変化させたときのトルクと、各回転数における最大出力の関係を示

す。また、モーターの出力とモータートルク、回転数の関係を以下の式(1)で示す。

$$P_{out} = 2 \cdot \pi \cdot \frac{N}{60} \cdot T \quad (1)$$

ここで、 P_{out} :モーター出力(W)、 T :モータートルク(N・m)、 N :回転数(rpm)である。回転数が増加するにつれて、出力は増加し、リファレンスモーターの場合3,283 rpm, 320 Nm(450 Arms)印加時に最大出力の110 kWに到達する。その後(1)式の関係から、回転数が増加する分だけモータートルクを下げながら(印加電流を下げながら)同等の出力を得る。最大回転数である10,000 rpm時のトルクおよび電流は105 Nm, 150 Armsである。一般的に最大出力駆動時において、最大トルク条件のときに、最も損失が発生する。また、最高回転条件のときに最もローター部に応力が発生し強度的な懸念が発生する。よって、本検討では、最大トルク条件と最大回転数条件の解析を行い、モーターとしての性能を評価した。磁界解析には、日立製作所が開発した電磁界シミュレータ内製ソフトを使用し、正弦波電流を入力して各種トルク、効率を算出した。

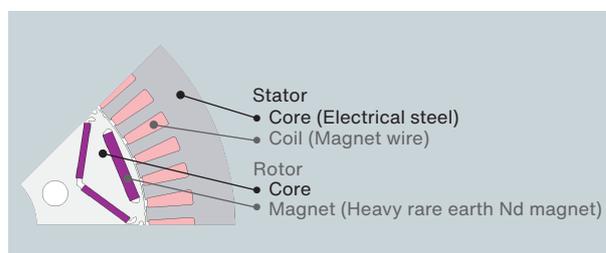


図3 リファレンスモーターの断面図(1/8 model)

Fig.3 Cross-sectional view of reference motor (1/8 model)

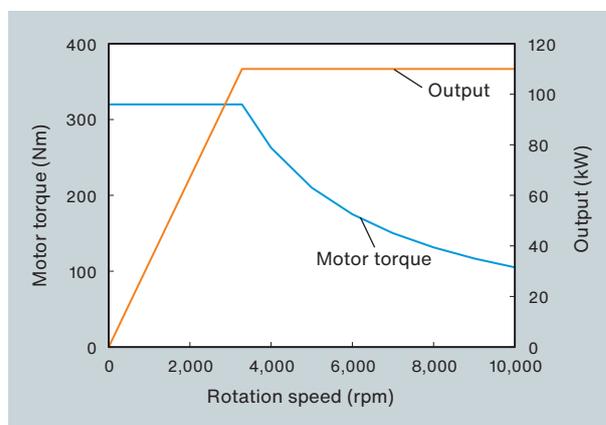


図4 リファレンスモーターのモータートルクと出力の回転速度依存性⁴⁾

Fig.4 Rotation speed dependence of motor torque and output

検討①②に共通した、フェライトモーターの設計のコンセプトは、モータートルク低下を最小限にするために、リラクタンストルクを積極活用する点である。今回の解析対象であるIPMモーターのモータートルクは、以下の式(2)で表される。

$$T = p_n \phi_{pm} I_a \cos \beta + \frac{1}{2} p_n (L_q - L_d) I_a^2 \sin 2\beta \quad (2)$$

ここで、 p_n :極対数、 ϕ_{pm} :電機子鎖交磁束、 I_a :電機子電流、 β :電流位相角、 L_d :直軸インダクタンス、 L_q :横軸インダクタンスである。右辺第1項はマグネットトルク、右辺第2項はリラクタンストルクと呼ばれる。マグネットトルクは、磁石の性能に依存するトルクであるため、フェライト磁石の場合、希土類磁石対比低下する。一方、リラクタンストルクは、ローターの突極性による磁気エネルギーの変化によって発生するトルクであり、ローター内の磁石とフラックスバリアと呼ばれる空隙部の形状によって決定し、磁石材料に依存しない。よって、右辺第2項のリラクタンストルクが最大化するローター構造を検討する必要がある。

検討②に関しては、図5のモーターの回転数-トルク特性を用いて、高速化に伴う出力向上原理を示す⁵⁾。A点の出力を P_{out} としたとき、同一回転数でモータートルクが半分になると、B点に移動し、出力も $P_{out}/2$ になる。この時、B点のモータートルクのまま、回転数を2倍にすると、C点に移動し、この時の出力はA点と等しく P_{out} に

