

# Reduction of Cogging Torque in Permanent Magnet Motors

Takao Yabumi

Research & Development Lab., Daido Steel Co., Ltd. 2-30 Daidocho, Minami-ku, Nagoya 458-8545, Japan

EPS (Electric Power Steering) enables an increase in automotive fuel efficiency by 3-5% and contributes to the protection of the environment by eliminating the oil medium used in conventional hydraulic power steering. For this reason a sharp increase in demand for EPS is expected. Permanent magnet motors are generally used for EPS but a reduction of cogging torque in these motors is one of the challenges we face to ensure safe and comfortable vehicle handling. In this paper, magnetic field analysis was conducted on brushless motors with radially oriented ring magnets to find effective ways to reduce cogging. Through the investigation of the relationship between coercive force distribution and magnetizing waveform, it was confirmed that the following methods were effective in reducing the cogging torque.

- (1) Optimization of the skew magnetization angle according to the coercive force distribution along the axial direction of the magnet.
- (2) Control of the magnetizing intensity along of the circumferential direction of the magnet.

Key words: permanent magnet, motor, coercive force distribution, cogging torque, skew angle

## EPS用永久磁石モータのコギングトルク低減

藪見崇生

大同特殊鋼株式会社技術開発研究所, 名古屋市南区大同町2-30 (〒457-8545)

### 1. 緒言

現在, 地球温暖化や大気汚染など環境問題が地球規模での課題となっている。自動車に関しては全エネルギー消費量に占める割合が約25%と比較的大きいこと, モーション部品に環境汚染物質である油圧媒体を用いるものが多いことなど環境改善のため今後置換わる部品が多数存在する。<sup>1)</sup>

EPS (Electric Power Steering) は直流モータでステアリングを回す力を補助するシステムである。現状の油圧駆動のNPS (Normal Power Steering) と比較して, 3~5%の燃費向上が可能なことと, 油圧媒体を用いないために環境改善が可能ということから, 2005年以降も急激な需要増加が見込まれるモーション部品である<sup>2)~4)</sup>。

NEOQUENCH-DR磁石はこのEPSモータ用として, 高い磁力, 小さな磁力ばらつき, 高い着磁波形の融通性などの適性を有しており, EPSモータ用磁石として, 非常に有望なリング磁石である。

EPSモータにとくに求められる性能は, (1)高出力, (2)低コギングトルク (モータに電流が流れていないときのスムーズな回転) および(3)低トルクリップル (モータに電流が流れているときのスムーズな回転) の3項目であり, これらは磁石性能と密接な関係がある。EPSモータは力をアシストする対象となるステアリングを人が操作することから, 回転性能に対する要求は厳しい。たとえば, EPSモータと同等出力のサーボモータに求められるコギングトルクとトルクリップルがそれぞれ定格トルクの0.3%および5%以下であるのに対して<sup>5)6)</sup>, EPSモータのそれは0.2%および3%以下と非常に高

度な性能が求められている。そこで, 一般的な定格トルク5N・mのブラシレスモータを検証モデルとし, 着磁波形とコギングトルクの関係に関して, 電磁場解析を用いて検討した。その結果, NEOQUENCH-DR磁石の軸方向 (高さ方向) の磁気特性分布に応じたスキュー着磁を行うことにより, コギングトルクを低減できることが判明した。さらに, 円周方向の着磁波形に関しては, 着磁傾斜を用いて最適化することにより, コギングトルクを低減できることもわかった。これらの解析結果をもとに試作実験を行い, NEOQUENCH-DR磁石を用いた低コギングトルクモータが実現できることを確認したので報告する。

### 2. NEOQUENCH-DR磁石

#### 2.1 磁気特性

評価に用いたブラシレスモータに使用した永久磁石は, (株) ダイドー電子 (以下 DEC という) 製のNEOQUENCH-DRでグレードはND-35HRである。この磁石は, ラジアル方向に異方性を有するリング磁石で, 最大エネルギー積は約300kJ/m<sup>3</sup>である。

本研究に用いたND-35HR磁石の諸元をTable1に示す。外径および内径は39mm, 33mmとし, 高さは25mm, 50mmおよび, 70mmの3種類とした。最大エネルギー

Table 1. Desired and actual specifications of ND-35HR.

Outside diameter (mm)	39
Inside diameter (mm)	33
Length (mm)	25,50
Material	Nd-Fe-B
Residual induction $B_r$ (T)	1.16-1.30
Coercive force $H_{CB}$ (kA/m)	880-985
Recoil Permeability	1.05
Maximum energy product (kJ/m <sup>3</sup> )	270-300
Density (Mg/m <sup>3</sup> )	7.6

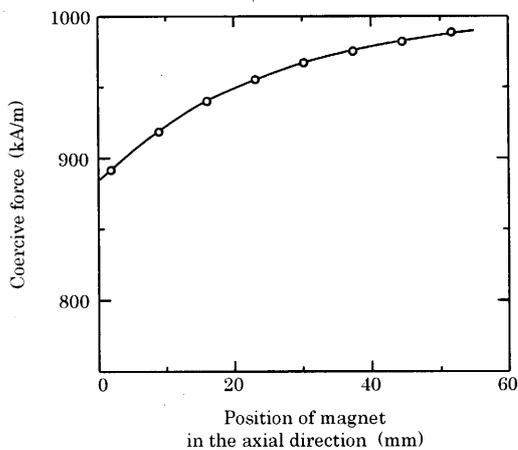


Fig.1 Coercive force distribution of ND-35HR.

