

径方向誘導式ハイブリッド型を用いた ステッピングモーターの高トルク化技術

須原 亨

従来のハイブリッド型ステッピングモーターは、軸方向に着磁された磁石を歯車状の鉄心で挟みこむことで小歯に磁束を誘導し磁極を形成しています。これに対し、径方向に着磁した磁石を歯車状鉄心の小歯間に配置することで、磁束を誘導し磁極を形成する方法を開発しました。新設計手法では、従来のハイブリッド型ステッピングモーターよりも、磁路上の磁石断面積を大きくできます。磁石断面積の増加によりトルクに寄与する鎖交磁束が増加したため、従来のハイブリッド型に対する高トルク化を実現できます。製品化した**PKP**シリーズ高トルクタイプは、装置の小型・軽量化や繰り返し運転のタクトタイム短縮への貢献が期待されるだけでなく、損失低減、許容ラジアル荷重の向上、漏れ磁束低減などの特長もあります。本稿では、径方向誘導式を用いた高トルク化技術の原理と特長について説明します。

1. はじめに

ステッピングモーターは、オープンループで位置制御が可能なモーターです。代表的な構造に、PM型(永久磁石型)、VR型(可変リラクタンス型)、HB型(ハイブリッド型)の3種類があります。

PM型のローターは、表面に磁石を配置した構造で、磁石を活用するためトルクが大きいことが利点ですが、極小磁石の作製が困難なため分解能が低くなります。VR型のローターは、歯車状の小歯がついた鉄心で構成され、小歯の間隔を小さくして分解能を高くできることが利点ですが、磁石を使わないためトルクが小さくなります。HB型のローターは、歯車状鉄心に円盤状の磁石を挟みこんだ構造で(図4参照)、PM型では困難な高分解能と、VR型では困難な高トルクを同時に実現しています⁽¹⁾。

現在、HB型ステッピングモーターは、産業用モーターとして、半導体製造装置や精密ステージなどさまざまな用途に使われています。設備や装置の改良や開発において、タクトタイムの短縮や小型・軽量化が求められます。そのため、高トルクのモーターが必要となります。

本稿では、オリエンタルモーターにおけるステッピングモーターの高トルク化の変遷について説明したあとで、径方向誘導式を用いたステッピングモーターの構造と磁気回路について説明し、最後に実験結果を交えながら特長を説明します。

2. ステッピングモーターの高トルク化の変遷

オリエンタルモーターは、数々の高トルク化技術を開発してきました。1980年に**PH**シリーズを商品化し、1988年に発売した**EM**シリーズは、ステーターの小歯間に磁石を配置して界磁を増加させることで、**PH**シリーズの約2倍のトルクを実現しました⁽²⁾。1992年に発売した**PK**シリーズはステーターの内外径を最適な設計にすることで、小歯間の磁石を用いずに**EM**シリーズと同等のトルクを実現しました⁽³⁾。2011年発売の**PKP**シリーズでは、鉄心の磁束密度を最適化することで**PK**シリーズの約1.3倍の高トルク化を実現しました⁽⁴⁾。新たに発売した**PKP**シリーズ高トルクタイプは、径方向に着磁した磁石を用いることで**PKP**シリーズの約1.7倍のトルクを実現しました。(図1参照)

