# 回転機用永久磁石の設計

Design of Permanent Magnets for Rotary Machinery

菊田 明\* 田中省吾\* 後藤俊介\* Akira Kikuta Shôgo Tanaka Shunsuke Gotô

# 内 容 梗 概

磁石発電機(ACダイナモ)と磁石電動機(マイクロモータ)などの動的磁気回路に使用される磁石回転機 における磁気回路解析と電気特性の一貫した設計計算を行ない,その応用計算例を示し,実用上十分な近似が 得られることを示した。さらに設計に当たり特に注意を必要とする点と,製造上の特異性からくる二,三の制 約について論じた。

# 1. 緒 言

従来マグネットの設計は、ユーザ側で行なわれることが多かった が、最近すぐれた新しい磁石材料が開発されるにつれて、磁石メー カーとユーザとの密接な連携のもとで行なわれることが多くなっ た。新しいすぐれた磁石材料は高性能の機器を生むとともに逆に機 器を高性能化するために新しい磁石材料を必要とし、その連携はま すます深まりつつある。しかしながらその応用の面では、磁石特性 が十分有効に使用されない設計が少なくない。これは漏えい磁束の 計算、継鉄の飽和を考えた場合の非線形性などのため磁気回路の計 算が非常に複雑なためである。 と磁石メーカーの間の設計上の連携が少しでも深まり磁石式回転機の性能が向上すれば幸甚である。

### 2. 回転機に使用される永久磁石と磁気回路

第1表は回転機に用いられる永久磁石の材料とその特色を示した ものである。第1図は、永久磁石を回転機に応用したときの磁気回 路の代表例である。エネルギー的には YCM-1、エネルギー、保磁 力とも必要ならば YCM-2、形状的に異方性フェライト磁石 (YBM -2)を使用しがたい場合は鋳造磁石 YCM-1、2、4、また保磁力を特 に必要とするものでは等方性フェライト磁石が多く用いられる。し かしながらフェライト磁石は温度係数が大きく、破壊回転数が鋳造 磁石の半分程度であることを考慮しなければならない。

磁気回路の設計理論は、S. Evershed 氏以来数多くの論文が発表 されている。その解析方法を大別すると、磁路を仮定しパーミアン スを近似計算により求める仮定磁路法と等角写像法により解析する 方法などが古くから行なわれており、また最近では電子計算機を使 って磁気回路をスカラーポテンシャルの場の問題としてラプラス方 程式の境界値問題として解く方法が行なわれている。

筆者らは,仮定磁路法により回転機における磁束波形の計算を行 なうとともに磁気的特性と電気的特性の結合を図った。本方法では 磁路を円形またはだ円形の通路に仮定するため誤差の大きい場合が あるが,計算が簡単であり,設計に際し近似計算する場合非常に有 用である。磁石形状の決定,磁石材質の選定などに便利であるため, 不完全ではあるが本論文を発表した次第である。これによりユーザ

第1表 回転機に使用される永久磁石材料とその特色

磁石材質	Y C M-1	Y C M-2	YCM-4	YBM-3	YBM-2	単位
単位エネルギー 当たりコスト 空 げ き 長	安 小	割 安 できる だけ小	割 高 できる だけ少	割 高 大	割 安 大	
減 磁	割 大	割 少	割 少	少	少	1.1
形状上の制約	大	大	少	少	大	
残留磁束密度 Br	$12,000 \\ \sim 13,000$	$8,000\ {\sim}10,500\ 720$	5,800 ~7,750	$2,100 \ \sim 2,400 \ 1,500$	$3,200 \ \sim 3,500 \ 1,800$	(G)
味 做 $Л H_c$ エネルギー積 $(BH)_m$	$515 \sim 670$ 3. 8 $\sim 6.0$	~1,050 2.8~3.5	$550 \sim 900$ 1. 5 $\sim$ 3. 0	$\sim 1,800$ 0.9 $\sim 1.2$	$\sim 2,000$ 2.0 $\sim 2.5$	$ \begin{pmatrix} Oe \\ \times 10^{-6} \\ G \cdot Oe \end{pmatrix} $











# (a) 電 動 機 (b) 発 電 機 (c) フライホイール・マグネト 第1図 磁石式回転機の代表例

\* 日立金属工業株式会社熊谷工場

立.