積は約 300kJ/m<sup>3</sup> である。製造方法に起因する磁石高さ方向の保磁力  $H_{CB}$  の分布は、6.5mm 間隔で試験片を採取し、その試験片に 3200kA/m のパルス着磁を施し、電子磁気工業 (株) 製 BH トレーサ BH-5501 を用いて測定した。解析におけるパラメータとして用いる保磁力  $H_{CB}$  の分布を Fig.1 に示す。押し出し初期の部分は低く、押し出し終期において分布が均一に近づく特性となっている。なお、ND-35HR ではリコイル透磁率が 1.05 と一定のため、保磁力  $H_{CB}$  が大きい場合、残留磁束密度  $B_r$  は高くなり、保磁力が小さい場合、 $B_r$  は低くなる。

## 2.2 着磁波形の制御

Fig.2 に ND-35HR の初磁化曲線と減磁曲線 (B-H 曲線) を示す。NEOQUENCH-DR 磁石では、着磁時の磁界の強さ ( $H_m$ ) を制御することにより、磁石磁化強さを制御することが可能である。著者が用いた円周方向着磁波形は、この特長を生かし、着磁ヨーク形状と材質に工夫を凝らすことで実現した。コギングトルク低減のために着目した着磁傾斜角の定義を Fig.3 に示す。ND-35HR では、着磁時の磁界の強さをすべての磁石位置で 3200kA/m 以上とした場合、磁石磁化強さは飽和し、多極に着磁した円周方向着磁波形は方形波

となる。着磁傾斜では、平坦部となる C 点と D 点間の着磁磁界の強さが 3200kA/m となるように磁石と着磁ヨーク間のギャップを一定とし、磁化強さを傾斜させる A 点と C 点間、B 点と D 点間では、磁石と着磁ヨークとのギャップを調整した。さらに、A 点と C 点の円周に対応する角度を着磁傾斜角度とする。なお、着磁電源コンデンサー容量 3000  $\mu$ F、着磁電圧 1800V の条件下で着磁ヨークを設計し、着磁を行った。

スキュー着磁の概念図を Fig.4 に示す。スキュー着磁は、磁石高さ方向において、磁石の極が反転する位置をスキュー角度分、円周方向に捻らせた状態で着磁する方法である。着磁を施した磁石では、S 極と N 極の境目は、側面から見ると任意の傾きを有する直線となる。

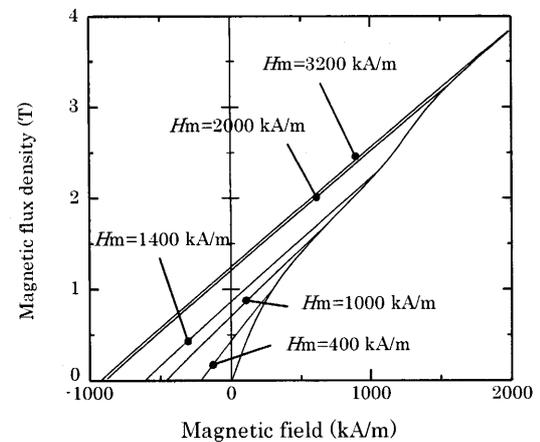


Fig.2 Initial magnetization curve and demagnetization curve of ND-35HR.

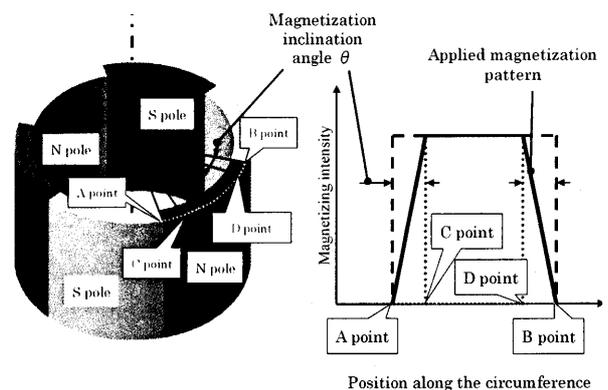


Fig.3 Magnetization inclination.

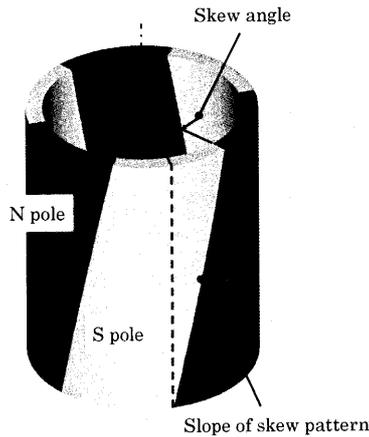


Fig.4 Schematic diagram of skew magnetizing.

