

5 極マイクロ・モータの磁気回路解析

長 谷 川 博 一*
村 井 国 昭**
伊 達 隆 三***

A analysis to magnetic circuit of 5 slots micro-motor

Hirokazu HASEGAWA

Kuniaki MURAI

Ryuzo DATE

要 旨

マイクロ・モータの磁気回路を理論的に解析し、回転子極の占める中心角の種々異なる場合について、空げきの等価パーミアンズおよび磁束分布を計算し、これより回転子極の中心角をパラメータとする発生トルク量および分布の傾向を調べ検討を加えた。

1. 緒 言

マイクロ・モータは、超小型直流電動機であり、製作にあたっては、時計工作技術に近い精密な技術が要求されている。又その使用目的上、強力なトルクの発生および定速性の二つの条件が要求されている。マイクロ・モータの有効トルクは、回転中の空げきの磁束の大きさならびに分布の状態によって大きく影響されている。本稿においては、5 スロットマイクロ・モータを使用してマイクロ・モータの磁気回路を理論的に解析し、発生トルク量および分布の状態について研究した。

2. 磁気回路の解析における仮定

本実験で用いた供試機は、5 スロットの円筒形回転子であるため空間的に静的磁束分布をしていると考えられる。それゆえ界磁石による起磁力 AT の大部分は、空げき部分に集中しているものと考えられるので、磁気回路の等価パーミアンズ、磁束量の近似計算をする上で次のような仮定を設ける。

- (1) 巻線と鎖交する磁束は、空げきに面する極面より出入する磁束のみとし、巻線の途中より出入する漏れ磁束は無視する。
- (2) 鉄心部と空げき部の透磁率 μ の比は $10^3 \sim 10^4$ 程度であるから計算上鉄心部の透磁率は、無限大とする。
- (3) 磁路は、仮定磁路法によるものとして計算をおこなう。

3. 空げきの等価パーミアンズ

(1) 磁極面—回転子極面間

図—1 において回転子極面半径 r_1 (m)、回転子極面長さ L (m)、磁極面半径 r_2 (m)、磁極面と回転子極面との重なり角 α (rad)、空気の透磁率 μ (Wb/AT·m)、等価リラクタンス R (AT/Wb)、等価パーミアンズ P_a (Wb/AT)、とすれば、長さ dr の微少部分の等価リラクタンス dR は、

$$dR = \frac{1}{\mu \cdot L \cdot \alpha} \cdot \frac{dr}{r} \quad (1)$$

となり、等価リラクタンス R は

* 助 手 電気工学科

** 助教授 電気工学科

*** 助教授 室 工 大

$$R = \frac{2.3}{\mu \cdot L \cdot \alpha} \log_{10} \frac{r_2}{r_1} \quad (2)$$

したがって、等価パーミアンズ P_a は

$$P_a = \frac{\mu \cdot L \cdot \alpha}{2.3} \cdot \frac{1}{\log_{10} r_2 / r_1} \quad (3)$$

ただし $\mu = 1.257 \times 10^{-6}$ (Wb/AT.m)

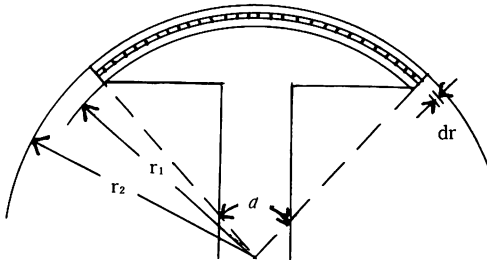


図-1 磁極面一回転子極面間の等価パーミアンズ

(2) 磁極面一回転子極面端部間

図-2において空けき長 δ (m), 平均磁路長 l (m), 平均断面積 S (m²), 等価パーミアンズ P_b (Wb/AT), として平均磁路長 l を磁路の中央にとると