第2図 磁石発電機における磁石動作状態





漏えい磁場 第4図



第3図 ACダイナモ磁気回路構成図

## 3. 発電機用永久磁石の設計

発電機用としての永久磁石はさきに述べたように、一般の磁石発 電機とフライホイールマグネト用の磁石発電機に使用されている。 両者は形状的にも,磁石動作状態も異なっている。

3.1 発電機における永久磁石の動作

**第2図は、発電機における永久磁石の磁石動作状態である**(1)。磁 石は着磁されると磁石自身で定まるパーミアンス Pi により動作点 はL点にある。次に着磁された磁石が発電機に組み込まれると動作 点はマイナーループ上を移動し, 磁気抵抗が最小なところ, すなわ ち最大パーミアンス Pt によるT 点にくる。一定の外部負荷が与え られた負荷状態ではE点で動作していると考えられる。しかし厳密 には回転角とパーミアンスにより動作点は定着しておらず微少に変 化している。負荷動作時のエネルギーを第2図から解析すると、有 効エネルギーは DEFG, 電機子に吸収されるエネルギーは FGHI, 空げきにおけるエネルギーは CDIJ, 漏えい磁場のエネルギーが JHKOになる。エネルギーが図式上最大となるのは

 $ED = -\frac{1}{2}MW, \quad EF = -\frac{1}{2}TP$ 

すなわち,出力電流が短絡電流の½,出力電圧が無負荷電圧の½ であるような負荷のときである。

また第2図の動作点から発電機の磁気エネルギーを概算すること ができ,エネルギー*E*は



第6図 ポール側面の漏えい

る磁石のもつ出力が求められる。

3.2 AC ダイナモの磁気回路とパーミアンスの計算

第3図は磁石発電機の一例(ACダイナモ)であるが、これより 磁石の動作点を算出する。突極形状のパーミアンスについては, F. Strauss 氏(2)らによりかなり明確に解析されている。

磁石単体における動作点を求めると,第4,5,6図から

$$P_{1} = P_{s_{1}} + P_{f_{1}}$$

$$P_{s_{1}}: \quad \vec{x} - n$$

$$Big = 0.264 W \dots (2)$$

$$P_{f_{1}} = \frac{W}{\pi} \log_{e} \left( 1 + 2 \frac{x + \sqrt{x^{2} + x \cdot L}}{L} \right) \dots (3)$$

$$dP_{2} = \mu_{0} \frac{l \cdot dr}{r \cdot \frac{\theta}{2}} \dots (4)$$









動作点の有効エネルギー積 (YCM-1B) 第9図



 $\sum_{i=1}^{3} P_i = 10.0$ 

-

磁石単体における磁気回路は,第7図で示されるものと等価であ るから磁石自身で定まるパーミアンス(開路パーミアンス)係数は

 $p_0 = \frac{L_m}{A_m} \sum P = 13.0....(10)$ 

 $P_t = P_0 + P_q$ 

第8図から, 磁石単体での磁束は YCM-1B>YCM-2B になるが, 有効磁束は YCM-2B>YCM-1B になる。次に磁石発電機の定常状 態での負荷が、3Aであるとすれば一定負荷時の減磁界 H<sub>l</sub>(Oe)は、

$H_l = -$	$\frac{\sqrt{2} \times A \bullet T}{80 \bullet l}$	(11)
A:	負荷電流	(A)
T :	卷 線 数	(回)
l :	平均磁路長	(m)
(11)式から		

A<sub>m</sub>: 磁石断面積 (cm<sup>2</sup>) *L<sub>m</sub>*: 磁石長さ(cm) 磁石発電機においては,発生電圧,出力が必要で実装状態を考慮 しなければならない。 第3図から実装状態における開路パーミアンスPoは,  $P_0 = 11.3$ 

$$H_l = \frac{\sqrt{2} \times 3 \times 150}{0.039 \times 80} = 210 \text{ Oe}$$

したがって負荷時における動作点と有効エネルギー積とを比較す ると第9,10図からYCM-2Bがすぐれている。また磁石発電機では 発電特性を安定にするため発電機内の磁石を安定化させるのに短絡 減磁を行なう。