### 2.3 耐熱性

EPS モータ用磁石では、通常 233K から 393K 程度までの磁力の安定性が要求される。さらに、着磁傾斜などの表面磁束密度は着磁強度の強弱により制御されているため、弱く着磁されている極の境界付近など磁石の温度上昇、モータ始動時に生じる逆磁界などの原因により、不可逆の磁束密度低下が発生する懸念がある。Fig.5 に ND-35HR における不可逆減磁率の温度依存性を示す。横軸は温度、縦軸はパーミアンス係数をパラメータとした不可逆減磁率を示す。今回対象としたモータでは、定格電流の 5 倍の励磁電流を流した場合におけるパーミアンス係数は 2 以上となる。よって、393K における熱による不可逆減磁率は 1% 以下と問題にならない程度と考える。さらに、着磁傾斜部における不完全着磁部における熱減磁を測定した結果、完全着磁部より減磁率が低いことを実験的に確認している。

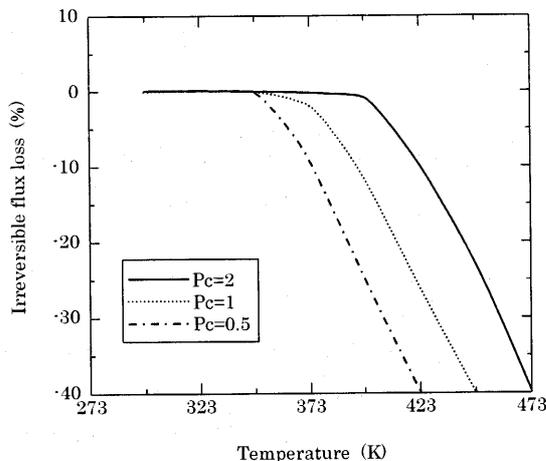


Fig.5. Temperature dependence of irreversible flux loss of ND-35HR.

### 3. NEOQUENCH-DR 磁石におけるスキュー着磁の最適化

#### 3.1 解析モデル

解析を実施したモータ構造を Fig.6 に示す。このモータでは、外径 39mm、内径 33mm、高さ 25mm の磁石を 2 個、もしくは高さ 50mm の磁石を 1 個使用し、板厚 0.5mm の 3%Si-Fe を積層したシャフトに接着し回転子とした。解析に用いた 3%Si-Fe の初磁化特性を Fig.7 に示す。特性は、電子磁気工業 (株) 製 BH トレーサ BH-5501 を用いて測定した。横軸は磁界、縦軸は磁束密度を示す。代表的な磁気特性として磁界 16kA/m での磁束密度が 1.8T、最大比透磁率が約 5000、保磁力が 80A/m の磁性材料を用いた。モータ構造は磁石の極数が 6 極、固定子の極数が 9 極の 6P9S 構造とした。なお、固定子体格は最外径が  $\phi 75$ 、最内径が  $\phi 41$ mm であり、固定子と回転子とのギャップは 1mm とした。また、回転子シャフトと同じ板厚 0.5mm の 3%Si-Fe を磁石高さ分積層したものを使用した。解析形状モデルは CAD を用いて作成した。NEOQUENCH-DR 磁石、モータ内の磁性材料特性はおよび社内で測定したデータを用い、回転性能などモータ性能評価には内製した評価装置を用いた。

電磁界解析には、JMAG ((株) 日本総合研究所製) を用いた 2 次元過渡応答解析を実施し、0.1mm に相当する各高さ位置の解析値を積算することで、3 次元の解析値とした。モデル高さが 50mm、検討したスキュー角度が最大 40 度であることから、0.1mm に相当する各高さ位置の解析により、0.08 度毎のスキュー角度影響を考慮したと考える。以下に示すが、要素サイズよりモデルの円周方向分解能が 0.1 度毎であるため、高さ方向の分割は十分であると考える。作成したモデル一例を Fig.8 に示す。領域 1 をシャフト、領域 2 を外周 N 極、内周 S 極の磁石、領域 3 を外周 S 極、内周 N 極の磁石、領域 4 を固定子、領域 5 を巻線領域、それ以外を空気層としてモデル化した。さらに、磁界、電流分布の周期性から、X 軸上に存在する節点と X 軸を 120 度回転させた軸上に存在する節点を周期境界として対応させ、固定子外周の空気層最外周に磁束がその境界から漏れない対象境界を設定した。モデル形状の作成には、オートデスク (株) の AutoCAD を用い、磁界、電流分布の対称性から 3 分の 1 モデルに相当する形状を作成した。要素サイズに関しては、トルク発生部位となる固定子と回転子間では、一辺を約 0.05mm とし、全体では、一辺を 1mm 以下で作成した。回転子は、モータへの投入電流がない状態で、1rpm の速度で回転させ、約 0.1 度毎に解析を実施しながら、120 度まで回転位置を変化させた。このときに発生するコギングトルクを検討した。

