

NEOMAX[®] 異方性リング磁石のモーターへの適用

Motor Application of NEOMAX[®] Nd-Fe-B Anisotropic Ring Magnets

丸川 泰弘*

Yasuhiro Marukawa

久村 剛之*

Tsuyoshi Hisamura

天野 寿人*

Hisato Amano

蒲池 政直*

Masanao Kamachi

吉田 健志*

Takeshi Yoshida

* 日立金属株式会社
磁性材料カンパニー

Magnetic Materials Company,
Hitachi Metals, Ltd.

Nd-Fe-B 焼結磁石はその優れた磁気特性から幅広い用途で使われている。また、日立金属の特微的な磁石製品である NEOMAX 異方性リング磁石も車載、家電、FA 他さまざまなモーターに使用されており、リング磁石の特徴を活かして高性能、低コストなモーター設計が可能となる。本論文では、NEOMAX 異方性リング磁石の特徴、モーターへの適用効果の事例を示す。リング構造でのメリットに加え、磁化配向に特徴をもつ極異方性リング磁石の適用により、ラジアル異方性リング磁石対比、同等のモーター出力条件にて、磁石重量およびモーター軸長ともに 20% 低減可能であることをモーター解析検討で定量的に示した。

Sintered Nd-Fe-B magnets with superior magnetic characteristics have a variety of applications. One of our signature products, the NEOMAX anisotropic ring magnet, has found wide use in the automotive industry, in home appliances, and in FA. Ring magnets can also be used to produce highly efficient motors. In this paper, the features of the NEOMAX anisotropic ring magnet are introduced, and the results of a case study of its use in motors are described. It is shown that it is possible to reduce both the magnet weight and the motor length by 20% compared to a multipole radial ring magnet that has a distinctive magnetic orientation in addition to the advantage of ring structure.

● Key Word : NEOMAX 異方性リング磁石, 極異方性リング磁石, モーター

● Production Code : NEOMAX 異方性リング磁石

● R&D Stage : Research

1. 緒言

日立金属の特微的な磁石製品である NEOMAX[®] 異方性リング磁石は車載、家電、FA 他さまざまなモーターへ適用されており、リング磁石の特徴を活かしたモーター設計が可能となる。本論文では、NEOMAX 異方性リング磁石の特徴、モーターへの適用、設計事例および技術動向を示す。

2. 異方性リング磁石の特徴

2.1 異方性リング磁石の磁化配向

NEOMAX 異方性リング磁石の磁化配向はラジアル異方性および極異方性の 2 種類の磁化配向¹⁾が存在する。図 1 に示す通り、ラジアル異方性の磁化配向は径方向のラジアル配向となり磁極は着磁により決定される。また、極異方性はハルバッハ配列の磁気回路構造となり、磁化配向、磁極は磁石成形時に決定される。ハルバッハ配列の磁気回路構造により、表面磁束密度波形は正弦波状となる。加えて 2.4 で後述する磁束密度ピーク値はラジアル異方性より高いことも特徴である。

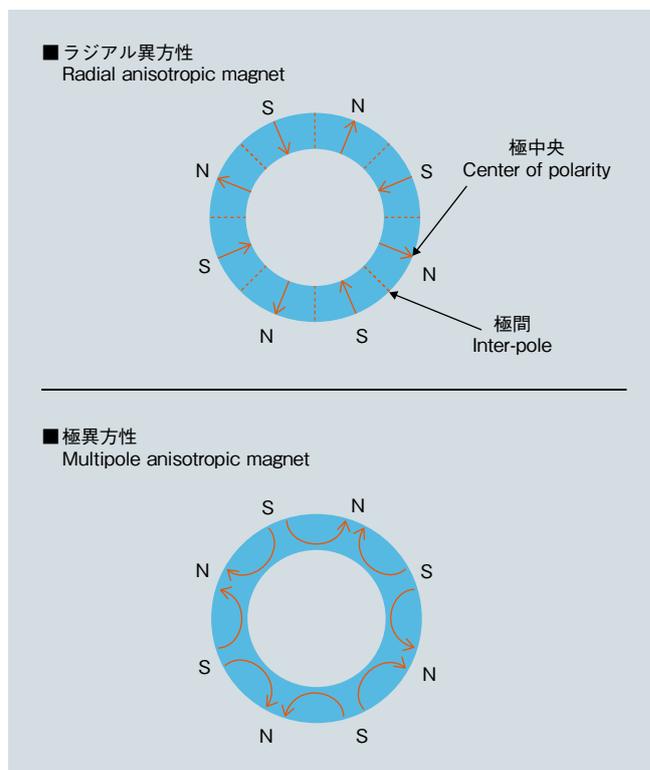


図 1 NEOMAX[®] 異方性リング磁石の磁化配向
Fig. 1 Magnetic field orientation of NEOMAX[®] anisotropic ring magnet

