

表面磁石形同期電動機の磁石形状及び磁化方向に関するトルクの解析

三重野保男・篠原 勝次・実成 義孝・東 義高

(受理 平成 8 年 5 月 31 日)

Analysis of Direction of Magnetization for High Torque to Current Ratio in Surface Mounted Permanent Magnet Synchronous Motors

Yasuo Mieno, Katsuji Shinohara, Yoshitaka Minari and Yoshitaka Higashi

Permanent magnet synchronous motors (PM motors) are used in many industrial applications as AC servo motors. Particularly surface mounted PM motors are most used in a low power range. With recent developments of magnet materials, their high torque capability makes them suitable in a middle power range.

In this paper, different magnet configurations are presented to get high torque to current ratio. And then torque taking the direction of magnetization into account is calculated with a non-sinusoidal fed current to suppress pulsating torque.

In this case, electro motive forces (EMF) are distorted by non-sinusoidal flux density distribution and a sinusoidal current produces torque pulsations.

To eliminate these pulsations, an adequate instantaneous current is computed. Consequently high torque to current ratio is obtained with adequate currents for each direction of magnetization.

1. まえがき

永久磁石同期電動機はインバータ制御方法等の発展と共に広範囲に産業用に応用されている。なかでも回転子表面に磁石を貼り付けた表面磁石形同期電動機は AC サーボモータや OA 機器等小容量の分野で最も多く使用されており、磁石材料の進歩に伴い中容量にも適用が拡大されつつある⁽¹⁾。

筆者らは表面磁石形同期電動機の出力トルクの増大を目的として磁石端部の磁束を有効に活用する磁石形状を検討してきたが、出力トルクを決定する重要な要素の一つである磁石の磁化方向は径方向磁化の場合であった⁽²⁾。本論文は各磁石形状における磁石の磁化方向の影響を解析したものである。

この場合、発生する誘起電圧は歪み、正弦波電流駆動ではトルクは大きく脈動する事になる。そこでトル

ク脈動を抑制する歪波の電流波形を求め^{(3)~(5)}、次にこのトルク脈動を抑制する電流駆動で最大出力トルクを計算し、磁化方向の出力トルクに及ぼす影響を解析した。

2. 解析モデルと磁石形状

図 1 に解析モデルの固定子と回転子の断面図を示し図 2 に検討した磁石の断面図を示す。磁石構造は極ごとにセグメント磁石を回転子に貼り付けたものである。

表 1 に鉄心、巻線、磁石の仕様を示す。永久磁石の部分は等価磁化電流⁽⁶⁾によって計算を行った。磁石形状は図 2 に示すように正弦波誘起電圧を発生する三日月形及び厚み一様のリング分割形について磁化方向を変化させて解析した。図 3 (a) に有限要素法の要素分割図を図 3 (b) に空隙部の拡大図を示す。節点数は

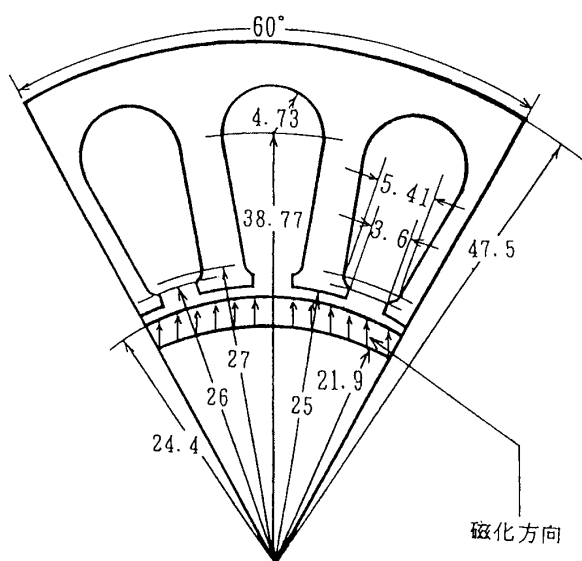


図1 固定子と回転子の断面図 (6極18スロット)