$$l \approx 1.22 \delta \quad (4)$$

したがって平均断面積 S は

$$S = \frac{\pi/4 \cdot \delta^2 L}{l}$$

となり、等価パーミアンズ P_b は

$$P_b = \frac{\mu \cdot S}{l}$$

(3) 磁極面端部一回転子極面端間

図-3において磁極面端部と回転子極面端部間の差を s (m), 等価パーミアンズ P_c (Wb/AT) とすれば、平均磁路長 l は

$$l \approx 1.22 s \quad (7)$$

したがって平均断面積 S は、

$$S = \frac{\pi/4 s^2 r_2 \alpha}{l} \quad (8)$$

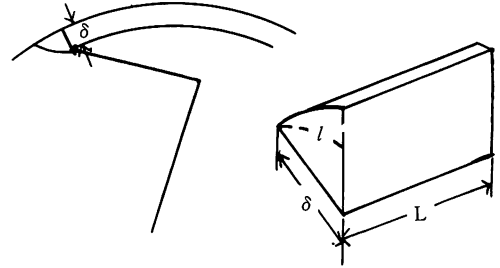


図-2 磁極面一回転子極面端部間の等価パーミアンズ

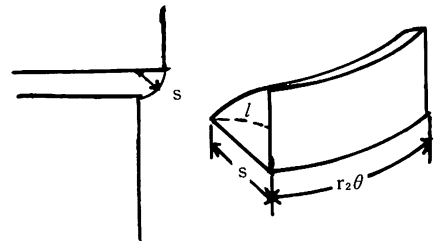


図-3 磁極面端部一回転子極面端部間の等価パーミアンズ

となり、等価パーミアンズ P_c は

$$P_c = \frac{\mu \cdot S}{l} \quad (9)$$

供試機の回転子の占める中心角は、 61.5° であり、それに比較するための例として $68^\circ, 22^\circ$ の場合も合わせて計算をおこなった。回転角 $\theta = 0^\circ \sim 90^\circ$ における1極当りのパーミアンズを計算したものを表-1に示す。

以後の計算においては、2極にまたがってコイルが巻かれているので2極当りで算出してゆく。

4. 空けき磁束の等価計算法

固定子と回転子の相対的な位置関係は、3つの場合に分類され、それぞれの位置での合成等価パーミアンズにより1極面を通過する磁束量が計算される。

(1) 2極のみが対向する場合

図-4に示すように2極(極1, 極5)が一方の界磁極に対向し、他の3極が他の界磁極に対向する場合、回転子極1, 2, 3, 4, 5の等価パーミアンズを P_1, P_2, P_3, P_4, P_5 として合成等価パーミアンズを P , 回転子極1と5に

表-1 1 極当りの等価パーミアン

中心角 $\alpha(^{\circ})$ 回転角 $\theta(^{\circ})$	68	61.5	22
0	6.186	5.877	0.972
6	6.186	5.877	0.972
12	6.186	5.877	0.972
18	6.186	5.877	0.972
24	5.648	5.571	0.972
30	4.855	5.110	0.972
36	4.572	4.949	0.972
42	4.034	3.918	0.972
48	3.496	3.358	0.972
54	3.093	2.939	0.729
60	2.431	2.351	0.486
66	1.883	1.856	0.180
72	1.345	1.119	0
78	0.807	0.801	0
84	0.269	0.267	0
90	0	0	0

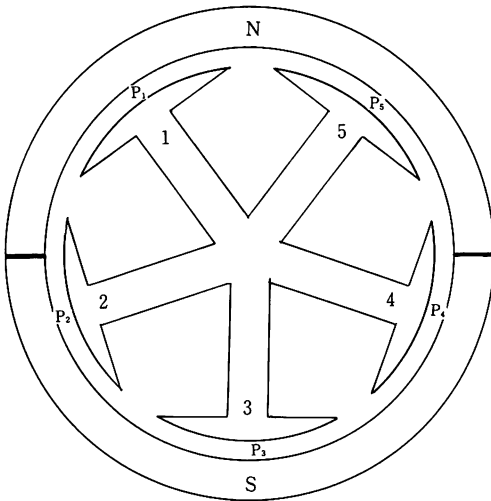
(単位 $\times 10^{-7}$ wb/AT)

図-4 2 極のみが対向する場合

よる磁束を Φ_{15} とすれば

$$P = 1 / \left(\frac{1}{P_1 + P_5} + \frac{1}{P_2 + P_3 + P_4} \right) \quad (10)$$

磁束 Φ_{15} は比例定数 K とすると

$$\Phi_{15} = KP = K \frac{(P_1 + P_5)(P_2 + P_3 + P_4)}{P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5} \quad (11)$$

(2)他の1 極が両界磁極に対向する場合

図-5 のように他の1 極が両界磁極に対向し、2 極ずつそれぞれ一方の界磁極に対向する場合、回転子極えの両界磁極に対向する部分の等価パーミアンを P_2, P_2' とすれば合成パーミアン P は

$$P = 1 / \left(\frac{1}{P_1 + P_5 + P_2} + \frac{1}{P_2' + P_3 + P_4} \right) \quad (12)$$