なる。このように、モータートルクと回転数の関係を調整することで、出力を変化させることができるが、回転数は自動車の車速に直結するため、回転数を変更する際は減速機の減速比とセットの検討となる。よって、回転数を2倍にしたC点を得た場合は、最大回転数もおおよそ2倍とする必要があり、D点となる。

本設計コンセプトをもとに、検討①でリファレンスモーターと同等のモータートルクが得られる積厚を算出し、両者から導かれた積厚比を目安に検討②の最大回転数とした。

図6に設計したローター構造を反映させたフェライト磁石モーターの1/8断面図を示す。比較のため、リファレンスモーターも示した。検討①②に共通する構造上の

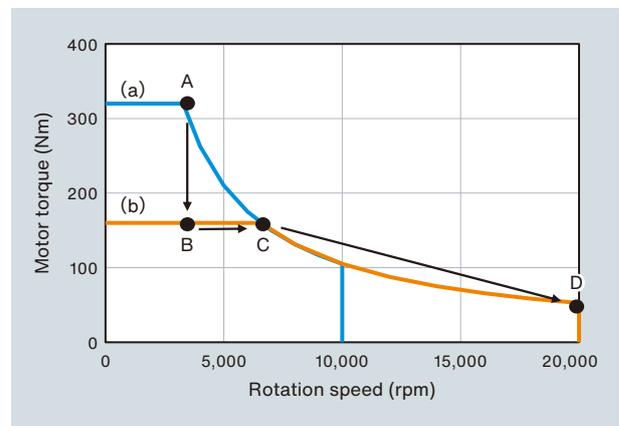


図5 回転数の調整による出力の維持方法 (a) リファレンスモーター、(b) 最大モータートルクが半分の場合
Fig.5 Maintaining output by changing rotation speed (a) reference motor, (b) 1/2 maximum motor torque

	Reference Motor	Proposal 1 (Equal output)	Proposal 2 (Equal size)
Appearance			
Magnet	HRE diffused Nd-Fe-B magnet	High-performance ferrite NMF®-15G	High-performance ferrite NMF®-15G
Rotor size	Φ200 - 140 mm	Φ200 - 200 mm	Φ200 - 140 mm
Max. rotation speed	10,000 rpm	10,000 rpm	15,000 rpm
Magnet / Motor weight	1.9 / 36 kg	3.2 / 48 kg	2.3 / 36 kg

HRE: Heavy Rare Earth

図6 リファレンスモーターと設計したモーターの比較

Fig.6 Motor design comparison (reference motor, proposal 1 and proposal 2)

主な特徴は、フェライト磁石形状をローターの内径側へとより深く配置したV字形として磁石表面積を拡大した点と、d軸(界磁磁束の向き)およびq軸(d軸と電気角で直交方向)の極間部へのフラックスバリアを構築した点である。このフラックスバリアのブリッジ部は最大回転数が高くなる検討②のほうが厚くなっている。これらにより、ローター強度を確保しつつ、フェライト磁石の漏れ磁束を低減するとともに、リラクタンストルクを大きくできるローター構造となっている。磁石は、当社フェライト磁石で最も B_r の高いNMF-15Gを使用し、その他材質はリファレンスマーターと同等とした。磁界解析の結果、検討①の軸長は200 mmとし、不足分のトルクを補った。これは、リファレンスマーター対比1.43倍である。本結果をもとに、検討②の最大回転数は1.5倍の15,000 rpm、最大トルク条件となる回転数は4,800 rpmとした。

図7に各モーターの最大トルク条件となる450 Arms印加時のモータートルク-電流位相角特性を示す。リファレンスマーターにおいて $\beta=45 \text{ deg.}$ で出力が最大の320 Nmを示した。それに対し検討①は、 $\beta=50 \text{ deg.}$ で最大トルクが得られた。これは設計コンセプト通り、低下したマグネットトルク ($\beta=0 \text{ deg.}$) をリラクタンストルクで補うことができていることを意味する。いずれも回転数3,283 rpmにおいて得られる出力は110 kWであった。一方、検討②に関しては、検討①と同様の傾向を見せたが、最大トルクは210 Nm程度であった。これを4,800 rpmにおける出力に換算すると105 kWとなり、検討①対比わずかに低下した。これは、ローターの

機械強度を確保するために、フラックスバリアのブリッジ部分を厚くしたため、磁石からの磁束がステーターを回らず磁石に戻る、短絡磁束が検討①対比多くなっているためである。以上から、検討①、②いずれの条件においてもリファレンスマーター対比ほぼ同等の出力が得られることが分かった。