2.2 異方性リング磁石の構造上のメリット

図2にリング磁石の構造上のメリットをセグメント磁石ローターの場合と比較して示す。リング磁石の構造上の最大のメリットは組立性が良いことである。例えば、8極の磁石ローターにおいてセグメント磁石を適用する場合、IPM (Interior Permanent Magnet) およびSPM (Surface Permanent Magnet) どちらの磁石ローターでも磁極の数と同じ個数の磁石を用意する必要があり、極数に伴い磁石ローターの部品点数も増加することとなる。一方、リング磁石の場合は極数によらずリング磁石1個にて磁石ローターを構成することが可能となり、部品点数の少ないシンプルな磁石ローター構造が実現可能である。

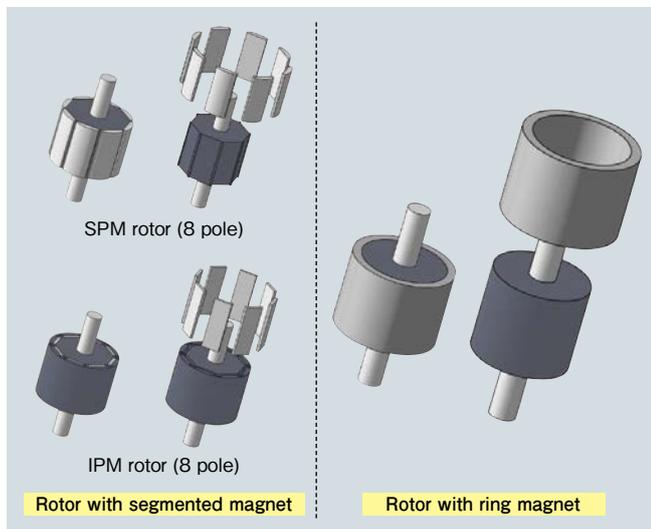


図2 リング磁石の構造上のメリット
Fig. 2 Structural advantages of ring magnet

2.3 ラジアル異方性リング磁石の磁極構造上のメリット

図3にラジアル異方性リング磁石の磁極構造上のメリットを示す。セグメント磁石ローターの場合、通常、磁石1個が1極となる着磁が施され、磁石個数に応じた磁極数となるのが一般的である。それに対し、ラジアル異方性リング磁石ローターの場合は着磁器の極数に応じた着磁が施されるため、例えば8極の着磁器で着磁を行えば8極の磁石ローターとなり、10極の着磁器にて着磁を行えば10極の磁石ローターを作製することができ、異なる極数のローターの磁石部品を共通化することが可能である。また、SPM同期モーターにおいてコギングトルク低減に有効な手段の一つであるスキュー着磁を着磁器側の設計によって容易に実現可能であることもリング磁石の大きなメリットである。セグメント磁石にてスキュー着磁と同様の手法を適用する場合、ステップスキュー構造となるが、例えば8極の2段ステップスキュー

を構成しようとする必要があり、部品点数および組立工数が増加することとなる。磁石ローターにおいて、リング磁石を用いることでシンプルな構造および着磁自由度が得られる。

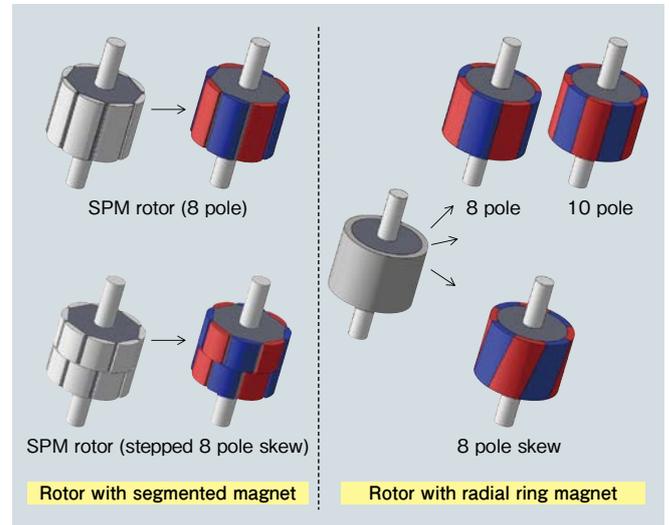


図3 ラジアル異方性リング磁石の磁極構造上のメリット
Fig. 3 Advantages of radial ring magnet based on magnetic pole