第11図は発電機用として一般に最も多く使用されている突極形 の永久磁石である。このような形状の磁石は、磁場冷却、結晶の不 ぞろいなどに難点があり,角ばった減磁曲線が得られない。

第12図は,突極形磁石と扁平形磁石の減磁曲線の相異性を示した ものである。したがって磁石設計に当たっては、磁石形状による減 磁曲線の変動を考慮しなければならない。

また,第11図の磁石は第13図の磁石が6個つながったものと同 一であり,第14図に示すように微少の形状変化により有効磁束が変 化する。これは磁石長さ、磁石断面積,漏えい磁場、あるいは反磁 場の変化によるものであるが、ここで磁石形状による磁束の変化を 算出する。 t 寸法によって変化する漏えい磁場は, 第5,6図の磁場 である。 t 寸法による漏えい磁場は、ほとんど(6),(7),(9)式に より与えられる。そのほかに磁石長さ,磁石断面積の変化を考慮し て算出したものが第15回および第2表である。これより有効磁束 を計算したのが第14図である。 3.4 AC ダイナモの電気的特性 磁石発電機の特性は磁石ロータの回転角と有効磁束の関係, すな わち磁束波形により変わってくる。3.2 に示した方法によりACダ





第17図 ACダイナモの電圧-磁束波形 (2ms/cm)





第18図 ACダイナモの無負荷特性

イナモの磁束波形の計算値を第16回に示す。また誘起電圧波形お よび誘起電圧を積分した磁束波形の写真を第17回に示す。これか らもわかるように正弦波曲線に比べてかなり扁平な形をしている。 このような磁束曲線は次式で表わされる<sup>(3)</sup>。

$$\Phi = K \left( 1 - e^{-\frac{2q}{\pi}\theta} \right) \qquad 0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{2} \qquad \Big)$$



第19図 マイクロモータの磁気回路

# 4. マイクロモータ

# 4.1 マイクロモータの磁気回路とパーミアンスの計算

マイクロモータに使用される永久磁石は第1図に示すような中空 円筒形が大部分をしめている。第19図において,内部にモータの電 機子鉄心があるものとして磁気回路を考える。この場合電機子のス ロットを考慮に入れると非常に複雑になるので,ここでは簡単のた めスロットはないものと仮定する。実際の磁気回路を第19図のよ うにいくつかの簡単な形状の磁気回路要素に分解して考えて,各回 路要素のパーミアンスから全体のパーミアンスを合成する。以下の 諸式はいずれも

#### $L_1$ : 磁石長さ (cm)

ここに, **Φ**: 磁 束 (Mx)

- K: 磁束の波高値 (Mx)
  - q: 波形定数
  - e: 自然対数の底

第16図よりqを求めると

q = 3.5

無負荷電圧の瞬時値 ei は

$$e_{i} = -\frac{2qnwK}{\pi} e^{-\frac{2q}{\pi}\theta} \qquad 0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{2}$$
$$e_{i} = -\frac{2qnwK}{\pi} e^{-\frac{2q}{\pi}\theta} \qquad -\frac{\pi}{2} \leq \theta \leq 0$$
....(13)

で表わされる。無負荷電圧のピーク値 ( $e_{p-p}$ ,  $\theta=0^\circ$ )を実測により求め, 波形定数 qを求めると

q = 3.46

となり, さきの計算値とほぼ一致する。

また無負荷電圧の実効値を erv, 絶対値の平均値を emv とすると一般に

で表わされる。

emv 12

$$e_{mv} = \frac{1}{\pi} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} |e_i| d\theta = \frac{2 \, nwK}{\pi} \, (1 - e^{-q}) \quad \dots \dots (15)$$