PKPシリーズ高トルクタイプは取付角が42 mmのみですが、トルク-体積比では**PH**シリーズの約5倍となり、高トルク化技術の進歩がわかります。

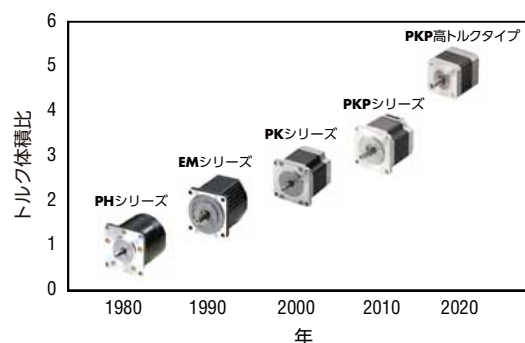


図1 トルク-体積比の変遷

3. 径方向誘導式を用いたステッピングモーター

3.1. ステッピングモーターの分類

ステッピングモーターの分類を図2に示します。ステッピングモーターの構造は、PM型、VR型、HB型の3種類に分類できます。

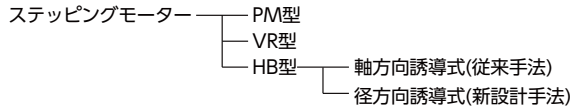


図2 ステッピングモーターの分類

従来のHB型と新設計手法の大きな違いはローターの構造にあります(図3参照)。従来のHB型は軸方向に着磁した磁石をローター鉄心に挟みこむことで磁極を誘導しています。そこで、本稿では従来のHB型を軸方向誘導式HB型(以降、軸方向誘導式)と呼びます。また、新設計手法では、径方向に着磁した磁石を用いて磁極を誘導していることから径方向誘導式HB型(以降、径方向誘導式)と呼びます。

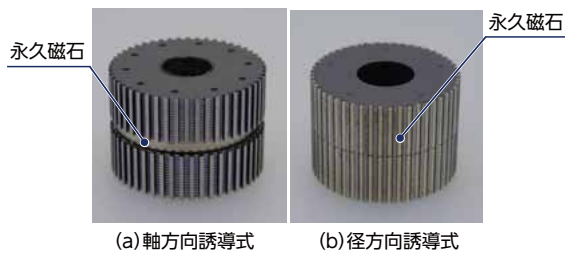


図3 ローター構造

3.2. モーター構造

軸方向誘導式の構造を図4に示します。ステーター鉄心のギャップ面には小歯がついています。ローターは、歯車状鉄心で円盤状の磁石を挟みこむことで磁極を誘導し、小歯は誘導子と呼ばれます(図6参照)⁽⁵⁾。軸方向誘導式の磁束はモーター内部を三次元的に流れるため、磁路としてステーター鉄心を半分しか活用できていません(図8(a)参照)。

ステーターもしくはローターのどちらかの小歯間に磁石を配置する高トルク化技術がありますが、磁路としてステーターの半分しか活用していない点は変わりません。

径方向誘導式の構造を図5に示します。ステーターとローター共に、鉄心の形状は軸方向誘導式と同じです。両者の小歯間には磁石が配置され、鉄心の小歯に磁極を誘導します。ステーター磁石とローター磁石の極性をギャップに対して逆極性とするすることで、モーター界磁を形成します(図7参照)。径方向誘導式は、ステーター鉄心とローター鉄心がギャップを介して全面で対向するため、ステーター鉄心のすべてを磁路として活用します(図8(b)参照)。