2.4 極異方性リング磁石の特徴的な表面磁束密度波形

図4にリング磁石の表面磁束密度波形の例を示す。極異方性リング磁石の表面磁束密度波形は正弦波状の波形形状となるのが特徴で、その正弦波状波形形状によりモーターのコギングトルクおよびトルクリプルを効果的に低減することが可能である²⁾。また、表面磁束密度波形の面積を比較すると、一般的に極異方性リング磁石の面積はラジアル異方性リング磁石よりも約20%大きく、極異方性の磁化配向により多くの磁束を得られる³⁾。

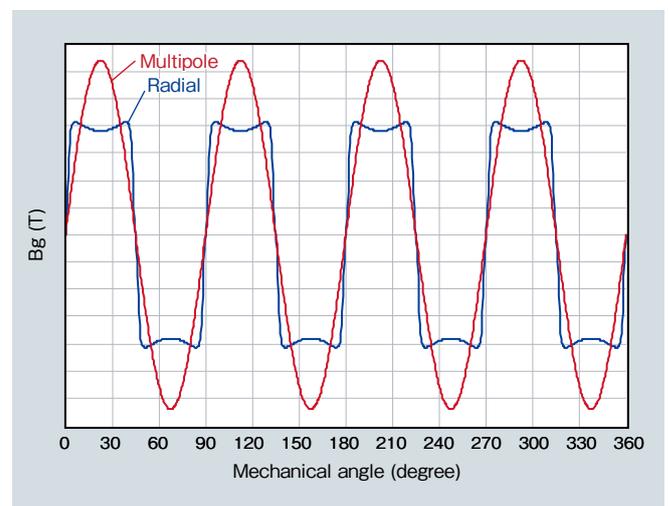


図4 リング磁石の表面磁束密度波形
Fig. 4 Surface magnetic flux density for ring magnet

3. 極異方性リング磁石の適用効果

3.1 モーター誘導起電力向上

極異方性リング磁石をモーターへ適用することにより、前述の表面磁束密度波形の特性によりモーター特性を向上させることが可能である。図5にリング磁石を用いた場合のモーターの誘導起電力の比較を示す。誘導起電力では極異方性リング磁石の方がラジアル異方性リング磁石よりも約10%高く、極異方性の磁化配向によりモーター特性を向上させることが可能となる。一方でモーター特性向上の効果はモーター構造にも依存し、ステータ形状を特性の高い極異方性リング磁石に応じた形状等の専用設計とすることでより多くの効果を得ることが期待できる。