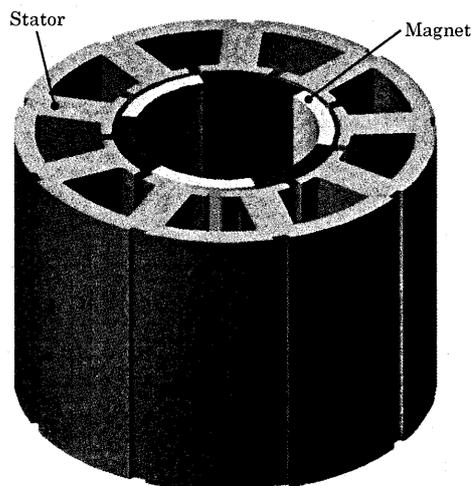


Fig.6. Structure of 6-pole 9-slot motor.

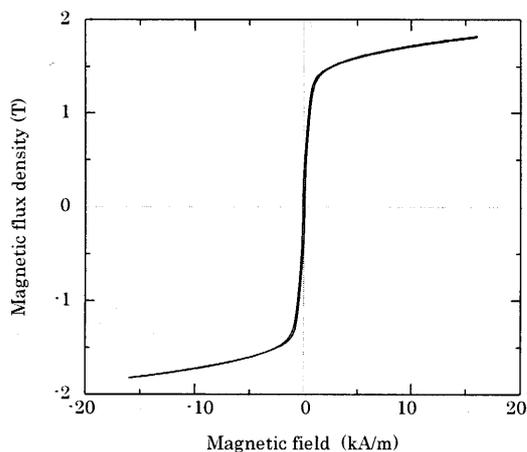


Fig.7 B-H curve of 3%Si-Fe steel sheet with thickness of 0.5 mm.

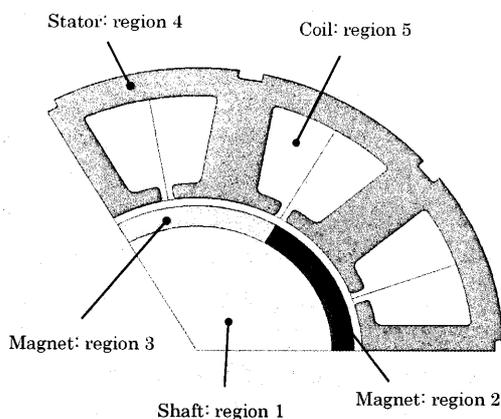


Fig.8 Analysis model of 6-pole 9-slot motor.

### 3.2 コギングトルクとトルクリップル

コギングトルクは固定子と回転子 (=本モデルでは永久磁石) の間に発生する「磁気吸引力」に基づくトルクの回転角に対する変化のことをいう。具体的には、モータへの入力電流がない条件下で回転子を回したときに感じるトルクムラである。EPS モータでは、ステアリング始動時のスムーズさ、ステアリング固定時の安定性に影響を与える。トルクリップルはモータ通電時にコギングトルクと同様に固定子と回転子の間に発生する「磁気吸引力」に基づくトルクの回転角に対する変化のことをいう。EPS モータでは、ステアリング回転時のスムーズさに影響を与える。

### 3.3 磁石高さ方向の保磁力分布とコギングトルク

NEOQUENCH-DR 磁石は製造方法に起因した保磁力分布を高さ方向に発生させることができる。片端が高保磁力の場合、反対端は低保磁力となる。このとき高保磁力部は高エネルギー積、低保磁力部は低エネルギー積となる。また、EPS 用に用いる磁石高さは 38mm 以上が多く、使用する部位により高さ方向の保磁力分布が異なる。そこで、押し出し初期側から 25mm を取り出した磁石を 2 個組み合わせさせた場合に関して、スキュー着磁角度との依存性をコギングを評価項目として解析した。

Fig.9 に高さが 25mm の磁石を 2 個用いて、上下両端の保磁力を高、中心の保磁力を低とした場合の保磁力分布を示す。製造条件を変更し、保磁力分布が半分となる分布においても実施し、その傾向を確認した。Fig.10 にスキュー角度がコギングトルクに与える影響について保磁力分布をパラメータとして解析値とスキュー角度 18,20,22 度での実測値を示す。横軸はスキュー角度、縦軸は最大コギングトルクである。通常 6P9S 構造モータの場合、コギングトルク波形の周期性から、スキュー角度を 20 度とするとコギングトルクはほぼ零となる (以下この角度を理論スキュー角度という)。しかし、高さ方向に保磁力分布を有する場合、理論スキュー角度において、最小値とはならず、相対的に大きなコギングトルク値となる。さらに、スキュー角度 18,20,22 度では、18 度が最も低いコギングトルクとなり、保磁力分布を半分とした場合、相対的にコギングトルクが低くなる。実測値からもその傾向は確認できる。

解析において、保磁力分布を小さくした場合、コギングトルクを最小とするスキュー角度は理論スキュー角度に近づくことがわかった。しかし、今回の実測値における差異では、モータの製作精度に起因するギャップ間距離のばらつき、回転子と固定子の同軸度などとの起因と区別することが困難と推定でき、その詳細に関しては検討が必要と考える。