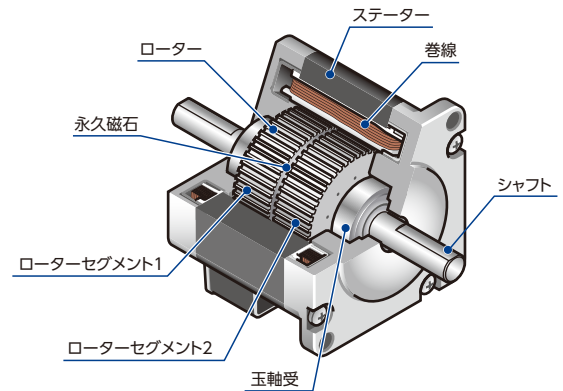


図4 軸方向誘導式の構造図

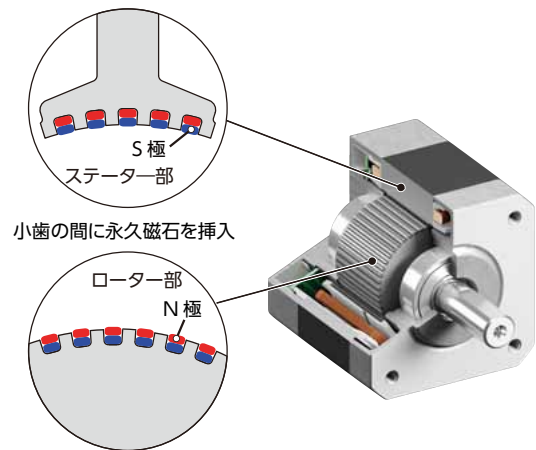


図5 径方向誘導式の構造図

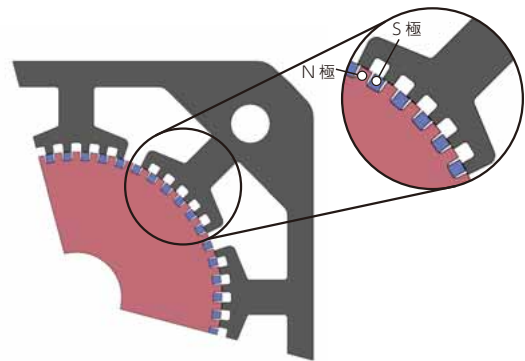


図6 軸方向誘導式の断面図

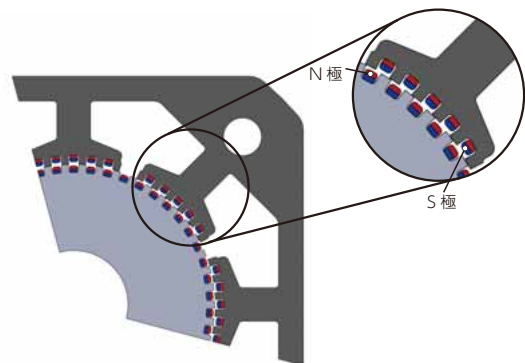
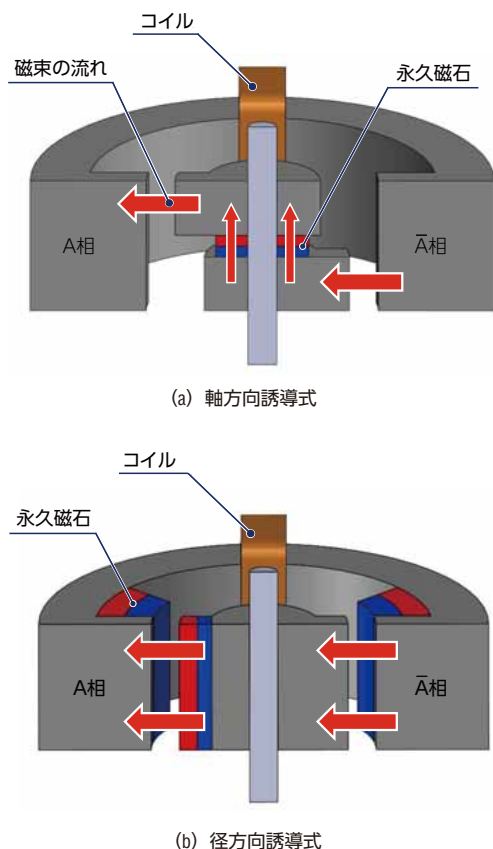


図7 径方向誘導式の断面図

3.3. 磁気回路

軸方向誘導式と径方向誘導式の1相分を抜きだした簡易モデルを図8に示します。



(a) 軸方向誘導式

(b) 径方向誘導式

図8 簡易モデル

A相に対して、位相が電気角で180°ずれた位置をĀ相とします。図8の赤色は磁石のN極、青色は磁石のS極を表します。また、赤い矢印は、モーター内部を流れる磁束を表します。

図8(a)の軸方向誘導式は、A相でステーター小歯とN極のローター小歯が対向すると、Ā相ではステーター小歯とS極のローター小歯が対向します。A相ではローターのN極側、Ā相ではローターのS極側のギャップパーミアンスが大きくなるため、磁束はA相からĀ相に流れます。ローターが電気角で180°回転すると、パーミアンスの大小関係が反転しĀ相からA相に磁束が流れます。このように、軸方向誘導式は鎖交磁束が変化することによって、マグネットトルクが発生します。