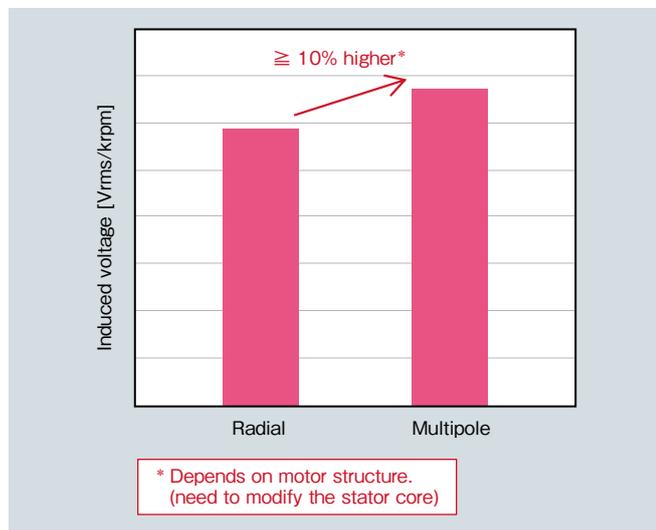


図5 リング磁石を用いたモーターの誘導起電力
Fig. 5 Induced voltage in ring magnet motor

3.2 極異方性リング磁石の樹脂インサート成形

極異方性リング磁石はそのハルバツハ配列の磁気回路構造により内径側に漏れ磁束がない、つまり、内径側に磁気回路を構成しなくてもよいことが特徴の一つである。よって、セグメントおよびラジアル異方性リング磁石を用いた磁石ローターでは必須となる磁石内径側の磁気回路、ローターコアが不要となる。これにより、極異方性リング磁石の場合、磁石内径側に非磁性の樹脂等を配置することが可能となり、図6に示すような樹脂インサート成形により磁石ローターを作製することが可能となる。樹脂インサート成形により、コスト面では磁石とローターコアおよびローターコアとシャフトの組立コスト、ローターコアのコストの削減が可能となり、さらに、磁石内径の機械加工精度が不要となり磁石の内径加工レスによる磁石コストの削減も可能となる。モーター特性面では

前述の極異方性リング磁石特有の表面磁束密度の正弦波状波形形状の効果に加えて、磁石内径が樹脂となることによるローターの軽量化およびイナーシャ低減の効果が期待できる。

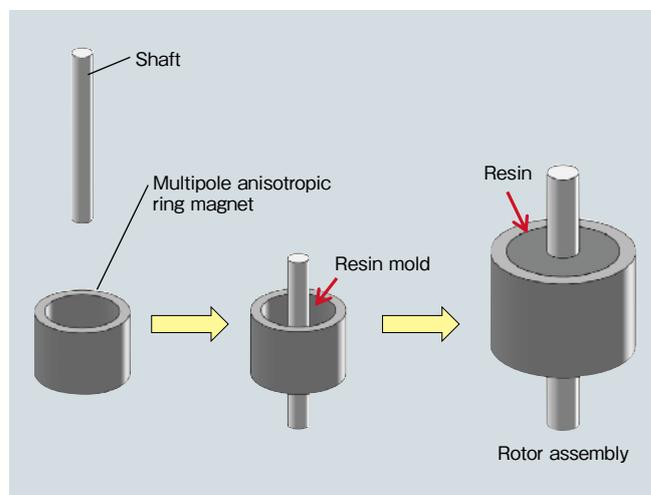


図6 極異方性リング磁石の樹脂インサート成形
Fig. 6 Resin insertion molding of multipole anisotropic ring magnet

4. リング磁石のモーターへの適用検討

4.1 モーター設計検討内容

ラジアル異方性リング磁石および極異方性リング磁石を適用したモーターを設計し、モーター特性の比較を行った。今回は、リング磁石の外径をφ14mmとし、4極、6極、8極において極数に応じたステーターを設計しモーター出力トルクを同一とする場合の磁石重量およびモーター軸長を比較した。

4.2 モーター設計条件

検討モーターの電磁構成および磁石条件を表1に示す。5種類の電磁構成において、ラジアル異方性リング磁石および極異方性リング磁石を適用する場合の磁石仕様を設計した。磁石外径はφ14mmとし、磁石内径はラジアル異方性リング磁石の場合はφ10mm、極異方性リング磁石の場合はそれぞれの極数に応じた適切な内外径比に基づき内径を設定した。今回の磁石形状では4極および6極において極異方性リング磁石の磁石内径がラジアル異方性リング磁石の磁石内径よりも小さくなる。また、ラジアル異方性リング磁石においてはそれぞれの電磁構成のコギングトルク理論値に応じたスキュー着磁角度を設定している。磁石の残留磁束密度は1.2Tとし、ラジアル異方性リング磁石の極間の無着磁領域の幅は1mmと設定した。

表1 モーター電磁構成および磁石設計条件

Table 1 Design specifications for motor and magnet

		Radial ring magnet					Multipole anisotropic ring magnet				
Number of poles and slots		4P6S	6P9S	8P12S	8P6S	8P9S	4P6S	6P9S	8P12S	8P6S	8P9S
Outer diameter	[mm]	14					14				
Inner diameter	[mm]	10					8.5	9.5	10		
Number of poles	—	4	6	8			4	6	8		
Ratio of OD to ID	—	0.71					0.61	0.68	0.71		
Skew angle	[degree]	30	20	15	15	5	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Remanence Br	[T]	1.2					1.2				
Neutral area	[mm]	1					N/A				