Fig.11 に高さが 25mm の磁石を 2 個用いて、上下両端の保磁力を高、中心の保磁力を低とした場合の保磁力分布を示す。Fig.13 にスキュー角度がコギングトルクに与える影

響について保磁力分布をパラメータとして解析値とスキュー角度 18,20,22 度での実測値を示す。横軸はスキュー角度、縦軸は最大コギングトルクである。この場合、コギングトルクを最小とするスキュー角度は、理論スキュー角度より大きく、実測からもその傾向は確認できる。さらに、解析において、保磁力分布を小さくした場合、コギングトルクを最小とするスキュー角度は理論スキュー角度に近づくことも確認できるが、実測において、保磁力分布の大きさによるコギングトルク差異は確認できなかった。これは、モータの製作精度に起因するばらつきなどが差異より大きいためと考える。よって、さらに大きな保磁力分布磁石での検討が必要と考える。

以上の結果から、磁石高さ方向の保磁力分布とコギングトルクの成分を高さ方向に分布させお互いに相殺させる手法であるスキュー着磁には、大きな相関性があるといえる。よって、磁石高さ方向の磁力分布に応じて、理論スキュー角度からスキュー角度を調整することにより、コギングトルクの低減が可能となる。

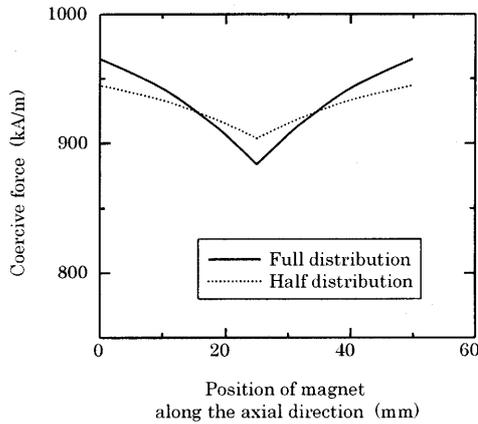


Fig.9 Coercive force distribution (1) of two pair of magnets stacked in the axial direction with lower coercivity ends put together (one pair with full distribution and another pair with half distribution).

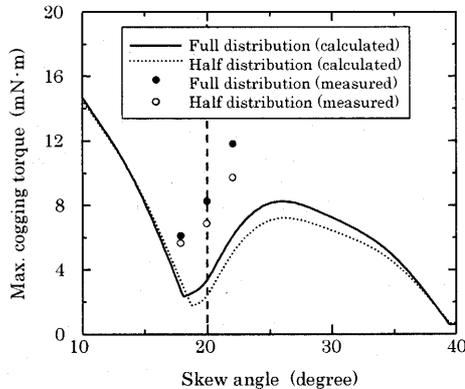


Fig.10 Influence of coercive force distribution on cogging torque (1).

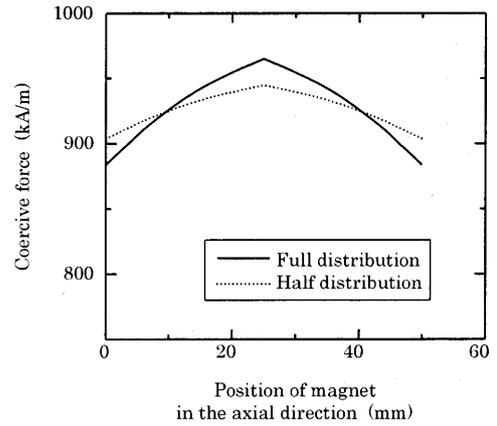


Fig.11 Coercive force distribution (2) of two pair of magnets stacked in the axial direction with higher coercivity ends put together (one pair with full distribution and another pair with half distribution).

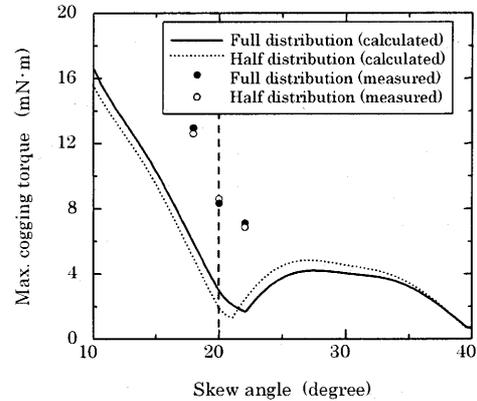


Fig.12 Influence of coercive force distribution on cogging torque (2).