であるから,無負荷電圧の実効値 erv は次式で示される。

d<sub>1</sub>: 磁石外径 (cm)
d<sub>2</sub>: 磁石内径 (cm)
d: 電機子外径 (cm)
L<sub>2</sub>: 電機子幅 (cm)
L<sub>g</sub>: 空げき長さ (cm)

の記号を用いることとする。

P<sub>1</sub>を半中空円筒の回路要素と考えると次式で示される。

となる。ただしここに

$$W = \frac{\pi (d + d_1)}{3 \times 2}$$
$$r = \frac{d_1 - d_2}{d_1 - d_2}$$

$$=$$
  $\frac{1}{2}$ 

P2を半円筒の回路要素と考えると

 $P_2=0.264 \mu W$  ......(18) 空げきにおけるパーミアンス  $P_g$ は, 第 19 図 で磁束が軸上 (*a*-*a*) に集束し, その集束角度を  $\theta$  とすると

となる。ただしここに

 $A_g = \theta L_2 W_1$  (空げきの面積)

$$W_1 = \frac{(d+d_1)}{2}$$

外部漏えい磁束 P3 は

$$P_{2} = \frac{32\sqrt{\frac{d_{1}-d_{2}}{2}} \cdot \frac{L_{1}}{\pi}}{\pi}$$

(16)式によって、ACダイナモの無負荷電圧(実効値)の計算値 と実測値を第18図に示す。計算値と実測値はほぼ一致している。 負荷特性についても同様に求めることができるが、ここでは省略 する。 となる。ただし P<sub>3</sub>は鋳造磁石のモータの計算におもに使われ,フェ ライト磁石の場合,外側に磁性体フレームを使用するので無視して もよい。以上に述べたものが中空円筒形磁石を励磁用として用いた 場合の磁気回路の各回路要素のパーミアンスである。 この回路の合成パーミアンス P<sub>i</sub> は次式で示される。



Am: 磁石断面積

(23) 式において, 鋳造磁石とフェライト磁石の Am と Lm のとり 方が異なってくる。アルニコ系鋳造磁石のように μr の高いものは 磁石の中性帯が磁路となっているが,フェライト磁石のように µrの 低いものでは磁性体フレームがヨークの働きをしており、帰路磁束 の大部分がフレームを通っている。両者の磁気回路上の相違を第20 図に示す。

となる。実測値は 3,750 Mx で計算値とほとんど一致している。 次に空げき寸法および電機子寸法と有効磁束が与えられた場合, 磁石の寸法を求める場合について述べる。磁石の寸法が決まらない と漏えい係数 f が求まらないが、この場合 f は磁気回路の形状によ ってだいたい一定の値をとると考えてよい。したがって磁石寸法を 適当な値で仮定してfを求める。f が与えられれば磁石断面積 Am は次のようになる。

鋳造磁石の場合

フェライト磁石の場合

となる。したがってフェライト磁石の場合,分割形にしても磁気回 路的にはまったく円筒形の場合と同一である。この点については別 に後述する。この回路の等価回路は第21図で表わされる。 パーミアンス係数が求まれば

の関係式より,磁石の減磁曲線上に p なる線を引き,曲線の交点よ り動作点磁束密度  $B_d$  が求まる。有効空げき磁束密度を  $B_g$  とすると

で表わされる。また有効磁束 **Q**g は次式で示される。

次に以上の式を用いて,計算値と実測値を比較してみる。磁石材 質を YBM-3 とし, 磁石寸法を 2.7 Ø×20 Ø×11 l (mm), 電機子寸 法を 19 Ø×11 l (mm) とする。また空げき寸法を 0.5 (mm) とし, 磁束集束角を90度とする。

また磁石長さ Lm は

で表わされる。ただしrはレラクタンス係数である。rの値は通常 の磁気回路では1.1~1.5の範囲であるが、継鉄との接合部の密着の 度合および接合部の長さと面積の比によって異なる。また Ba およ び Haは (BH) max 点の磁束密度および減磁界の強さをとるのが最も 経済的である。磁石寸法が求まればfを計算し直し誤差を修正する。