次に、モーターの詳細設計条件を表2に、モーター解析モデルを図7に示す。モーター外径は $\phi 35$ mm, ティース磁束密度1.2~1.4 Tとなるようティース幅を設計, その他詳細モーター仕様も表2に示す通りで、モーター軸長を調整し出力トルク50 mN・mが得られるモーターを設計し、それぞれ磁石重量、モーター軸長を比較した。

表2 モーター設計条件

Table 2 Design conditions for motor

Outer diameter of motor	$\phi 35$ [mm]
Motor gap	0.5 [mm]
Slot opening	1 [mm]
Stator core material	35A300
Shaft and rotor core material	S45C
Current density	5 [A/mm ²]
Fill factor for coil winding	60 [%]
Thickness of coil insulator	0.3 [mm]
Output torque	50 [mN・m]
Magnetic flux density of teeth	1.2-1.4 [T]

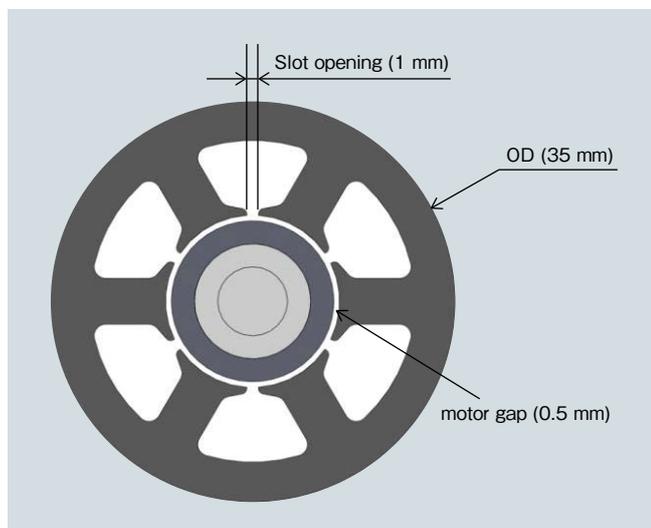


図7 モーター解析モデル

Fig. 7 Motor simulation model

4.3 モーター設計結果

設計後のモーター概略形状を図8に示す。極異方性リング磁石の磁石磁束は、すべての電磁構成条件で設計仕

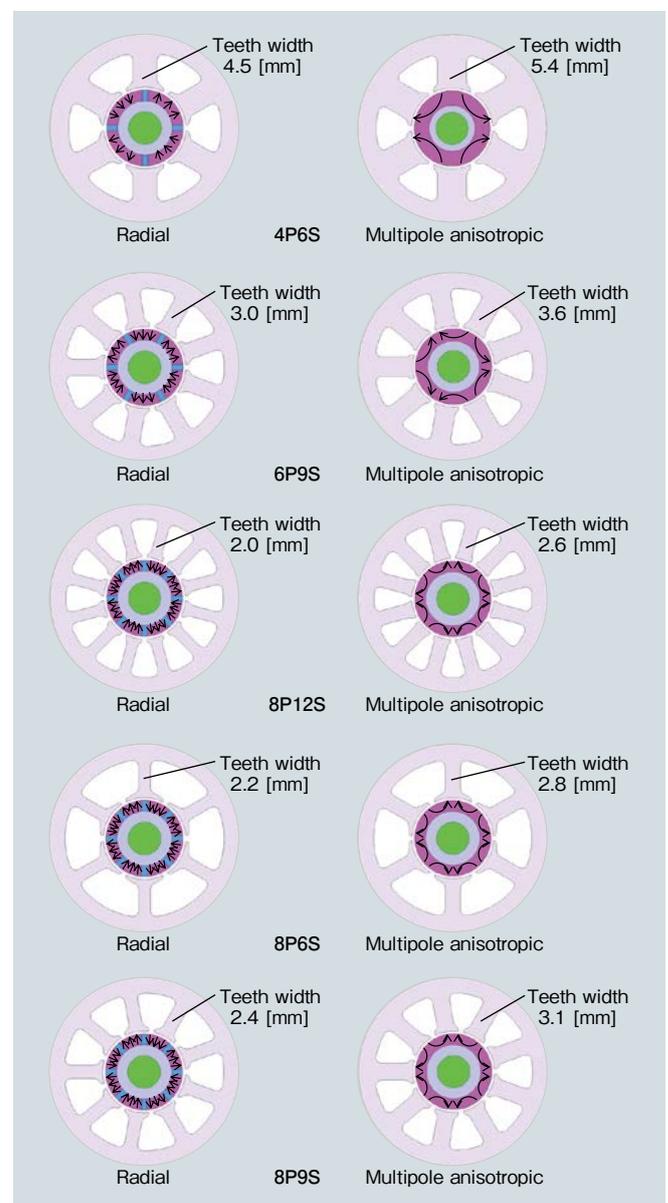


図8 モーター設計結果