図8(b)の径方向誘導式は、A相でステーター小歯とローター磁石が対向すると、Ā相ではステーター小歯とローター小歯が対向します。A相ではステーター磁石とローター小歯、Ā相ではステーター磁石とローター磁石がそれぞれ対向しています。磁束は各磁石の近傍で閉ループとなるように流れますが、A相とĀ相のギャップパーミアンスが異なることによって、A相からĀ相に磁束が流れます。ローターが電気角で180°回転すると、パーミアンスの大小関係が反転し、Ā相からA相に磁束が流れます。径方向誘導式も軸方向誘導式

と同様に、鎖交磁束が変化することでマグネットトルクが発生します。

次に、径方向誘導式のトルクが軸方向誘導式のトルクに比べて増加する理由について数式を用いて説明します。鎖交磁束はステーターコアを流れる磁束の量に比例し、磁束は式(1)で表せます。

$$\varphi_s = B_{\text{gap}} \cdot S_{\text{gap}} \dots\dots\dots (1)$$

φ_s : ステーターを流れる磁束 [Wb]

B_{gap} : 対向部の磁束密度 [T]

S_{gap} : ギャップの対向面積 [m²]

式(1)よりギャップの磁束密度は、式(2)で表せます。

$$B_{\text{gap}} = \frac{\varphi_s}{S_{\text{gap}}} \dots\dots\dots (2)$$

磁石から発生する磁束がステーターを流れる磁束と等しい場合、磁束は式(3)で表せます。

$$\varphi_s = \varphi_M = B_M \cdot S_M \dots\dots\dots (3)$$

φ_M : 磁石から発生している磁束 [Wb]

B_M : 磁石内部の磁束密度 [T]

S_M : 磁石の総断面積 [m²]

式(3)を式(2)に代入すると、ギャップの磁束密度は、式(4)で表せます。

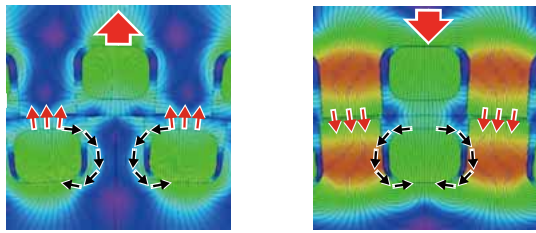
$$B_{\text{gap}} = B_M \cdot \frac{S_M}{S_{\text{gap}}} \dots\dots\dots (4)$$

磁石の総断面積とは、磁路に対して直角に交わる磁石の面積であり、軸方向誘導式は円形部分の面積、径方向誘導式はギャップ面に対向している長方形の面積の総和です。径方向誘導式は、ステーターとローターの両方に磁石を配置することで磁石の数を多くできるため、総断面積は軸方向誘導式の約2倍になります。図8に示すように、径方向誘導式のステーターとローターの対向面積は、軸方向誘導式の約2倍です。径方向誘導式の対向面積と磁石の総断面積は軸方向誘導式の2倍となるため、ギャップの磁束密度は同等です。

径方向誘導式は、ギャップ磁束密度を減少させずに磁石の断面積を増やせるため、鎖交磁束が増加し軸方向誘導式より高いトルクを発生できると考えられます。

3.4. 磁束の流れ方

径方向誘導式の磁束の流れ方を、電磁界解析ソフトを用いてシミュレーションした結果を示します。図9(a)はローターの磁石とステーターの小歯が対向している場合(図8のA相に相当)、図9(b)はローターの小歯とステーターの小歯が対向している場合(図8のĀ相に相当)を表します。



(a) 小歯と磁石が対向 (b) 小歯と小歯が対向

図9 径方向誘導式の磁束

ステーターとローターがこのような対向状態にある場合、赤矢印で示すようにA相から \bar{A} 相に磁束が流れます。

また、図9の黒矢印で示すように、磁石近傍には鎖交磁束とならない漏れ磁束が存在します。トルクと磁石の断面積が単純な比例関係にならないのは、この漏れ磁束の影響が考えられます。