### 3.4 スキュー着磁形状とコギングトルク

次に、押し出し初期側から 70mm を取り出した磁石を使用して、スキュー着磁波形との関係をコギングトルクを評価項目として解析した。検討したスキュー着磁の形状として、通常型のスキュー着磁、くの字型スキュー着磁、および、逆 Z 型スキュー着磁を Fig.13 に示す。くの字型スキュー着磁を施した磁石では、S 極と N 極の境目は、側面から見ると、くの字とした変極点を 1 点有する着磁波形となる。逆 Z 型スキュー着磁を施した磁石では、S 極と N 極の境目は、側面から見ると Z 字を逆とした形状で、変極点を 2 点有する着磁波形となる。

磁石高さ方向の保磁力は低保磁力端が 880kA/m、高保磁力端が 985kA/m である。実測を行ったモータに適用したくの字型スキュー着磁波形は、磁石高さ中心を変極点とした。逆 Z 型スキュー着磁波形は、磁石高さ 70mm に対して、高保磁力端から最初の変極点までを 25.2mm、次の変極点までを 25.2mm とした。スキュー着磁の開始点、終了

点、変極点で最も角度差が大きくなる組合せの角度を仮想スキュー角度とし、仮想スキュー角度を変数として、コギングトルクへの依存性を検討した。

磁石高さ方向の保磁力分布が一定で、スキュー着磁を通常型、くの字型、逆Z型ともにそれぞれの仮想スキュー角度が等しい磁石を使用した場合、最大コギングトルクはすべて同じとなる。しかし、磁石高さ方向に保磁力分布を有している場合には、各スキュー着磁波形により差異がでることが推定される。なお、着磁傾斜角度は2.5度とした。さらに、両端部での高さ方向磁束漏れ影響を低減するため、磁石高さを70mmとした。Fig.14に最大コギングトルクを解析により推定した結果を示す。横軸は仮想スキュー角度、縦軸は最大コギングトルクである。解析の結果、逆Z型、くの字型は通常型と比較して、コギングトルクが低くなる。さらに理論スキュー角度では、逆Z型のコギングトルクはほぼ零となる。これは、コギングトルク波形の周期性を利用した相殺効果が逆Z型、くの字、通常型の順で細分化されたことに起因していると考えられる。細分化された区間における保磁力の最大値と最小値の差が、逆Z型で最も小さく、通常型で最も大きくなるのがその要因であると考えられる。

この解析による推定をもとに3水準に着磁した磁石をモータに組み込み、実測試験を行った。今回検証を行った試験水準は、仮想スキュー角度を20度とした。試験の結果、コギングトルクの平均値は通常型が最も大きく、逆Z型が最も小さくなった。解析精度に関しては解析値が実測値に対して数  $\text{mN}\cdot\text{m}$  大きくなったが、通常型が最も大きく、逆Z型が最も小さくなる点は解析値と実測値と一致している。磁石高さ50mmで実施した試験では、くの字型が最も小さくなったが、磁石両端部での磁束漏れ影響が少ない磁石高さを高めた場合、解析値と実測値の傾向が同じとなることを確認した。ただし、逆Z型スキュー着磁ヨークではヨーク製作難易度が通常型より高いこと、必要とされるスキュー角度精度が高いことなどから実用化するには、検討すべき課題が多いことも確認した。次に、回転方向によるコギングトルクの差についても検証した。通常型が最も大きく、逆Z型が最も小さくなった。スキュー方向を多数変極にすることにより、回転方向によるコギングトルク差異を低減できることがわかった。この理由に関しては、磁石高さを高めた場合、低減効果が大きいことから、三次元的な磁束流れの影響があると推定できる。今回の解析では二次元解析を拡張した方式であるため、今後、三次元解析を実施することで検討していきたいと考える。

#### 4. NEOQUENCH-DR 磁石における円周方向着磁波形

##### 4.1 解析モデル

解析を実施したモータ構造を Fig.15 に示す。このモータでは、外径39mm、内径33mm、高さ50mmの磁石を1個使用し、板厚0.5mmの3%Si-Feを積層したシャフトに接着して回転子とした。モータ構造は磁石の極数が4極、固定子の極数が12極の4P12S構造とした。なお、固定子体格は最外径が $\phi 75$ 、最内径が $\phi 41\text{mm}$ とし、固定子と回転子とのギャップは1mmとした。また、回転子シャフトと同

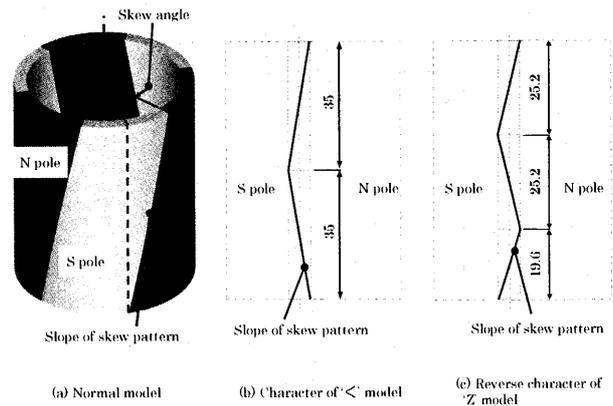


Fig.13 Schematic diagram of skew magnetization patterns.