Fig. 8 Motor design results

様よりも増加した。ティース内の飽和磁束密度の設計仕様は、1.4 Tである。極異方性リング磁石のティース幅は、設計仕様を満足させるため、ラジアル異方性リング磁石のティース幅よりも大きくする必要がある。出力トルクの解析結果を図9に示す。すべての条件において出力トルク 50 mN・m が得られており、同じ条件にて磁石重量および磁石軸長を比較することができる。

まず、磁石重量の比較を図10に示す。4P6Sの電磁構成以外はラジアル異方性リング磁石よりも極異方性リング磁石の方が磁石重量が少なく、極異方配向の効果により同じモーター特性にて磁石重量を削減することが可能であることがわかる。但し、4P6Sの電磁構成では、4極の極数にて適切な内外径比で設定したため、磁石の肉厚が増加した。

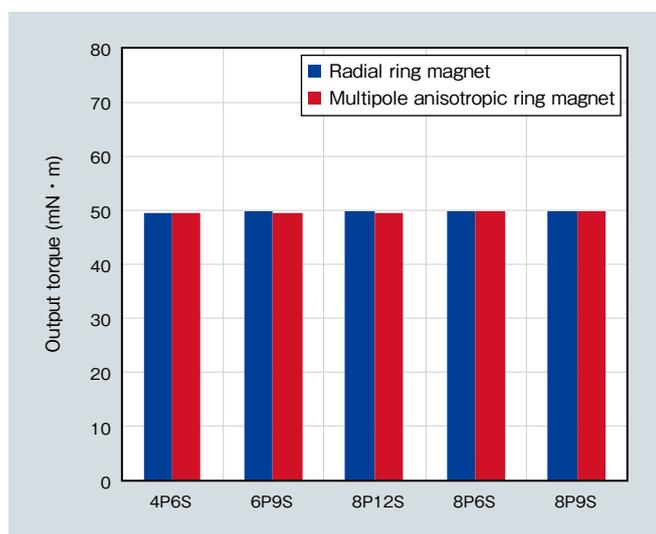


図9 出力トルク解析結果
Fig. 9 Simulation results for output torque

次に、モーター軸長の比較を図11に示す。すべての電磁構成においてラジアル異方性リング磁石よりも極異方性リング磁石の方がモーター軸長が短く、極異方性リング磁石の適用にてモーターの小型化が可能であることが確認できる。図12にモーター軸長と磁石重量の比較グラフを示す。今回の検討モデルの中では8P6Sの電磁構成の場合、最も小型化が可能であり、極異方性リング磁石を適用することでラジアル異方性リング磁石よりも20%磁石重量およびモーター軸長を少なくすることができた。また、他の電磁構成においても、極異方性リング磁石の適用にてモーターの小型化が可能であることを確認した。