3.5. 実験結果

電流-トルク(I-T)特性を図10、回転速度-トルク(N-T)特性を図11に示します。

径方向誘導式のトルクは軸方向誘導式よりも高いことがわかります。定格電流時の励磁最大静止トルクは、軸方向誘導式の0.54 N・mに対し、径方向誘導式は0.92 N・mであり、約75%増加しています。

N-T特性の低速領域のトルクが増加します。また、高速領域では、インピーダンスの増加によりトルクが減少しますが、軸方向誘導式と同等のトルクを発生しています。

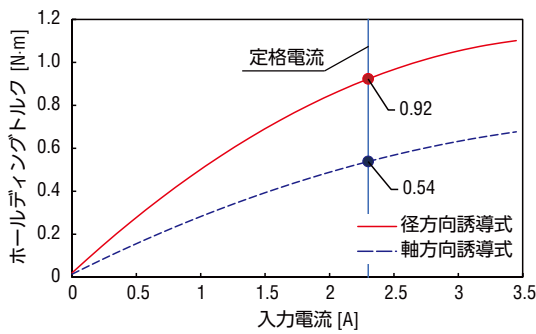


図10 I-T 特性

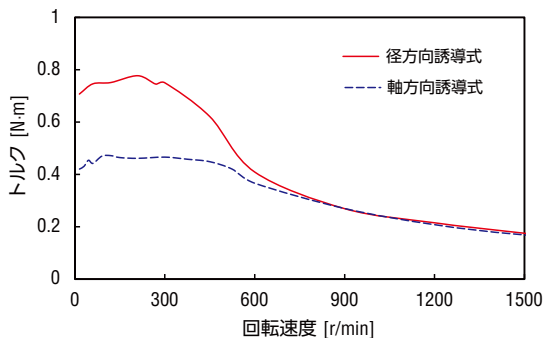


図11 N-T 特性

4. PKPシリーズ高トルクタイプの特長

径方向誘導式HB型ステッピングモーターを商品化したPKPシリーズ高トルクタイプPKP244PD23A2(以降、本製品)の特長を、現行のPKPシリーズ標準タイプであるPKP244D23A2(以降、従来製品)と比較しながら説明します。

4.1. タクトタイム短縮

加減速を繰り返す位置決め運転では、発生するトルクが高いモーターは加減速レートを大きくできるため、負荷が同一の場合、短時間での位置決め運転が可能です。表1に示す運転条件で、位置決め時間を比較します。また、位置決め時間は式(5)で計算できます。

表1 運転条件

品番	軸方向誘導式		径方向誘導式	
	PKP244D23A2	PKP244PD23A2	PKP244D23A2	PKP244PD23A2
プリアウトトルク	[N·m]	0.48	0.8	
ローター慣性 (J_R)	[kg·m ²]	54×10 ⁻⁷	61×10 ⁻⁷	
移動量	[°]	45		
負荷慣性 (J_L)	[kg·m ²]	500×10 ⁻⁷		
必要トルク (T_M) (安全率=1)	[N·m]	0.48	0.8	
摩擦負荷 (T_L)	[N·m]	0.45		
加速トルク (T_a)	[N·m]	0.03	0.13	
起動速度 (f_1)	[r/min]	0		
運転速度 (f_2)	[r/min]	200	400	
加減速レート		56.3	14.1	

$$t = (J_R + J_L) \cdot \frac{\pi \cdot \theta_s}{180} \cdot \frac{f_2 - f_1}{T_a} \dots\dots\dots (5)$$

t : 位置決め時間 [s]

θ_s : 基本ステップ角 [°]

