

ワイドエアギャップ構造と不均一卷線を併用した 超低トルクリプルPMモータの 製作精度がコギングトルクに与える影響

松浦 皓平*, 野口 季彦 (静岡大学)

Impact of Machining Accuracy on Cogging Torque in Ultra-Low-Torque-Ripple PM Motor

Taking Wide Air-Gap Structure and Non-Uniform Windings into Account

Kohei Matsuura, Toshihiko Noguchi (Shizuoka University)

1. まえがき

精密ロボットの駆動に使われるモータでは、要求仕様を満たす平均トルク出力と同時に 0.1 % 未満の超低トルクリプルが求められる。従来は低コギングトルクと低トルクリプルを実現しやすいスロットレスモータが用いられてきたが、複雑な構造とコストがかかるという問題がある⁽¹⁾。そのため、インナーロットをもち高トルク密度かつ低トルクリプルを両立する永久磁石 (PM) モータの開発が求められている。筆者らは Fig.1 に示すワイドエアギャップと不均一卷線を併用し、集中巻でありながら高トルク密度と超低トルクリプルを実現する PM モータを検討し、電磁界解析上で目標仕様を達成した⁽²⁾。しかしながら、電磁界解析では製作精度を考慮していない場合が普通であり、超低トルクリプルモータでは僅かな寸法公差がトルクリプルに大きな影響を及ぼす。本稿ではモータの製作精度に着目し、コギングトルクに与える影響を検討したので報告する。

2. 概要

コギングトルクはエアギャップにおける磁気エネルギーの変動によって発生する。そのためエアギャップの精度、つまり組付けや回転子外径、固定子内径の精度が重要となる。組付け精度は Fig.2 に示すように回転の中心が固定子の中心と一致していない TYPE A 偏心となり、回転子外径の精度は回転の中心と回転子の中心が一致していない TYPE B 偏心となる⁽³⁾。JMAG-Designer20.1TMを用いた解析によると、TYPE A 偏心により 10 次、TYPE B 偏心により 9 次のコギングトルクが発生することが、また、固定子内径の精度は TYPE A の偏心と同様に 10 次のコギングトルクに影響することが確認されている。本稿では現在顕著に表れている 9 次のコギングトルクを改善するために TYPE B 偏心、すなわち回転子精度の改善に着目した。

3. 検討方法

<3・1> 検討モデル

回転子精度を改善するために、Table. 1 に示すネオジウム焼結磁石を使用したモデルと新たにネオジウムボンド磁石を使

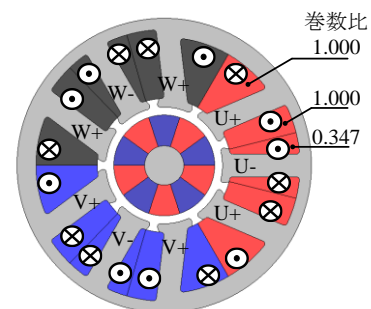


Fig. 1. Analysis model.

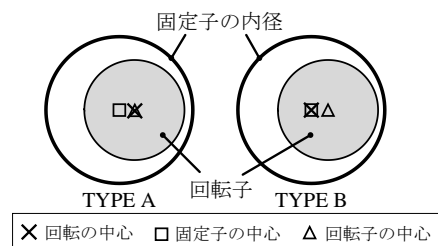


Fig. 2. Types of eccentricity.

Table 1. Magnet specifications.

	Sintered NdFeB model	Bond NdFeB model
Grade	N52	GPM-10
B_r (T)	1.40 ~ 1.47	0.68 ~ 0.73
BH_{max} (kJ/m ³)	378 ~ 422	76 ~ 84

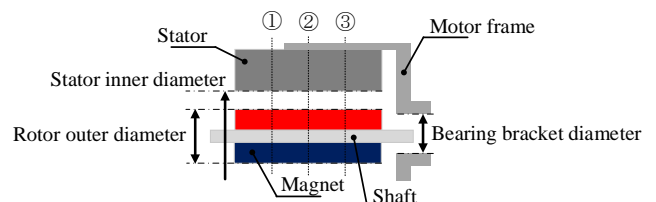


Fig. 3. Cross section of simplified motor model.

用したモデルを用意した。一般的にネオジウムボンド磁石のほうが高精度に加工しやすいが磁力が弱いといった欠点がある。そこでネオジウムボンド磁石モデルは回転子外径 (磁石の厚さ) を大きくし、2つのモデルのエアギャップ磁束密度が同程度となるようにした。

<3・2> 評価方法

寸法精度の計測には東京精密の真円度・円筒形状測定機 ROND COM 54DX3 を用いた。Fig. 3 にモータの断面図を示す。TYPE A 偏心率を图中的固定子内径とベアリングブラケットの同軸度とし計測した。TYPE B 偏心率や固定子内径の精度は、基準となる径に対して、どの程度の振れがあるのかを图中的①、②、③の箇所計測して求めた。

4. 検討結果

<4・1> TYPE A・B 偏心

Table. 2 に固定子内径とベアリングブラケットの同軸度を示す。ネオジムボンド磁石モデルではネオジム焼結磁石モデルに比べ TYPE A 偏心率が 71.6% 低減した。また Fig. 4 に回転子外径の精度を示す。波形からも目的通りネオジムボンド磁石モデルでは高精度な加工ができていることがわかった。ネオジム焼結磁石モデルでは $57\mu\text{m}$ の振れがあるのに対して、ネオジムボンド磁石モデルでは $4\mu\text{m}$ の振れに収まり TYPE B 偏心率が 93.0% 低減した。