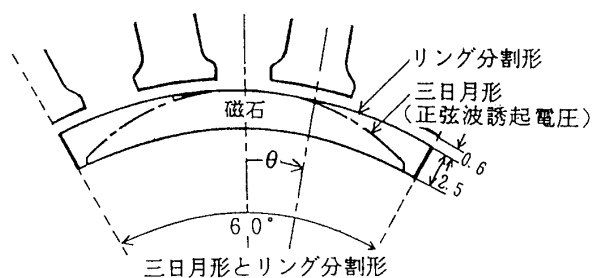


図2 磁石の断面図

表1 鉄心、巻線、磁石の仕様

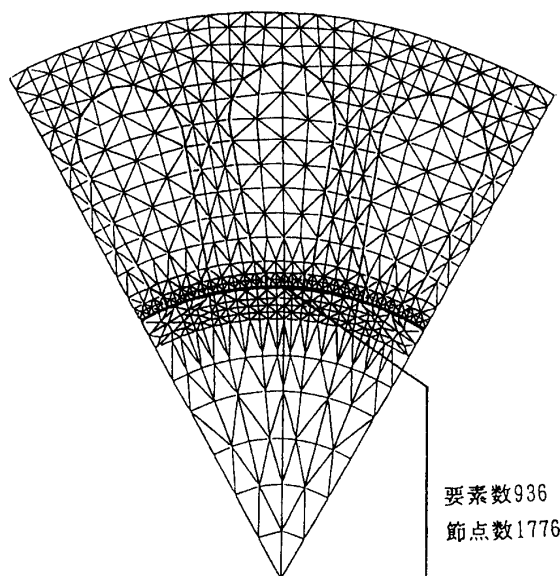
鉄心の長さ	58.7 mm
スキュー	固定子側1スロット
巻数/スロット	22
コイルピッチ	全節巻き
結線法	Y
磁石	Sm-Co (R22HA)
残留磁束	9.75 kG
保持力	9.59 kOe

936, 要素数は1,776で空隙は5層に分割した。

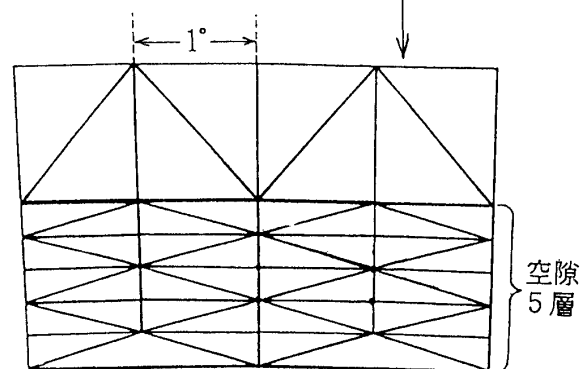
回転軸方向に磁界が一様と仮定し、渦電流を無視した場合の2次元の基本方程式はマクスウェルの方程式から(1), (2)式となる。

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\nu \frac{\partial A}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu \frac{\partial A}{\partial y} \right) = -J_0 - J_m \quad (1)$$

$$J_m = \nu_0 \left(\frac{\partial M_x}{\partial x} - \frac{\partial M_y}{\partial y} \right) \quad (2)$$



(a) 要素分割図



(b) 空隙の拡大図

図3 要素分割図と空隙の拡大図

ここで A : ベクトルポテンシャル, J_m : 等価磁化電流密度, J_0 : 固定子巻線電流密度, M_x, M_y : 磁石の磁化 M の x, y 成分, ν : 磁気抵抗率, ν_0 : 真空中の磁気抵抗率

トルクの計算はマクスウェル応力法⁽⁷⁾を用い, その積分路として空隙部5層の中央部をとった。応力計算, 磁束密度の計算処理等は前報告⁽⁸⁾のとおりである。

なお空隙部の周方向は図3(b)に示すように1度毎に分割し, 回転時は1度毎に節点の組み替えを行いながら計算を行った。

3. 各磁石形状での磁化方向の比較^{(9)~(10)}

磁石の磁化方向は図4に示すように①～③の磁化方向について検討した。図4においてOはy軸と磁石下面の交点で、座標の原点とし、Cはモータの回転軸の中心点である。OからCまでの距離をRとし(y軸下方向を正とする)、磁石のP点における磁化方向について考える。磁化方向として①着磁の中心点(焦点)がモータの回転軸の中心Cと一致する場合(焦点距離=R)を径方向磁化、②着磁の中心点が無限遠(焦点距離=∞)の場合を平行磁化、③着磁の中心がCと反対側のC'(焦点距離=-R)にあり磁化方向を逆にした場合を逆径方向磁化とした三つの場合について検討した。なお磁化の強さは全て同一とした。