本製品の位置決め時間は37.5 ms、従来製品の位置決め時間は75 msと計算され、約50%の位置決め時間短縮が期待できます。

実際の運転結果を図12に示します。本製品の位置決め時間は40.1 ms、従来製品の位置決め時間は68.5 msであり、おおむね計算通りの結果が得られました。

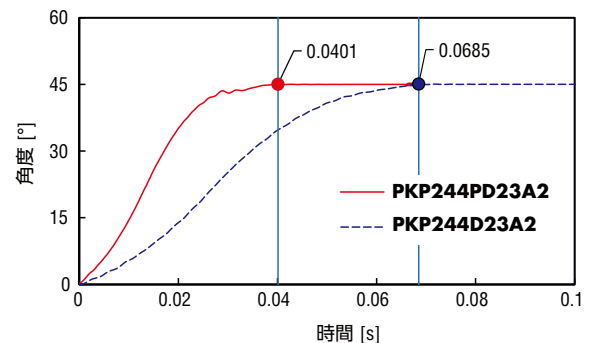


図12 応答性の実験結果

4.2. 損失低減

負荷が同一の場合、モーターが発生するトルクが高いほど、電流を低減できるためモーター損失が減少します。図13に示すように、本製品に定格電流の50%の電流を印加した場合、従来製品のN-T特性とほぼ同等の特性になります。そこで、出力が同等となる条件でのモーター損失を比較します。

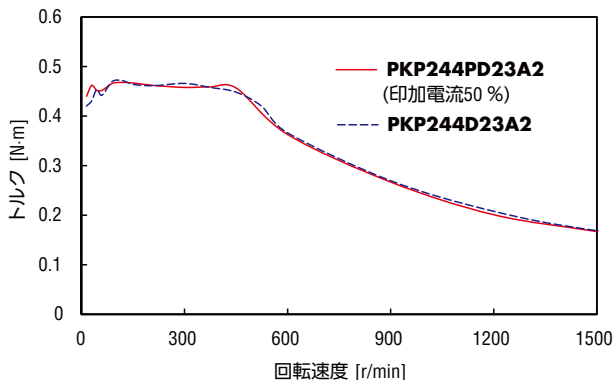


図13 N-T 特性の比較

モーター損失の大部分は銅損と鉄損です。銅損は巻線に電流が流れることによって発生する損失であり、式(6)で表せます。

$$W_c = n \cdot I_m^2 \cdot R \quad \dots\dots\dots (6)$$

W_c : 銅損 [W]

n : 相数

I_m : モーター入力電流 [A]

R : 巻線抵抗 [Ω]

電流の2乗に比例するため、モーター電流が1/2になれば銅損は1/4になります。

鉄損は鉄心中の磁束が変化することによって発生する損失です。磁束は電流を流すことでも発生するため、電流が減少すれば鉄損も減少します。鉄損は式(7)のように、モーター損失から銅損を引き算することで求めます(6)。

$$W_{fe} = W_m - W_c \quad \dots\dots\dots (7)$$

W_{fe} : 鉄損 [W]

W_m : モーター損失 [W]

ステッピングモーターの損失は、無負荷時に最大になるため、無負荷時のモーター損失を比較します。モーターの全損失を図14、モーター損失を銅損と鉄損に分離した結果を図15に示します。

モーター損失が最大となる400 r/minで比較すると、従来製品の損失は18 W、本製品の損失は6 Wであり、約66%減少しています。銅損と鉄損はそれぞれ、75%、50%減少しています。損失低減は、使用電力量の削減にもなるため、カーボンニュートラルへの貢献も期待できます。