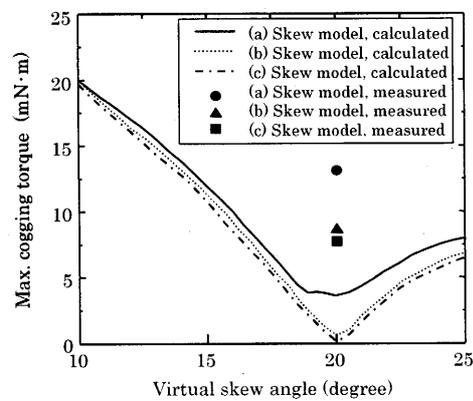


Fig.14 Influence of skew magnetization pattern on cogging torque.

じ板厚0.5mmの3%Si-Feを磁石高さ分積層したものを使用した。電磁界解析は、2次元過渡応答解析を実施し、0.1mmに相当する各高さ位置の解析値を積算することで、3次元の解析値とした。作成したモデル一例を Fig.17 に示す。領域1をシャフト、領域2を外周N極、内周S極の磁石、領域3を固定子、領域4を巻線領域、それ以外を空気層としてモデル化した。さらに、磁界、電流分布の周期性から、X軸上に存在する節点とX軸を90度回転させた軸上に存在する節点を反周期境界として対応させ、固定子外周の空気層最外周に磁束がその境界から漏れない対象境界を設定した。モデル形状の作成には、CADを用い、磁界、電流分布の対称性から4分の1モデルに相当する形状を作成した。

要素サイズに関しては、トルク発生部位となる固定子と回転子間では、一辺を約0.04mmとし、全体では、一辺を1mm以下で作成した。回転子は、モータへの投入電流がない状態で、1rpmの速度で回転させ、約0.05度ごとに解析を実施しながら、90度まで回転位置を変化させた。このときに発生するコギングトルクを検討した。

円周方向の着磁波形として、着磁傾斜を用いた。磁石高

さ方向の保磁力分布は、円周方向の着磁波形影響を検討するため、解析では一定と仮定した。なお、回転性能などモータ性能評価には内製した評価装置を用いた。

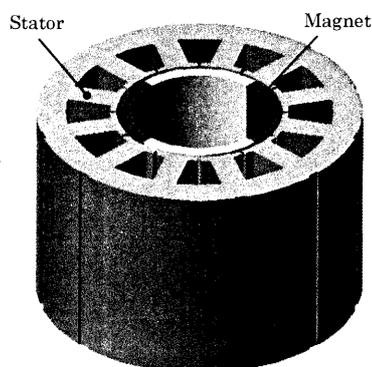


Fig.15 Structure of 4-pole 12-slot motor.

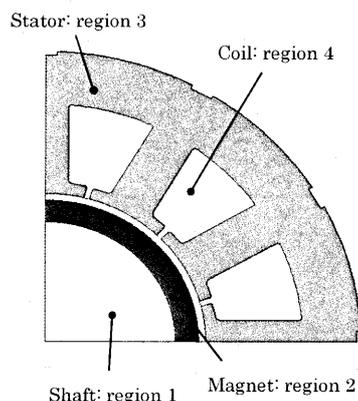


Fig.16 Analysis model of 4-pole 12-slot motor.

#### 4.2 円周方向着磁波形とコギングトルク

コギングトルクとスキュー着磁の相関を、着磁傾斜角度をパラメータとして解析した結果とスキュー角度を15度、着磁傾斜角度を5、6.3、7.5度とした実測値をFig.17に示す。横軸はスキュー角度、縦軸は最大コギングトルクである。磁石高さ方向の保磁力分布を一定とした場合、4P12S構造のモータにおける理論スキュー角度は30度となり、着磁傾斜角度とは無関係にコギングトルクは最小となる。さらに、着磁傾斜角度を6.3度とした場合、他着磁傾斜角度と比較してコギングトルクは低くなり、理論スキュー角度の半分となるスキュー角度15度においても極小点が確認できる。スキュー角度を15度とし、着磁傾斜角度を5、6.3、7.5度として試作評価した結果、着磁傾斜角度5度、7.5度では、コギングトルク18mN・m、16mN・mに対して、着磁傾斜角度6.3度では、8mN・mとコギングトルクが相対的に低減していることを確認した。

スキュー着磁を施さない場合のコギングトルク波形と着磁傾斜角度の相関を検討した解析値をFig.18に示す。横軸はモータの回転角度位置、縦軸はコギングトルクである。着磁傾斜6.3度のコギング

トルク波形を他の着磁傾斜角度における波形と比較すると周期が半分となる。さらに、着磁傾斜角度6.3度を挟んで、コギングトルク波形位相が反転していることがわかる。このため、磁石高さ方向にトルクの回転角に対する変化を平均化するスキュー着磁が他の着磁傾斜角度波形で効果的な30度に加えて15度でも効果が発生すると推定できる。今回実測評価したスキュー角度15度で着磁傾斜角度6.3度が、他の着磁傾斜角度と比較してコギングトルクが低くなったのは、コギングトルク波形位相の反転する付近となったためと推定される。解析値と実測値との差が大きい原因として、モータの機械的精度もあるが、磁石磁力ばらつき、着磁傾斜角度精度も起因していると考えられる。磁石磁力ばらつきに関しては、製造プロセス改善などにより、今後はさらに低いばらつきとなることが想定される。着磁傾斜角度精度に関しては、技術課題であるが、解析と連携した着磁ヨーク設計技術向上により実現できると考える。よって、これらの改善を付加することにより更なる低コギングトルク実現ができると考える。