3.1 空隙の磁束密度分布

図5に各磁石形について磁化方向を変化させた場合の空隙の磁束密度分布を示す。平行磁化の場合は磁石中央部に磁束が集中する事から磁束密度は径方向に比較して高くなる。リング分割形の磁石端部の磁束密度が高いため三日月形よりも強く磁化方向の影響を受けることになる。特に逆径方向磁化の場合の磁石端部の磁束密度の減少が大きい。

3.2 誘起電圧波形と正弦波電流駆動時のトルク

電圧波形は前節の空隙磁束密度分布の状態では回転数を1000「rpm」にして求めた。

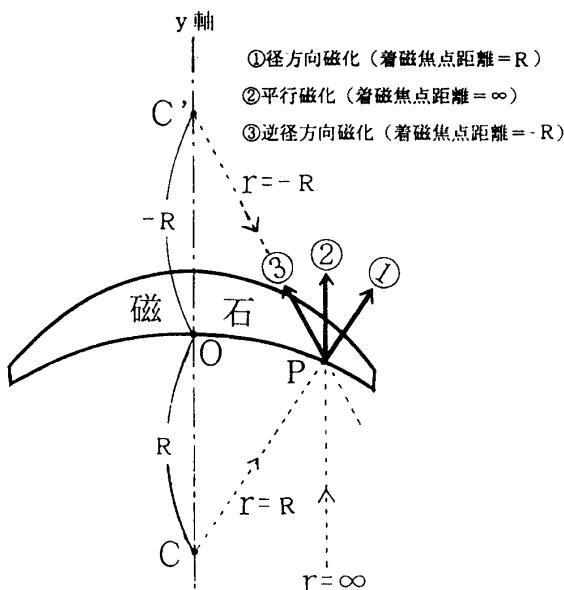


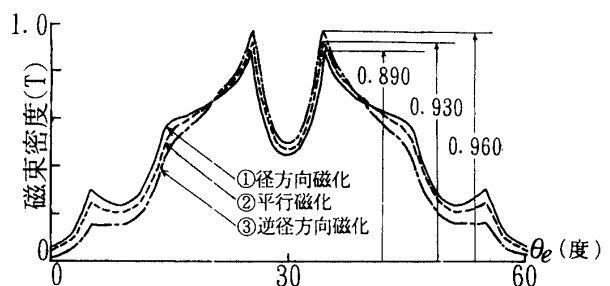
図4 磁石の磁化方向

図6(a)に三日月形、図6(b)にリング分割形の1相当りのスキューなしの場合の誘起電圧波形を示す。各誘起電圧波形は図5の空隙磁束密度分布の時間変化率に対応するので磁束密度の高いものほど誘起電圧も高くなる。

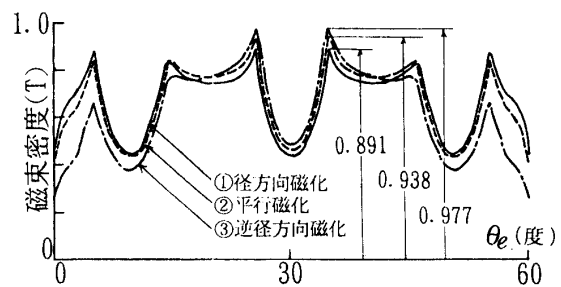
三日月形の誘起電圧のピーク値は径方向磁化($r=R$)→平行磁化($r=\infty$)→逆径方向磁化($r=-R$)の順に磁石中央部の磁束密度と同様に高くなる。逆に磁石端部の磁束密度はその順に減少するので低くなる。リング磁石形は逆径方向磁化の場合の磁石端部の電圧降下が図5(b)の磁束密度の減少に対応して著しい。

リング分割形の誘起電圧波形は磁石端部の磁束密度が中央部の磁束密度と同じため正弦波から大きく歪む。特に径方向磁化の場合の波形は台形波状になり、スロットの影響で二つのくぼみを持つ。リング分割形の電圧ピーク値は平行磁化の場合、28.0 Vと三日月形に比較して6%程度高く、 $\theta_e=0^\circ, 180^\circ$ 付近でも電圧が高い。