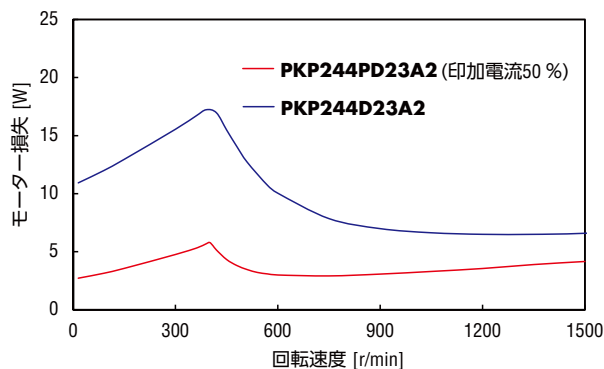


図14 モーター損失

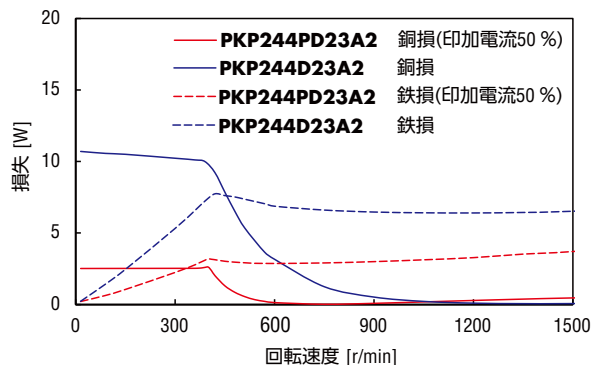


図15 銅損と鉄損

また、損失が減少すれば、モーターの温度上昇も低く抑えられます。400 r/min - 40%デューティーで運転したときのモーター外被の温度上昇を図16に示します。温度上昇は従来製品が75℃、本製品が25℃であり、約50℃減少します。

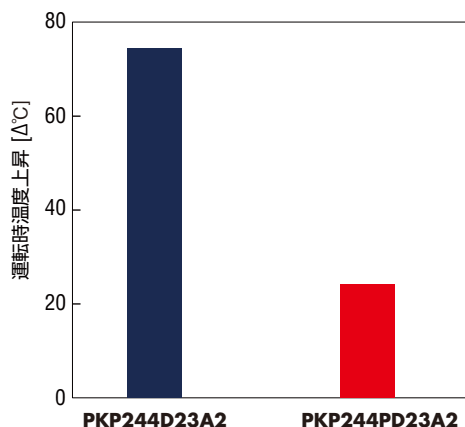


図16 運転時温度上昇

4.3. 装置の小型化・軽量化

モーターは必要トルクに合わせて選定します。必要トルクが高い場合には、選定するモーターは大型化しやすい傾向にあります。本製品は、発生するトルクが同等な従来製品の一回り大きなモーター（モーター長が長い**PKP245D23A2**、取付角寸法が大きい**PKP264D28A2**）から、置き換えることが可能です（図17参照）。モーターのサイズの減少やトルク-体積比の向上は、装置の小型・軽量化に貢献します。

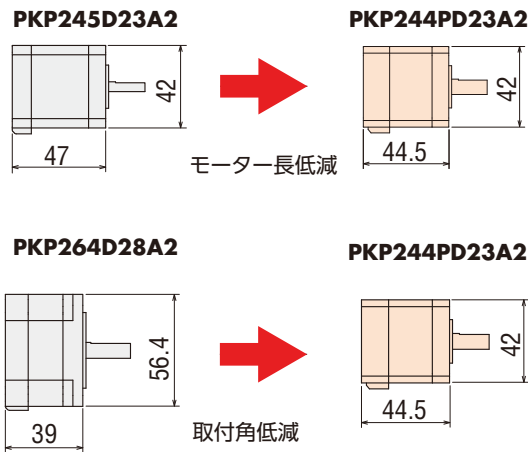


図 17 モーター外形比較

4.4. 許容ラジアル荷重向上

軸方向誘導式は、円盤状磁石をシャフトが貫通する構造のため、シャフトの径を磁石の内径以上に大きくできませんでした。径方向誘導式は磁石をローターの外周側に配置するため、軸方向誘導式よりもシャフト径を大きくすることが可能です。

本製品は、シャフト径を従来製品のφ5 mmからφ8 mmに大きくすることで、許容ラジアル荷重が約2.2倍に向上しました（図18参照）。ベルト駆動では、装置設計やテンションの調整作業が容易になるなどの効果が期待できます。