分路磁束は、リラクタンスに逆比例するから磁束 Φ_{15}

$$\begin{aligned} \Phi_{15} &= K \cdot P \cdot \frac{1}{P_2} / \left(\frac{1}{P_1 + P_5} + \frac{1}{P_2} \right) \\ &= K \frac{(P_1 + P_5)^2 (P_2 + P_3 + P_4)}{(P_1 + P_2 + P_2' + P_3 + P_4 + P_5)(P_1 + P_2 + P_5)} \end{aligned} \quad (13)$$

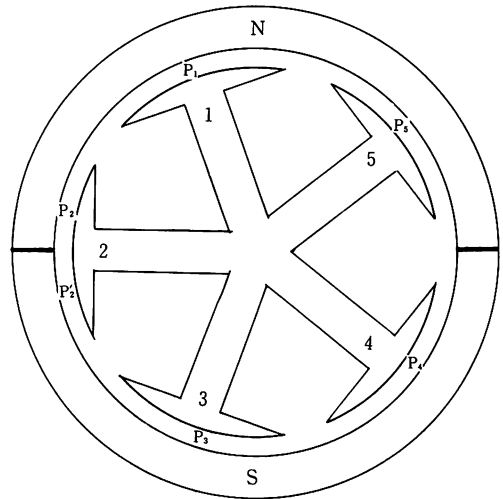


図-5 他の1 極が両界磁極に対向する場合

(3)2 極のうち1 極が両界磁極に対向する場合

図-6 のように2 極のうち1 極が両界磁極に対向し、その他の極は、2 極ずつ対向する場合、回転子極5の両界磁極に対向する部分の等価パーミアンを P_5, P_5' とすれば等価パーミアン P は

$$P = 1 / \left(\frac{1}{P_1 + P_2 + P_5} + \frac{1}{P_3 + P_4 + P_5'} \right) \quad (14)$$

磁束 Φ_{15} は

$$\Phi_{15} = K \cdot P \cdot \frac{1}{P_2} / \left(\frac{1}{P_1 + P_5} + \frac{1}{P_2} \right)$$

$$=K \cdot \frac{(R_1+R_2+R_3)(R_3+P_4+P_5')(R_1+P_5)}{(R_1+R_2+R_3+P_4+P_5+P_5')(R_1+P_2+P_3)}$$

(15)

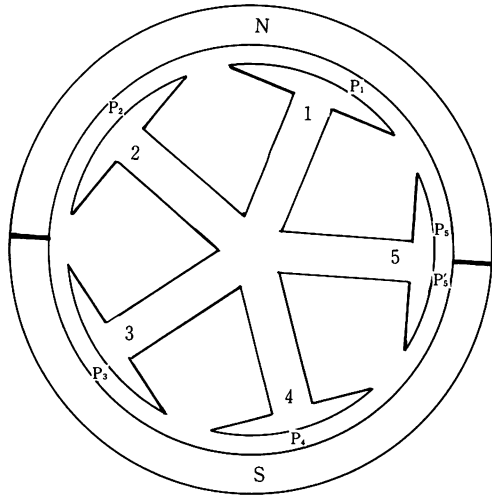


図-6 2極のうち1極が両界磁極に対向する場合

中心角が前記の3つの異なる場合について2極当りの等価パーミアンスを基にして、回転子の各位置における合成等価パーミアンスを求めて、これを表-2に示す。又1極が回転角 $\theta=0\sim90^\circ$ まで回転した時のその極を通過する比磁束量（比例

表-2 空げきのパーミアンス

中心角 $\alpha(^{\circ})$	68	61.5	22
回転角 $\theta(^{\circ})$			
0	7.425	7.052	1.166
6	7.686	7.230	1.166
12	7.718	7.343	1.166
18	7.733	7.346	1.215
24	7.718	7.343	1.166
30	7.686	7.230	1.166
36	7.425	7.052	1.166
42	7.686	7.230	1.166
48	7.718	7.343	1.166
54	7.733	7.346	1.215
60	7.718	7.343	1.166
66	7.686	7.230	1.166
72	7.425	7.052	1.166
78	7.686	7.230	1.166
84	7.718	7.343	1.166
90	7.733	7.346	1.215