円周方向着磁波形は、磁束流れに大きく影響するステータ形状に依存して、トルクの発生起因となるギャップにおける磁束分布を形成することから、今回評価に用いたモータ構造、形状では、着磁傾斜角度6.3度とすることにより、スキュー角度15、30度でコギングトルクを極小とすることができると考える。さらに、技術課題はあるが、着磁傾斜を用いて理論スキュー角度の半分のスキュー角度でのコギングトルク低減効果を利用すれば、スキュー着磁による出力低下が少ない状態で、低コギングトルクを実現できると考える。

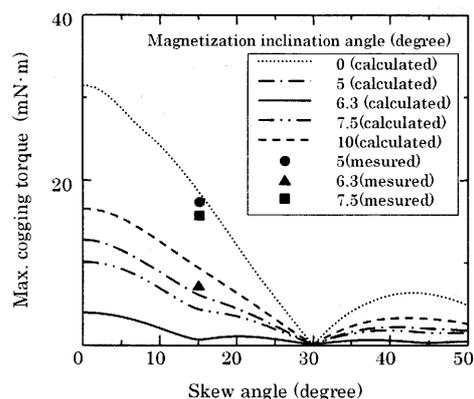


Fig.17 Relationship between maximum cogging torque and skew angle.

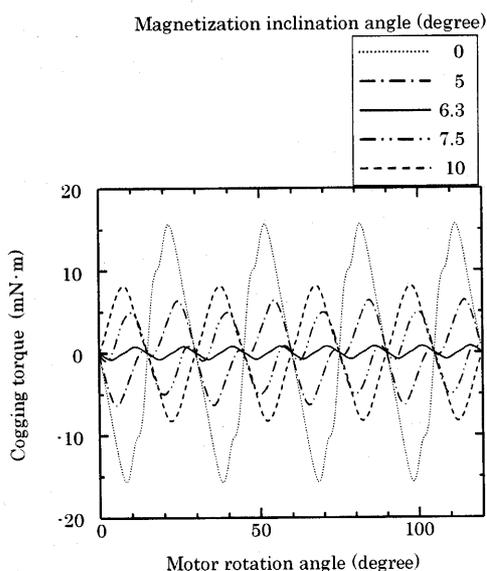


Fig.18 Change in cogging torque pattern with magnetization inclination angle.

## 6. 結言

EPS モータにとくに求められる性能である回転性能において、コギングトルクと着磁波形について検討し、NEOQUENCH-DR 磁石に対して、スキュー着磁、着磁傾斜を適用することで、低コギングトルクモータを実現できることがわかった。実用 EPS モータでは、コギングトルク低減と同時に、トルクリップル低減、高出力が要求される。本論文では触れていないが、着磁波形とこれらの性能とも密接な相関があり、モータ要求仕様に応じて、それぞれの制限内で最適化することにより、高性能なモータを実現できると考える。

本論文では、NEOQUENCH-DR 磁石を用いた 6P9S モータにおいて、磁石高さ方向の保磁力分布に応じたスキュー角度、スキュー着磁波形を最適化することにより、低コギングトルクモータを実現できることを確認した。さらに、NEOQUENCH-DR 磁石を用いた

4P12S モータにおいて、着磁波形として着磁傾斜を用い、スキュー着磁と組み合わせることにより、低コギングトルクモータを実現できることを確認した。しかしながら、解析として、三次元的な影響を十分に考慮できていないことから、現象を正確に把握できない点もあり、今後は、三次元解析による理論の構築が必要と考える。

最後に、本開発の手法は、産業界で幅広く応用されるものとして期待できると考えている。

**謝辞** 本開発において、常に的確なアドバイスをいただいた(株)ガイドー電子の吉川紀夫氏、荒井修一氏、磁石の性能評価をしていただいた(株)ガイドー電子の松野裕一氏に感謝の意を表する。

## References

- 1) The Energy Conservation Center, Japan: Reconnaissance Report on Technology Trends of Energy Consumption(2000).  
(<http://www.eccj.or.jp/tech/approach/pdf/tech.pdf>)
- 2) Y. Kouzaki, G. Hirose, S. Sekiya and Y. Miyaura: NSK Technical Journal, 667(1999), 14.
- 3) W. Ijiri and T. Tsutui: KOYO Engineering Journal, 162(2002), 28.
- 4) Automotive Technology 2004: Nikkei Business Publications Inc., (2004), 112.
- 5) M. Hirano: Yaskawa Technical Review, 62(1998), 4, 202.
- 6) Miyashita, A. Takahashi, D. Kuraishi, K. Kawagishi, J. Oosawa, H. Hioki, H. Shimomura and T. Miyashita: SANYO DENKI Tecnical Report, 14(2002), 32.

2006年9月5日受理, 2006年10月2日再受理, 2006年11月13日採録