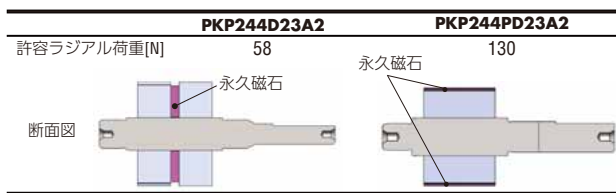


図 18 ローター断面と許容ラジアル荷重

4.5. 漏れ磁束の外部への影響

モーター外部の磁束密度を測定した結果を図19に示します。本製品は従来製品に比べて、モーターの前面および側面の磁束密度が共に減少しています。これは、軸方向誘導式の磁路が三次元的であることに対して、径方向誘導式の磁路は二次元的であるためです。従来製品は最大で4.8 mTの漏れ磁束が発生しているのに対し、本製品は最大で1.8 mT程度と、約60%低減しています。

漏れ磁束の低減は、電子顕微鏡や金属探知機のような磁気を用いる装置の性能や信頼性の向上に貢献します。

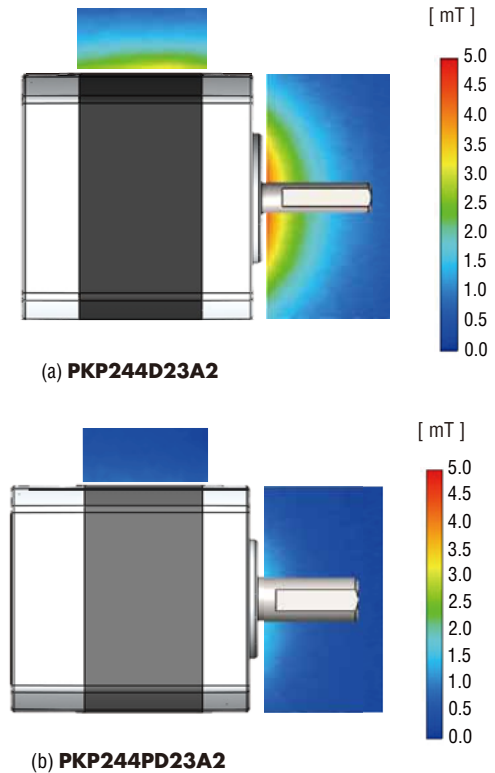


図 19 モーター外部の磁束密度

5. まとめ

径方向誘導式HB型ステッピングモーターは、従来の軸方向誘導式HB型ステッピングモーターに対し大幅な高トルク化が可能です。**PKP**シリーズ高トルクタイプは、高トルクを活かし装置の小型・軽量化、繰り返し運転時のタクトタイムの短縮が可能です。一方、モーターへの印加電流を減らし、軸方向誘導式と同等のトルクで運転する場合は、損失および温度上昇の低減できます。特に、損失低減は、カーボンニュートラルへ向けた取り組みにも貢献します。

また、軸方向誘導式のようにローター磁石の内径による制限がないためシャフト径を大きくでき、許容ラジアル荷重も向上しました。さらに、磁路が二次元的であるため、漏れ磁束が少なく、磁気の影響が懸念される装置への影響も低減します。

径方向誘導式は、ローター設計の自由度が高いため、中空シャフトモーターや低慣性モーメントローターによる高応答モーターへの応用が考えられます。また、軸方向誘導式は、外部への漏れ磁束の対策として、ステンレス材のシャフトを使用していますが、ステンレス材よりも強度の高い鉄材を使用して強度を向上させることや、シャフトに強度が必要なギヤードモーターへの適用なども考えられます。

参考文献

- (1) オリエンタルモーター株式会社,「テクニカルマニュアル ステッピングモーター編」,(2018)
- (2) 丸山 淳,「ステッピングモーター**PK**シリーズ各タイプの特徴」,RENGA, No. 164(2003)
- (3) 金子 貴志,「高トルクタイプ2相ステッピングモーター**PKP**シリーズの特徴」,RENGA, No. 177(2013)
- (4) 住田 翔,「**PKP**シリーズ 小型・薄型コネクタ搭載モーターの開発」,RENGA, No. 1812(2018)
- (5) 百目鬼 英雄,「ステッピングモーターの使い方」(1993), p17-18, 株式会社 工業調査会
- (6) 佐藤 靖雄,「脱調レスステッピングモーターユニット**AR**シリーズの低損失化技術」,RENGA, No. 170(2008)

筆者



須原 亨

技術開発本部 開発統括部