各モーターにおける、最大出力かつ最大電流条件と、最大出力かつ最大回転数条件における出力と損失の分析結果を図8に示す。損失は銅損、ステーター鉄損、ローター鉄損と磁石渦電流損に分解し、銅損はリファレンスマーターの直流抵抗を実測にて求め、積厚増加分も考慮した。残りの損失は電磁界解析から算出した。検討①では、積厚増加分の直流抵抗の上昇の影響を受け、最も電流を印加する3,283 rpm時に効率 η が1.8%

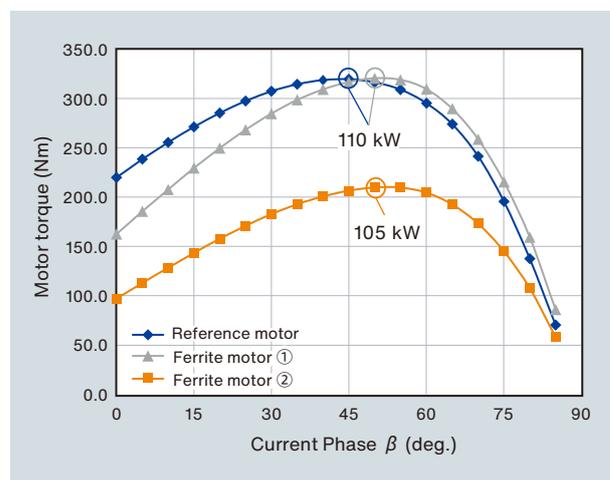


図7 450 Arms 印加時の電流位相 - モータートルク特性
Fig.7 Current phase dependence of motor torque at 450 Arms

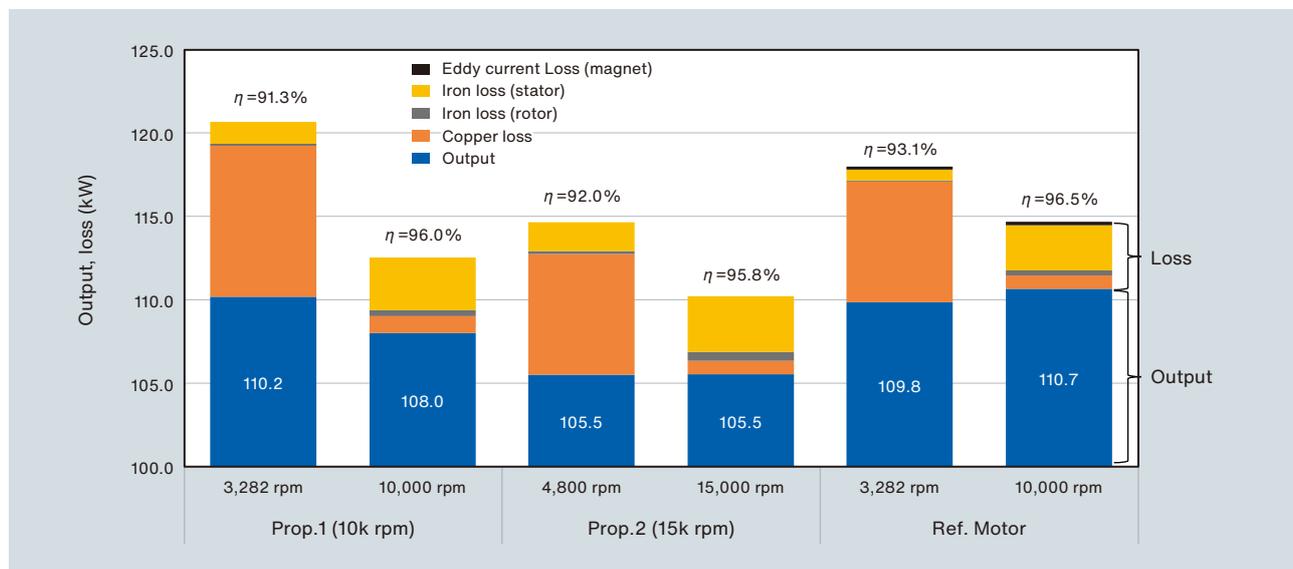


図8 出力と損失の解析結果
Fig.8 Simulation results for output and loss

低下した。一方で、10,000 rpm時は0.5%程度の差にとどまった。この理由としては、高速回転に伴い、印加する電流値が減少し、銅損の比率が下がった点と、磁石渦電流損が顕在化した点があげられる。本検討では基本設計として理想的な正弦波電流波形を用いて解析した。EV用途のモーターはインバータで駆動され、この場合のキャリア周波数がkHzオーダーとなることから、正弦波電流波形を用いた場合より、磁石渦電流損が大幅に増加し、効率差が縮まる可能性がある。