#### 4.2 マイクロモータの諸特性

マイクロモータの特性計算は一般の直流機と同じ方法で行なうこ とができる。以下の諸式はいずれも

T: 負荷トルク (g-cm)  $T_s$ : 起動トルク (g-cm)  $T_0$ : 無負荷トルク (g-cm) *E*: 電源電圧(V)  $E_a$ : 電機子電圧 (V) *I*: 電機子電流(A) *I*<sub>s</sub>: 起動電流(A) Z: 電機子導体数



N:回 転 数 (rpm)  $P_a$ : 電機子抵抗( $\Omega$ ) *p*: 極 数 a: 並列回路数  $K_1: 1.625 \xrightarrow{p} q \times \Phi$ 





第23図 マイクロモータの特性計算図

$$K_2: \quad \frac{p}{a} \quad \frac{10^{-8}}{60} \Phi$$

の記号を用いることにする。直流機の一般特性式より

$$N = \frac{E - IR_a}{K_E Z}$$

 $T_0 + T = K_T Z I$ 

出力Pに対しては

 $P = 1.027 \times NT \times 10^{-5}$ 

電流およびトルクの基準値として, 起動時の値をとると

 $T_s = K_1 Z I_s$ 

tttl, 
$$I_s = \frac{E}{R_a}$$

$$\frac{I}{I_s} = \frac{T_0}{T_s} + \frac{T}{T_s}$$

なる式が成り立つ。いま

$$i = \frac{I}{I_s}, \ \mu_0 = \frac{T_0}{T_s}, \ \mu = \frac{T}{T_s}$$

とすれば



1133

第25図 マイクロモータ用磁石(鋳造)の着磁

とおくと

$$\frac{P}{P_{s}} = \frac{T}{T_{s}} - \frac{(T + T_{0}) T}{T_{s}^{2}}$$

であるから

$$\lambda = \frac{P_s}{P}$$

とおけば

> $\Phi = 3,710 \text{ (Mx)}$  Z = 540  $R_a = 0.81 \text{ (}\Omega\text{)}$   $I_s = 3.34 \text{ (}A\text{)}$ E = 2.7 (V)

 $N_0 = 8,050 \text{ (rpm)}$  p = 2 a = 2  $P_s = 1.027 \times 10^{-5} T_s N_0 = 9.0 \text{ (W)}$  $K_1 = 1.625 \times \frac{p}{a} \times \Phi \times 10^{-5} = 5.96 \times 10^{-2}$ 



800

600

400

200

H形着磁

I形着磁

180°



第26図 マイクロモータ用磁石(フェライト)の着磁

 $K_2 = \frac{p}{a} \frac{10^{-8}}{60} \Phi = 62 \times 10^{-8}$  $T_s = 109 ~(g-cm)$ とする。ただし Toは {(軸受損)+(風損)+刷子摩耗損 +着磁損+銅損} をトルクに換算した値で  $T_0 \cong 12 \text{ (g-cm)}$ 

とする。

$$\mu_0 = \frac{12}{109} = 0.11$$

μοの計算値を第22図に適用すれば 第23図を描くことができる。第25図 において T/T。の値を変えトルクに対 する N, I, P の特性曲線を描き実測値 と比較したものが第24図である。



第27図

45°

90°

135°

着磁方法と界磁分布(開放磁路)

(b) 整 流 波 形

4.3 着磁および磁石の分割とモー

夕特性への影響

マイクロモータに使用する環状磁石 の着磁方法は磁石の材質によって異 なる。

YCM-1,2の鋳造磁石では電機子を 組み込んで着磁する。その着磁過程は 第25図に示すようになる。まず着磁 器に十分なる電流(だいたいその保磁 力の約5倍のAT)を流すと、磁石は 磁化曲線に沿って飽和点まで磁化され る。次に電流を断つと減磁曲線に沿っ て,実際は空げきがあるので, C 点ま で減磁される。着磁器より取り出すと さらに大きな減磁力が働いてD点まで 減磁されることになる。もし電機子を 外部に取り出すときはE点まで減磁す る。再び電機子をそう入してもD点に

第28図 マイクロモータの電圧,磁束,整流波形(I形ヨークで着磁)