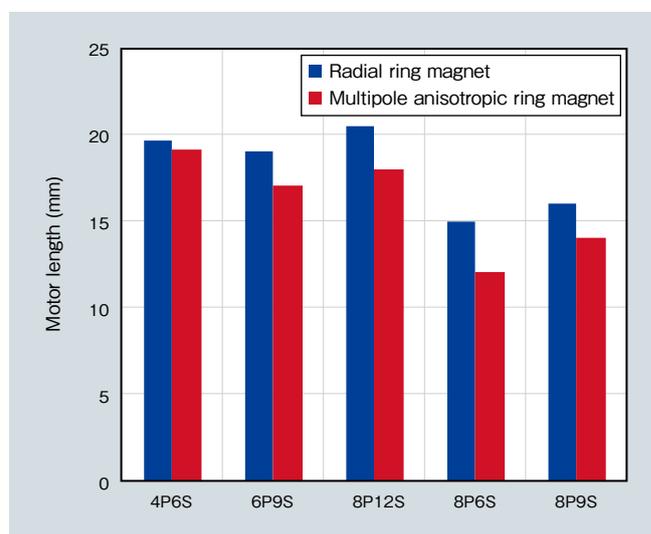


図11 モーター軸長の比較
Fig. 11 Comparison of motor length

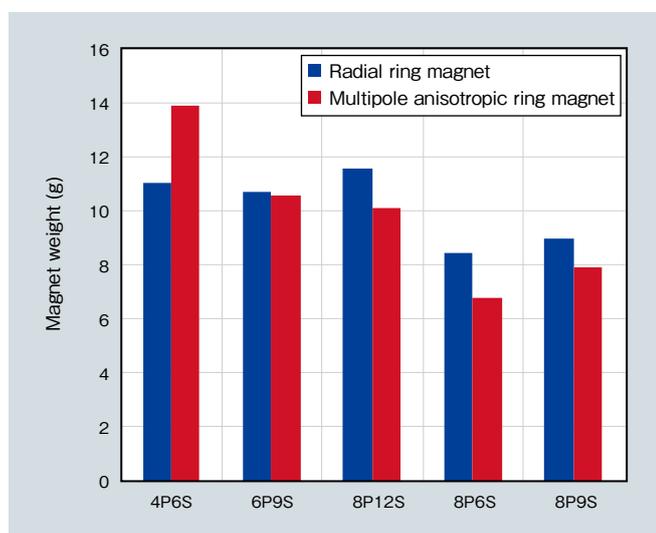


図10 磁石重量の比較
Fig. 10 Comparison of magnet weight

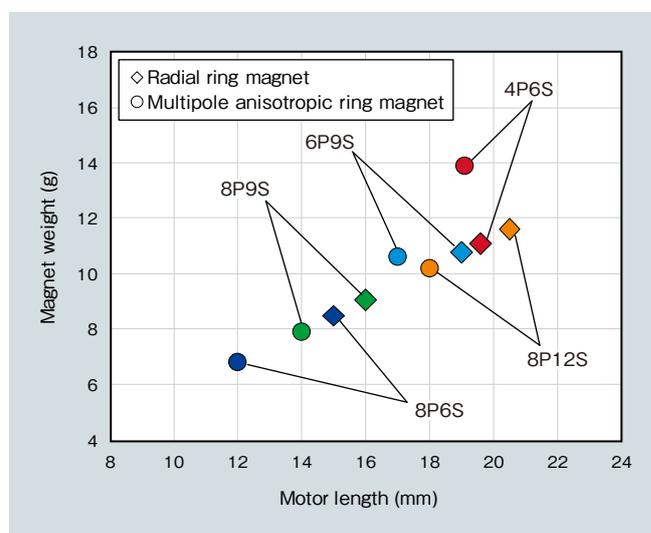


図12 モーター軸長と磁石重量
Fig. 12 Motor length and weight

5. 結言

本論文では、日立金属のリング磁石の特徴および応用事例を示し、極異方性リング磁石の適用にてモーターの小型化が可能であることを示した。今回、材料面での省重希土類技術については触れなかったが、当該材料においても重希土類元素の削減には鋭意取り組んでおり、今後各種用途で採用が拡大することを期待する。

引用文献

- 1) 日立金属(株) : Permanent Magnets, HG-A27-H, 2018.4
- 2) 見城尚志 他 : 新・ブラシレスモーター, 総合電子出版社, 2005.1
- 3) H.Amano, et al.: Characteristics of a Permanent-Magnet Synchronous Motor with a Dual-Molding Permanent-Magnet Rotor, IEEE PES (2007), 07GM0361.



丸川 泰弘

Yasuhiro Marukawa
日立金属株式会社
磁性材料カンパニー
磁性材料研究所



久村 剛之

Tsuyoshi Hisamura
日立金属株式会社
磁性材料カンパニー
磁性材料研究所



天野 寿人

Hisato Amano
日立金属株式会社
磁性材料カンパニー
磁性材料研究所



蒲池 政直

Masanao Kamachi
日立金属株式会社
磁性材料カンパニー
熊谷磁材工場



吉田 健志

Takeshi Yoshida
日立金属株式会社
磁性材料カンパニー
熊谷磁材工場