(単位 $\times 10^{-7}\text{wb/AT}$)

定数 $K=1$ と置いたもの)を計算したものを表-3に示す。

表-3 2極当りの比磁束量

中心角 $\alpha(^{\circ})$	68	61.5	22
回転角 $\theta(^{\circ})$			
0	7.425	7.052	1.166
6	6.671	6.290	1.166
12	6.452	5.992	1.166
18	6.186	5.877	0.972
24	5.920	5.757	0.777
30	5.703	5.357	0.777
36	4.952	4.704	0.777
42	4.834	4.555	0.777
48	4.762	4.465	0.777
54	4.640	4.408	0.728
60	4.492	4.347	0.583
66	4.350	4.085	0.583
72	3.713	3.526	0.583
78	3.336	3.145	0.583
84	3.226	2.996	0.583
90	3.093	2.938	0.486

(単位 $\times 10^{-7}\text{wb/AT}$)

5. 磁束分布の比較検討

磁束分布は、回転子の各位置における空げきのパーミアンスの変化から比磁束量の変化を求めることで解明される。磁束量の大小は、各々の場合の比磁束量を比較することで得られる。空げきパーミアンスと比磁束量の変化を図-7、図-8に示す。これらより空げきのパーミアンスの変化、比磁束量の変化を比較検討すれば、次のことが考察される。

- (1)有効磁束は、回転子極の回転角が 0° のとき最大となり、 90° のとき最小となるまで減少して行く。しかし減少曲線は、なだらかとなりており $\theta=72^\circ$ のとき最大磁束の1/2となっている。
- (2)空げきのパーミアンスは、回転子極の中心角が、 18° 、 54° 、 90° の値で最大となり、 36° 間隔で周期している。
- (3)空げきのパーミアンスにおいて回転子極の中心角が小さくなる程、パーミアンスは平坦になり $\alpha=22^\circ$ においては、変化率は微少となる。