は戻らずF点に戻ることになる。したがって鋳造磁石の場合は組込 み着磁を行ない着磁後はその磁気回路を開かないように注意しなけ ればならない。

鋳造磁石では磁場中冷却処理を施してあるので, 直径方向に異方 性をもっており,この方向が磁化容易方向となる。着磁の際は正し

モータの場合用途によって異なるが、約10度ぐらいまではほとんど 問題にならない。

フェライト磁石の着磁は著しく鋳造磁石の場合と異なる。フェラ イト磁石は保磁力はきわめて大きく、導磁率が小さいため外側着磁 をすると外部漏えい磁束が著しく増加し,反対に内部有効磁束が激

くこの方向に着磁しなければならない。また磁場処理方向とそれを 示すマークがずれた場合,マークの方向に正しく着磁しても磁極は 磁化容易方向に偏極する。この場合磁気的中性点に対し刷子位置が ずれ,いわゆる極ずれが生じ,有効磁束の減少,整流特性の悪化, 消費電流の増大などの弊害が生ずる。したがって磁場処理方向と着 磁方向をできるだけ一致させることが製造上重要である。マイクロ

減する。したがってフェライト磁石の場合は第26回に示すように 内面より着磁しなければならない。 YBM-3 のような等方性ではマ イナーループが低パーミアンス係数まで減磁曲線上にあるため、着 磁ヨークを引き抜いて磁気回路を開いた後電機子をそう入するとマ イナーループは減磁曲線に沿って上昇する。

フェライト磁石は着磁方法により,界磁の磁束分布が異なる。モ

回転機用永久磁石の設

ータの界磁の磁束分布は起動特性,整流特性などの運転性能により 大きく影響されるため,その設計には十分な注意が必要である。界 磁の磁束分布の状態は電機子の形状,空げき寸法,着磁ヨークの先 端の形状および後述する分割形であるかどうかなどによって変わ る。 第27図は着磁方法および着磁ヨークにより界磁の磁束分布が どのように変わるかを示したものである。 第28~30図は着磁ヨー クの形状と誘起電圧波形,磁束波形,整流波形の写真である。この 写真からわかるように誘起電圧の電気的中性帯域を広くすると整流 特性は良好になる。そのためにはI形ヨークを使用して正弦波分布 としたほうが整流特性は良いが,トルクの点からはH形ヨークを用 いて着磁幅を広くしたほうが良い。これは最も一般的に使用されて いるものである。またあまり着磁幅を広くすると整流特性は悪くな りトルクが低下し消費電流が増大する。 第28~30図に示す磁束波

形は電機子鉄心の誘起電圧を積分器により積分したものであるが, コイルだけの場合,すなわち開路磁束波形はだいたい誘起電圧波形 に一致している。

現在マイクロモータ用磁石として使用されているものは大部分環 状形であるが、フェライト磁石では第26図のような分割形が使用さ れている。この図から環状形の場合中性帯の部分がまったくむだに なっていることがわかる。第3表に内外径,空げき寸法,電機子寸 法が同一な場合の分割形と環状形の有効磁束の計算値と実測値を示 す。この点では分割形の場合のほうがより経済的であるといえるが. 分割形は製造工程上フェライト磁石の場合は寸法的にあまり高精度 のものは期待できず、空げき寸法の大きいものに限られる。それに 対して環状形の場合加工上高精度のものが得やすいのとモータの組 立工程が簡単なため多く使用されている。しかし環状形フェライト 磁石で異方性のものは, 焼結の際の収縮率にも異方性があるので, だ円形になりやすいため,環状形の異方性磁石はほとんど使用され ていない。異方性磁石が必要な場合および大形になり材料費の損失 が問題になる場合は分割形が使われる。分割形にした場合の利点は 第32図に示すように,誘起電圧波形が環状磁石の場合と著しく異な り、電気的中性帯の幅が大きく整流特性においてすぐれていること である。また起動トルク、負荷トルクなどのモータ特性においても 良好である。

第3表 環状形と分割形の有効磁束 (33 \$\phi \times 12 l)