検討②では軸長がリファレンスモーターと同様のため、銅損は同じだが、回転数増加に伴う鉄損の増加起因で効率が0.7~1.1%低下した。以上から、ステーターの設計を固定した状態で、ローター磁石をフェライト磁石に変更すると、わずかに効率が低下するが、100 kWを超えるモーターを設計可能であることが分かった。

3.2 実測実験

3.1の解析結果をもとに、フェライトモーターを試作した。試作対象は検討②の同等体積同等出力条件とし、リファレンスモーターのローター部分以外は同じものを使用し、ローター部分のみを作製した。図9に試作したローターの外観写真を示す。図中黒色部が磁石挿入部であり、エポキシ樹脂によって接着されている。なお、解析上は空隙となっていたフラックスバリアもエポキシ樹脂で埋められている。これにシャフトを挿入し、最大回転数の15,000 rpmまで異常な振動なく回転するよう、バランス調整を施した。最後にこのローターをステーターに組み付け、試作品を完成させた。

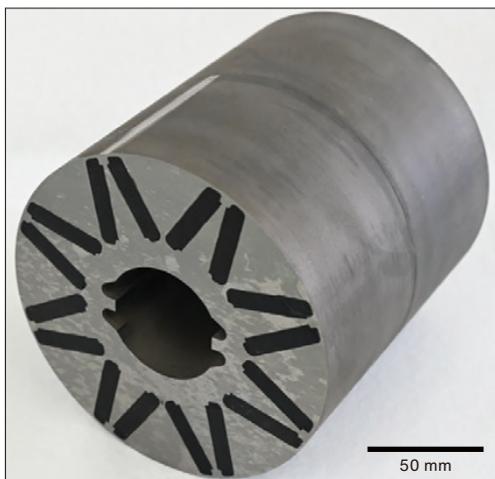


図9 試作したフェライトモーターのローター部
Fig.9 Prototyped ferrite motor (rotor part)

図10に評価システムの構成を示す。主にダイナモとトルクメーターで構成される試験ベンチにカップリングを介して供試モーターを接続する。ダイナモは明電舎製で、最大出力150 kW、最大回転数15,000 rpmである。供試モーターを駆動するインバータエミュレーターはマイウェイプラス製であり、最大電流450 Arms、最大出力150 kWである。よって今回のフェライトモーターの駆動領域をカバーできている。

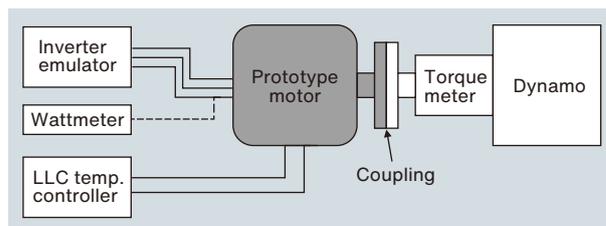


図10 評価システムの構成
Fig.10 Measurement system for ferrite motor

図11に試作したフェライトモーターの2,500 rpm、450 Arms時のモータートルク-電流位相特性を示す。結果モータートルクは50 deg.で最大値を取り、解析と良く一致した。一方、最大トルク自体は5%低下の約200 Nmであった。これは、マグネットトルクがおおよそ2割解析対比低下していることに起因しており、磁石や電磁鋼板の特性劣化が推察される。実験に使用した磁石の特性(B_r)を調査したところ、解析対比おおよそ3%低い程度であり、電磁鋼板の特性劣化を加味しても2割は考えにくい。よって、解析精度にも起因すると考えられる。

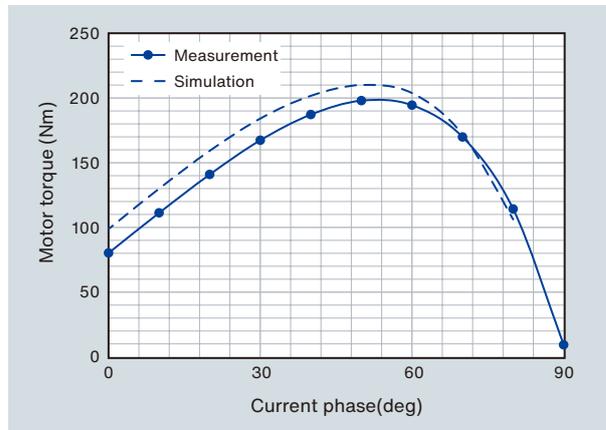


図11 試作したモーターの電流位相角 - モータートルク特性
Fig.11 Dependence of motor torque on current phase