<4・2> 固定子内径の精度

Fig. 5 に固定子内径の精度を示す。图中的谷部分はスロット開口部を示している。ネオジムボンド磁石モデルでは、固定子内径は基準寸法に対して全体的に $25\mu\text{m}$ 小さいが、コギングトルクの発生原因となる振れはどちらも $15\mu\text{m}$ 程度でありネオジム焼結磁石モデルと同程度の精度であることが確認できた。

<4・3> コギングトルク

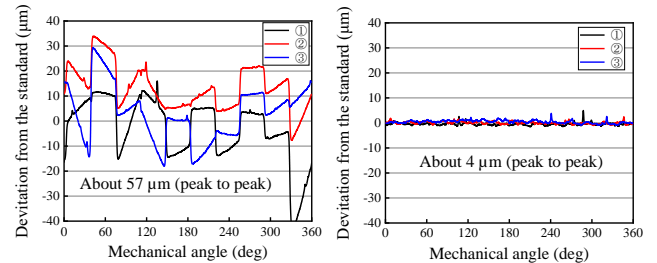
Fig. 6 にコギングトルクの測定結果を示す。Fig. 6 (a) と (b) の波形からネオジム焼結磁石モデルではコギングトルクの 9 次成分が支配的だったことに対して、ネオジムボンド磁石モデルでは 10 次成分が支配的であることがわかる。これはネオジムボンド磁石モデルでは TYPE B 偏心率が激減したことで 9 次のコギングトルクが 63.9% 低減したためである。また、これによりトルクリプル率は 0.21pt 改善した。しかしながら、ギャップ磁束密度を同等にするため、エアギャップ長を短くしたことにより、TYPE A 偏心や固定子内径精度がエアギャップ長に与える影響が大きくなったため 10 次のコギングトルクが 2.39 倍増加したと考えられる。

5. まとめ

本稿では、モータの製作精度に着目しコギングトルクに与える影響を検討した。回転子精度を改善するためにネオジムボンド磁石モデルを作成し、その結果、TYPE B 偏心率が 93.0% 低減され、9 次のコギングトルクが 63.9% 低減した。これによりリプル率が 0.21pt 改善され、1.47% となった。しかしながら、本モータの目標仕様であるトルクリプル率 0.05% 未満と比較すると未だ 30 倍ほど大きい。今後は製作精度によって発生するコギングトルクの 9 次、10 次成分を発生させないモータ構造について検討していく所存である。

Table 2. Coaxiality of stator inner and bearing bracket.

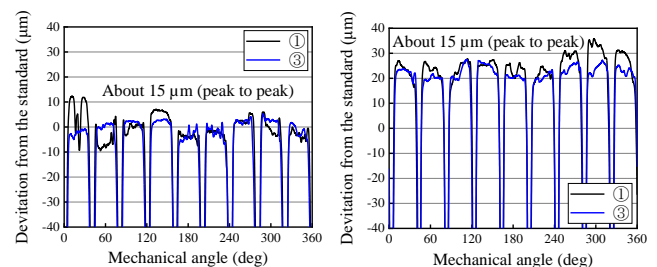
Coaxiality (μm)	Sintered NdFeB model	Bond NdFeB model
	74	21



(a) Sintered NdFeB model.

(b) Bond NdFeB model.

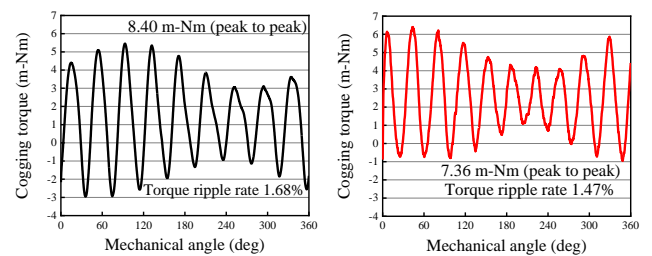
Fig. 4. Rotor outer diameter accuracy.



(a) Sintered NdFeB model.

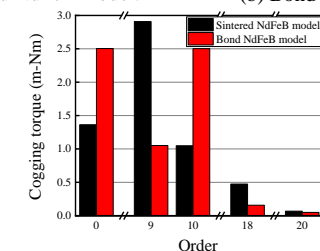
(b) Bond NdFeB model.

Fig. 5. Stator inner diameter accuracy.



(a) Sintered NdFeB model.

(b) Bond NdFeB model.



(c) FFT results of cogging torque.

Fig. 6. Cogging torque.

文献

- (1) J.F. Gieras, I.A. Gieras, "Performance analysis of a coreless permanent magnet brushless motor," *IEEE IAS Annual Meeting* (2002).
- (2) 松浦・野口: 「ワイドエアギャップ構造と不均一巻線を併用した超低トルクリプルモータの検討」 令和3年電気学会全国大会, No.5-032, pp.59-60 (2021)
- (3) 江部・原田・石原・戸高: 「回転子偏心を考慮した回転機のトルク解析」 *電学論 B*, Vol.118, No.10, pp.1085-1090 (1998)