計

	有 効 磁	束 $(M_x)$	パーミアンス係数		
	計 算 值	実 測 値	計算值		
分割 形	5, 200	5, 250	3.86		
環 状 形	5, 150	5,250	3.80		

#### 第4表 日立マグネットの温度係数 (0~80℃)

種	別	寸 法 比	温度係数%/℃			
鋳 造 磁 石	Y C M-3	2.0 3.0 8.0	-0.022			
	YCM-1B	3.0 4.0 8.0	-0.016 -0.016 -0.022			
	YCM-2B	2.0 3.6 8.0	$0 \\ -0.020 \\ -0.032$			
	YCM-2C	2.0	-0.018			
	YCM-4C	2.0	-0.020			
フェライト 磁 石	Y B M-1	作動点 Bd の温度係数	-0.15			
	YBM-2	作動点 Ba の温度係数	-0.15			
	Y B M-3	作動点 Bd の温度係数	-0.15			

1135



第31図 分割形 (フェライト) マイクロモータ

# 5. 設計上注意すべき

二、三の点

#### 5.1 経時変化

永久磁石は,種々の条件によって使 用中に磁気的な変化を生じることがあ り,回転機においては電気的特性の低 下を見る。この変化が時間とともに起 こるものを経時変化という。

永久磁石の経時変化には2段階あ り,磁気的原因による比較的短時間に 変化の終了するものと,冶金的原因に







第32図 分割形マイクロモータの電圧,磁束,整流波形

--125 ----

よって異なる。回転機に使用される磁石では、たいたい 0.2% 以下 と考えてよいのでほとんど問題にならない。 積算電力計,スピードメータなどの計器用として使用する場合, 自己反磁界による経時変化を防止するためには交流安定化減磁が有 効であり,鋳造磁石では 3~4% が適当である。また逆に減磁量があ まり大きいと,使用中増磁現象を生じることがあるので注意しなけ ればならない。

か,もしこれのの変化を防止する必要がある場合は,熱格しにより 変化を促進して安定化させた後使用すればよい。70~100℃の加熱 を与えれば,普通300~400時間必要であったものが5~6時間で変 化を完了させることができる。

このような永久磁石の安定性については、辻田博士および北川氏 らにより種々実験されているが減磁率 *δ%* は次式で示される<sup>(4)</sup>。 1136 昭和40年6月

日 立 評

第 47 巻 第 6 号

		2 C								and the second se
材	料	Br Gauss	Hc Oersted	$(BH)_{\max}$ (G•Oe×10 <sup>6</sup> )	Curie 点 (℃)	比 重	比 抵 抗 (µΩ/cm <sup>3</sup> )	硬 <sub>(HR)</sub> 度	熱膨張係数 (20℃~300℃)	抗 張 力 (kg/mm <sup>2</sup> )
Cast Alnico 1		7,100	400	1.3	780	6.9	75	C-45	12.6×10 <sup>-6</sup>	2.88
Cast Alnico 2		7, 200	540	1.6	815	7.1	65	C-45	12.4×10 <sup>-6</sup>	2.11
Cast Alnico 3		6, 700	450	1.4	760	6.9	60	C-45	13.0×10 <sup>-6</sup>	8.44
Cast Alnico 4		5,200	700	1.2	800	7.0	75	C-45	13.1×10 <sup>-6</sup>	6.40
Cast Alnico 5		12,000	575	5.0	890	7.3	47	C-45	11.3×10 <sup>-6</sup>	3.80
Cast Alnico 5	$(\mathbf{DG})$	13,000	600	5.5	815	7.3	47	C-45	11.3×10 <sup>-6</sup>	
Cast Alnico 6		10,000	750	3.5	850	7.3	50	C-55	11.4×10 <sup>-6</sup>	16.17
Cast Alnico 8		8,000	1 400	4.0	860	7.3		C-58	11.0×10 <sup>-6</sup>	27.42
Cast Allico d	0 2	6,800	520	1.4	815	6.8	68	C-43	12.4×10 <sup>-6</sup>	1.55
Sintered Alnie	0 2	10,000	575	3 5	890	6, 8	65	B-73	11.3×10-6	0.98
Sintered Anno	0 5	10,000	515	0.0			7.(7.57.5	Street and Charles	ACCESSION OF CASE AD	