図12に、4,800 rpm, 450 Armsで駆動させたときの出力と損失の分析結果を示す。なお、実測の鉄損には、分離しきれなかった機械損と漂遊負荷損が含まれている。また、解析結果のHigh Rdcは、図8中の検討②の解析結果である。Low Rdcに関しては後述する。その結果、出力は解析の105.5 kWに対して、101.7 kWとなり、解析対比96.4%の結果が得られた。効率に関しては、解析のHigh Rdc対比1.4%向上した。これは、銅損が大きく低下したためだと考えられる。銅損低下の理由として、解析に使用したリファレンスマーターと試作に使用したリファレンスマーターとで直流抵抗が異なっていた点、解析温度(75°C)と実測温度のずれが考えられる。検証のため、直流抵抗を試作時の値に変更して解析を行ったところ(図12のLow Rdc)、効率は93.6%であった。実測結果には、機械損と漂遊負荷損を含んでおり、解析結果よりも効率は低下する傾向がある。よって、解析(Low Rdc)と実測の効率はおよそ一致しているといえる。

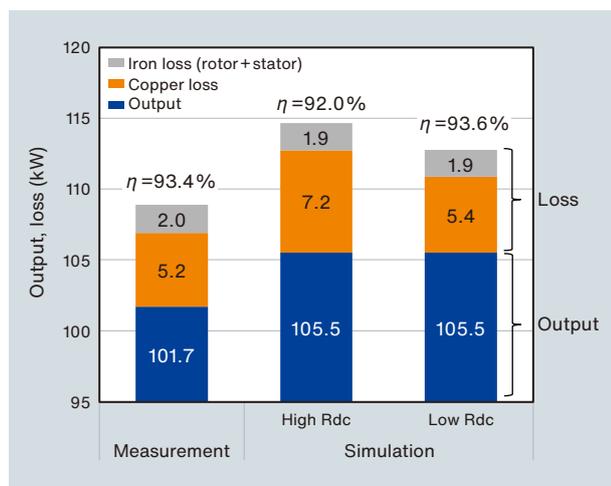


図12 試作したモーターの出力と損失

Fig.12 Output and loss for prototype motor

4. 結言

高性能フェライト磁石NMF-15のxEV主機モーターへの適用可能性について、市場に流通する110 kW出力のEVモーターをリファレンスとして、①同回転数条件、②同体積条件のモーターを設計した。①において、希土類磁石対比で低下するマグネットトルクを、リラクタンストルクの最大化によって補い、体積増加を1.43倍に留めつつ、同等出力の110 kWが得られる条件を得た。②において最大回転数を1.5倍の15,000 rpmとし、同回転数に耐えられる強度設計をすることで、体積の増加なくほぼ同等の105 kWの出力が得られる条件を得た。②のモーターを実際に試作、評価し、設計通りリラクタンストルクの向上を確認し、解析とほぼ同等である、102 kWの出力を確認した。以上より、100 kWを超える主機モーターにおいて、高性能フェライト磁石が適用可能であることを示した。今後、高性能フェライト磁石を希土類磁石が用いられているxEV用モーター以外の用途にも提案することで、資源リスク軽減と脱炭素化実現の両立をめざしたい。

※NMX, NMFおよびNEOMAXは株式会社プロテリアルの登録商標または商標です。

引用文献

- 1) プロテリアル技報, vol.38(2023), p.49.
- 2) 緒方,他:粉体および粉末冶金, vol.50(2003), No.8, p.636.
- 3) 小林,他:粉体および粉末冶金, vol.55(2008), No.7, p.541.
- 4) 大木俊治:日産のEV戦略とモーター開発の歩み ~ モーター開発を支えるJMAGへの期待 ~, JMAGユーザ会議(2017), p.2-1.
- 5) 榎本,他:電気学会論文誌D, vol.140(2020), No.5, p.410.



相牟田 京平
Kyohei Aimuta
株式会社プロテリアル
研究開発本部
グローバル技術革新センター



菊地 慶子
Keiko Kikuchi
株式会社プロテリアル
研究開発本部
グローバル技術革新センター
博士(工学)



釘持 茂
Shigeru Kemmochi
株式会社プロテリアル
磁性材料事業部



西内 武司
Takeshi Nishiuchi
株式会社プロテリアル
磁性材料事業部
博士(工学)



高畑 良一
Ryoichi Takahata
株式会社日立製作所
研究開発グループ
グリーンインフライノベーションセンタ
博士(工学)