図6(c), (d)にスキューした場合の誘起電圧波形を三日月形、リング分割形について示す。三日月形の場合はスキューをかければ電圧値は8.3~4.6%減少

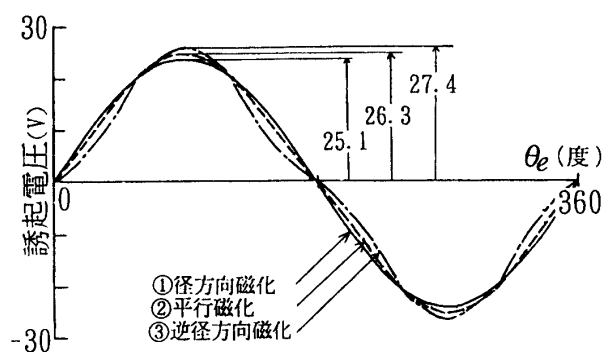


(a) 三日月形

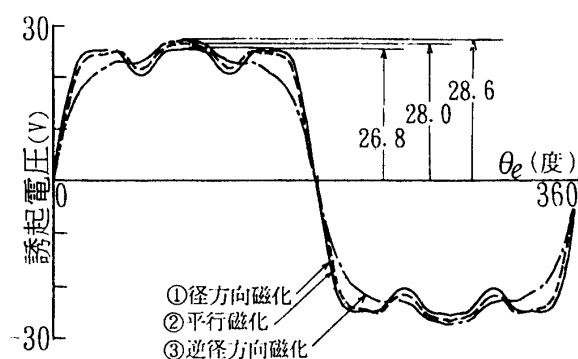


(b) リング分割形

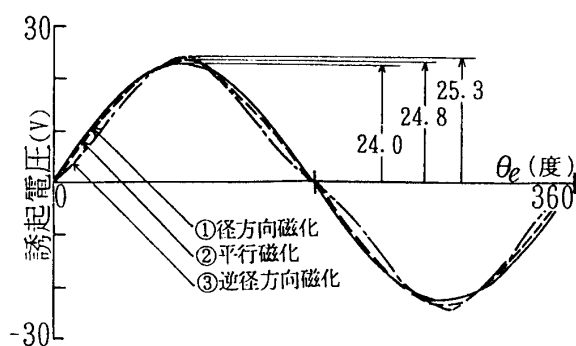
図5 空隙の磁束密度分布



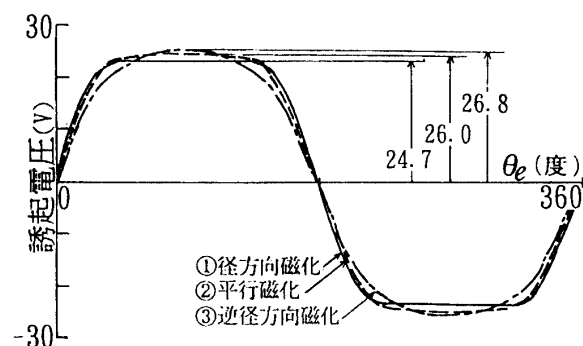
(a) 三日月形 (スキューなし)



(b) リング分割形 (スキューなし)

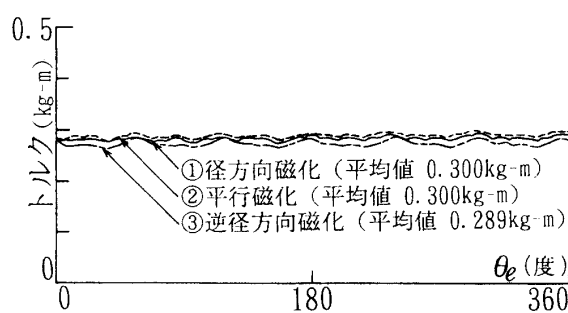


(c) 三日月形 (スキュー有り)

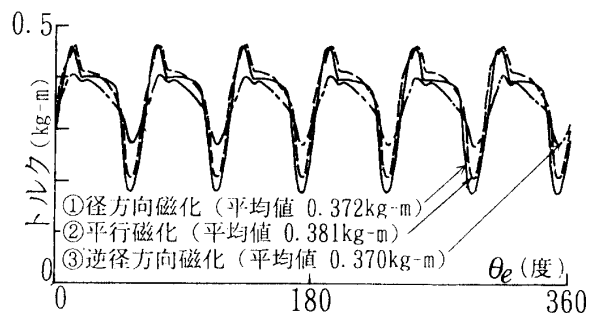


(d) リング分割形 (スキュー有り)

図6 誘起電圧波形 (1000 rpm)



(a) 三日月形



(b) リング分割形

図7 正弦波電流駆動時の出力トルク (1000 rpm, $I_{rms}=5.30$ A)