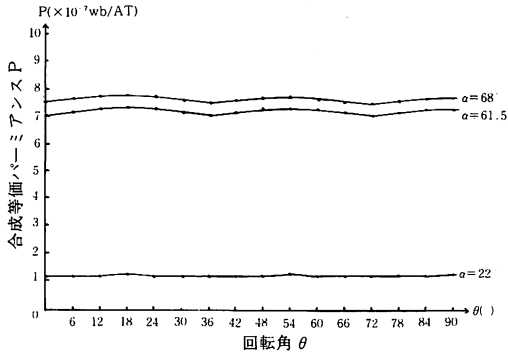


図-7 空げきのパーミアンス曲線

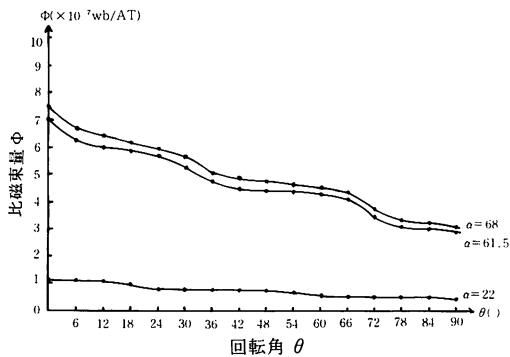


図-8 比磁束量曲線

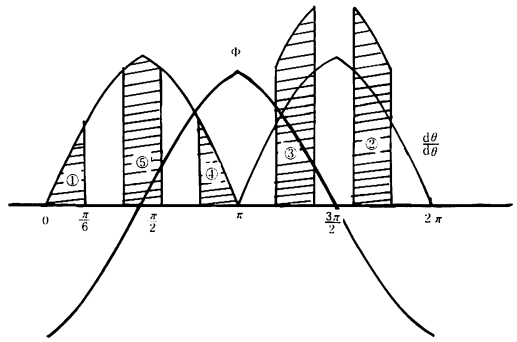


図-9 磁束の変化率

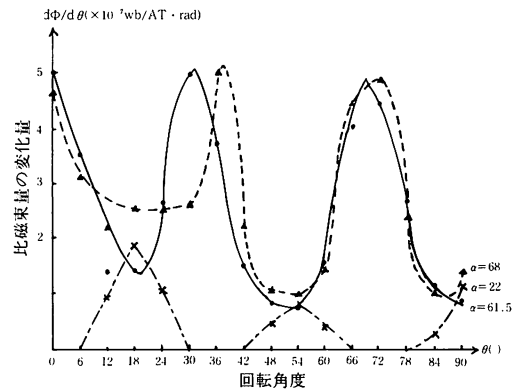


図-10 比磁束量の変化率

6. トルク分布の比較検討

巻線が2極にまたがって巻かれているため2極の真中を回転子極の中心として考え、回転方向と反対方向に極1, 2, 3, 4, 5とする。図-9の磁束 Φ および磁束の変化率 $d\Phi/d\theta$ を示す曲線において極1が $0 \sim \pi/5$ まで回転するとき極2～5は、それぞれ $8\pi/5 \sim 9\pi/5$, $6\pi/5 \sim 7\pi/5$, $4\pi/5 \sim \pi$, $2\pi/5 \sim 3\pi/5$ まで回転し、この期間中の各極の発生トルクの積分値は、それぞれ図の斜線を施した部分の面積に比例した値になる。それらの和を平均すれば運転時の回転子の有する平均トルクが得られる。得られた Φ の値から $d\Phi/d\theta$ を求め曲線を描くことでトルク分布の状態が解明できる。

前記の3つの場合における比磁束量の変化率 $d\Phi/d\theta$ を表-4に又その曲線を図-10に示す。

変化率を比較検討すれば

(1)中心角 α を小にする程、比磁束量の変化率の最大値は減少し、 $\pi/2$ より小なる方向に移行する。又平坦化する。

(2)回転角 $\theta = 0^\circ \sim 90^\circ$ の範囲では、比磁束量の変

表-4 比磁束量の変化率 $d\Phi/d\theta$

中心角 $\alpha(^\circ)$ 回転角 $\theta(^\circ)$	68	61.5	22
0	4.601	5.013	0
6	3.103	3.581	0
12	2.148	1.373	0.836
18	2.626	1.313	1.910
24	2.626	2.865	1.074
30	2.655	5.013	0
36	5.013	3.700	0
42	1.313	1.552	0
48	1.074	0.836	0.477
54	0.955	0.716	0.836
60	1.432	1.617	0.418
66	4.416	4.058	0
72	4.894	4.416	0
78	2.387	2.745	0
84	0.955	1.074	0.298
90	1.132	0.836	1.194

(単位 $\times 10^{-7}$ wb/AT · rad)

化率の極大値が2ヵ所でき、回転角 $\theta=24^\circ\sim 36^\circ$, $\theta=54^\circ\sim 72^\circ$ の範囲にある。

- (3)中心角が小さくなるほど変化率は総体的に減少する。そして曲線の形状は、せん鋭化の傾向を生ずる。

7. 結 言

マイクロ・モータのトルクの計算式が空げきの磁束分布の変化と重要な関係を有することは、文献(6)で詳しく述べてあるが、その磁気回路を理論的に解析し、回転子極の占める中心角の種々異なる場合について空げきの等価パーミアンス、磁束分布を計算し、これにより回転子極の中心角をパラメータとする発生トルク量および分布に関する相対的傾向を得た。

それを要約すると次の通りである。

- (1)図-9で明らかなように磁束の最大値の位置で大きなトルクが得られるように電流は流れている。
- (2)回転子極の占める中心角を大にすれば、トルク分布曲線の起状が激しくなり、トルクの集中化がおこる。
- (3)回転子極の占める中心角を小にすれば、回転子極の鉄心材料の量は、減少して、モータ自

体の軽量化の目的には沿うが、トルク分布曲線は、緩やかになりすぎトルクが分散し、ピーク値が低くなりトルク量は、減る。

- (4)したがって回転子極の占める中心角が大であればあるほどトルク分布曲線のピーク値も高くなり、大きなトルクを得ることができる。

しかしながら実際のモータでは、中心角を最大にして使用はしていない。これは、高度な工作技術が必要であり、大量生産で安価で使用する、目的からずれるためである。

参 考 文 献

- (1) 山田博：精密小形モータの基礎と応用，工学図書
- (2) 大川光吉：永久磁石回転機，工学図書
- (3) 茂木晃：磁気回路，共立出版
- (4) 図所，伊達，近藤：室工大研究報告5巻1号（昭和40）
- (5) 伊達，長谷川，図所：電気4学会道会道支部連大（昭和51）
- (6) 長谷川，伊達：苫高専紀要第13号（昭和53）

（昭和53年11月2日受理）