し、歪みの大きい逆径方向磁化の電圧降下が最も大きい。リング分割形も平均化され、スロットによる影響のくぼみが無くなり、電圧値は6.7～8.5%低くなり台形波にちかくなる。図7に図6(c), (d)のスキューをかけた場合の誘起電圧に対する実効値5.3 Aの正

弦波電流駆動時の出力トルク波形を示す。なお無負荷時の誘起電圧と負荷時の誘起電圧は等しいとし、電機子反作用は無視した。三日月形の径方向磁化の場合の誘起電圧波形はほぼ正弦波であり出力トルク波形も僅かな脈動ではほぼ一定となる。

径方向，平行磁化ともに出力トルクは 0.300 kg-m であり，この値を今後比較の基準としていく。リング分割形は誘起電圧が歪んでいるので正弦波電流駆動では大きく脈動する。この場合磁石端部の磁束密度が最も高い径方向磁化が最も脈動が大きい。

3.3 コギングトルク

図 8 に各磁石形について磁化方向を変化させた場合のコギングトルクを示す。リング磁石形の場合，径方向磁化 → 平行磁化 → 逆径方向磁化の順にコギングトルクが小さくなる。磁石端部の磁束密度が減少するのでコギングトルクに与える影響が小さくなるのが推定される。三日月形は磁化の方向の影響は小さい。

3.4 トルクの脈動を抑制する電流駆動時のトルク

図 7 (b) に示したようにリング分割形は正弦波電流駆動では出力トルクは大きく脈動する。このトルク脈動を抑制する方法として二つの方法が考えられる。一つはコギングトルクを含む脈動トルクと正反対の位相のトルクを発生する電流 i_{kc} を巻線電流に重畳して脈動トルクを打ち消す方法で，二つ目はコギングトルクはスキューをかけ機械的に打ち消し，残りの脈動トルク分のみ電流で打ち消す方法である。今回は電流で全脈動トルクを消去する方法は無負荷時にも電流を供給する必要があり制御回路が複雑になるのでコギングトルクは 1 スロットスキューで消去することとした。

出力トルク脈動抑制電流 i_u は各相の誘起電圧を e_u, e_v, e_w ，出力トルクを T とすれば(3)式となる⁽³⁾。

$$i_u = T \frac{e_u}{e_u^2 + e_v^2 + e_w^2} \quad (3)$$

(3) 式に用いた誘起電圧は図 6 (c)，(d) のスキューをかけた場合の波形に対応するものである。

図 9 のリング分割形の出力トルク波形は(3)式の i_u の実効値を 5.30 A にした波形である。

図 7 (a) に示したように三日月形の径方向磁化（正弦波誘起電圧）の出力トルクは 0.300 kg-m であったが，図 9 のリング分割形は各磁化方向ともに 0.300 kg-m より出力トルクは大きい。最も出力トルクの大きな磁化方向は 0.371 kg-m の平行磁化の場合である。三日月形の径方向，平行磁化に比較して 23.7 % 高く，リング分割形の径方向磁化より 3.1 % 高い。

その場合，各磁石形，磁化方向における駆動電流は銅損による温度上昇を等しくするために実効値を 5.30 A に同一した。

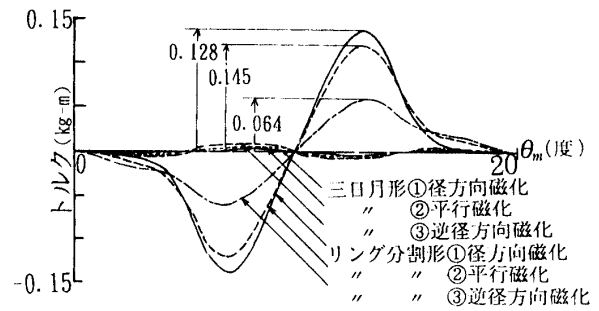


図 8 コギングトルク

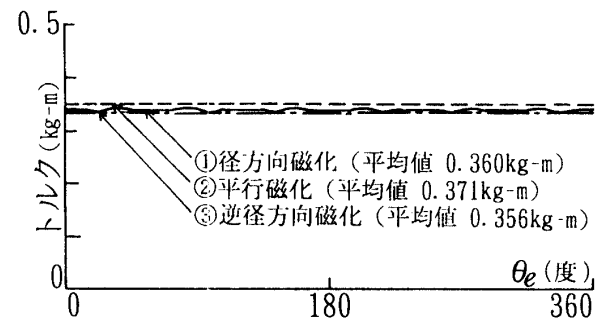


図 9 トルク脈動抑制電流時の出力トルク
(リング分割形，スキュー有り，1000 rpm， $I_{rms}=5.30$ A)

表 2 トルク計算の結果 (1000 rpm, $I_{rms}=5.30$ A)

	三日月形		リング分割形	
	出力トルク 平均値 (kg-m)	コギングトルク ピーク値 (kg-m)	出力トルク 平均値 (kg-m)	コギングトルク ピーク値 (kg-m)
①径方向磁化 ($r=R$)	0.300	0.005	0.360	0.145
②平行磁化 ($r=\infty$)	0.300	0.005	0.371	0.128
③逆径方向磁化 ($r=-R$)	0.289	0.006	0.356	0.064

4. トルクの計算結果

表 2 に今までのトルクの計算結果を各磁石形ごと磁化方向についてまとめて示す⁽¹¹⁾。表 2 の上段の径方向磁化の三日月形の場合を比較の基準として見れば磁石形状の変化によりトルクは増加し，更に磁化方向の変化によってトルクは増加することが分かる。

リング分割形の場合，平行磁化の出力トルクが径方

向磁化に較べて 3.1 %増加しもっとも大きく, 0.371 kg-m ある。リング分割形は三日月形に比較して 23.7 %のトルク増加となり, 磁石形状及び磁化方向を変化させることは出力トルクに関して有利である。

スキューをかけてない場合のコギングトルクは磁石端部の磁束密度が低くなれば小さくなり, リング分割形の逆径方向は他の磁化方向の 5 割程度になる。

5. むすび

出力トルクの脈動を抑制する電流駆動時の, 出力トルク増を目的として磁石形状と磁化方向を変化させ検討してきた。巻線電流は各磁石タイプを比較する際に銅損を等しくするために実効値を等しくした。その結果, 以下の結論を得た。

- (1) リング分割形の平行磁化の場合が最も大きな出力トルクを発生する。スキューをかけ, トルク脈動抑制電流によりトルクリプルがほぼ零の状態において出力トルクは三日月形に比較して 23.7 %増加する。出力トルクに関して最も有利な磁石形状である。
- (2) 各磁石形において平行磁化の方が磁束が磁石中央部に集中することから径方向の場合より出力トルクが大きくなり, 磁化方向として有効である。リング分割形でその差は 3 %程度である。
- (3) リング分割形のコギングトルクは磁石端部の磁束密度が最も低くなる逆径方向磁化が最も小さくなる三日月形は磁化方向の影響はほとんどない。

文 献

- (1) 石崎：「永久磁石形ブラシレスDCモータの現状と将来」, 平8電気学会産業応用部門全大 S. 3-2
- (2) 三重野・篠原・実成・東：「表面磁石形同期電動機の磁石形状とトルクの計算」, 平7電気学会九州支部連大 No254
- (3) 大沢・橋井・松田・遠藤：「ひずんだ誘導起電力をもつ永久磁石電動機の低トルク脈動・高出力制御」, 電学論D **113**, 1200 (平5-10)
- (4) E. Favre, L. Caradetti, & M. Juler: "Permanent-Magnet Synchronous Motors: A Comprehensive Approach to Cogging Torque Suppression", IEEE Trans. Industr. Applic. **IA-29**, 6, 1141 (1993)
- (5) C. Marchand & A. Razeq: "Optimal torque operation of digitally controlled synchronous motor drives", IEE PROCEEDINGS-B, **140**, 3, 232 (1993)
- (6) 中田・高橋：「電気工学の有限要素法」, p.219 (昭61) 森北出版
- (7) 竹山：「電磁気学現象理論」, p.362 (昭37) 丸善
- (8) 三重野・篠原・実成・東：「有限要素法によるq軸鉄心付き表面磁石形同期電動機の空隙磁束密度分布とトルクの解析」, 鹿児島大学工学部研究報告 37号, p.51
- (9) 電気学会技術報告 第486号, p.33 (平6)
- (10) Nady Boules: "Prediction of No-Load Flux Distribution in Permanent Magnet Machines", IEEE Trans. Industr. **IA-21**, 4, 633 (1985)
- (11) 梶島・野瀬・後藤：「AC サーボモータの磁界解析」, 安川電機, **48**, 3, p.204 (昭59)