第5表 Alnico 磁 石 の 物 理 的 機 械 的 性 質<sup>1)</sup>

論

1) Parker Studders Parmanent Magnets and their Application p148~151





#### -5 0 5 10 15 20 25 30 35 40 45 50

温度(°C)

第33図 マイクロモータの温度による磁束の変化



S: 安 全 率

したがってバリウムフェライト磁石などの高保磁力のものでは, 経時変化はほとんど無視できる。

#### 5.2 温度変化と温度係数

積算電力計などの計器類に使用される低保磁力の鍛造磁石 (HJ, CHJ 鋼) ではその設計および使用に当たって経時変化を十分考慮す る必要があるが,磁石発電機においてはほとんど問題にならない。 特にフェライト磁石では十分に安定である。しかしながらここで述 べる温度変化は保磁力と別の機構によるもので,経時変化に対し安 定であったフェライト磁石が温度係数が大きいことに注意しなけれ ばならない。永久磁石の温度係数は、フェライト磁石の場合等方性 の YBM-3 と異方性の YBM-1, YBM-2 は同じ温度係数である。ま たフェライト磁石や鋳造磁石でも等方性磁石では磁石の動作点にほ とんど無関係であるが,YCM-1,YCM-2 のような異方性鋳造磁石 では動作点によって温度係数が異なる (第4表)。

フェライト磁石を使用するマイクロモータなどでは温度係数を十 分考慮して設計する必要がある。第33回は温度変化による有効磁 束の変化を示す一例である。

鋳造磁石を使用する回転機では、ほとんど温度変化に注意する必要はなく、その防止方法としては、交流減磁および熱枯しなどの方法がとられている。また計器用に使用される場合は、整磁鋼により

 $H'_d H_d$ 

第34図 逆磁界による減磁

空げきのためA点にある。次にこれに逆磁界  $H_a$  を加えるとB点に 下がり逆磁界を取り去ってもA点に戻らずマイナーループに沿って C点に至る。 $H_a$  より小さい逆磁界が加わった場合は,動作点はマイ ナーループ上を往復して常にC点に戻る。この場合は減磁は生じな いと考えてよい。 $H_a$  以上の減磁界が作用した場合は B' 点より C' 点に至るマイナーループ上を移動するため減磁が生ずる。

これらの使用中の減磁を避けるためには磁石発電機(ACダイナ モ,マグネト)では,最高回転数において出力端子を短絡させ逆磁 界を与えて安定化する方法が一般に用いられる。すなわち,あらか じめ予想される減磁界以上の磁界を与えて安定させるものである。 短絡減磁の場合,線輪の自己誘導により,電流の遮断時に高い電圧 が過渡的に生じるため不安定であるが,定常電流の約2倍の減磁界 が作用する。磁石発電機では短絡減磁界は,初期有効磁束に比例す るので磁石材料としては,Brが低く,Hcの高いYCM-2Bが最も 一般的である。また溶接機などに用いられる電流容量の大きい発電 機では自励磁線輪により過負荷時の減磁を回復させる方法もある。

# 5.4 機械的強度

H

静的な磁気回路における磁石では,磁石の強度という点はさほど 問題にならないが,回転する磁石ロータは強度を考慮した安全性が 要求される。磁石材料は一般にかたく,もろいといわれているが, その機械的性質は磁石材料によってかなり異なっており材料の選択 が必要である。一般的な磁石材料の機械的特性を**第5表**に示す<sup>(1)</sup>。

磁石ロータの場合,高速回転時の破壊は,接線方向の応力による ものと考えると,回転数と応力の関係は,リング状の場合は次式で

γ: 単位体積の重量 (kg/cm<sup>3</sup>)

温度補償をしていることは周知のとおりである。

5.3 外部磁界の作用

磁石式回転機の場合,最も注意しなければならない点に外部磁界 の作用がある。回転機においては回転中に動作点が変化しマイナー ループ上を移動しており,磁石にはその磁界と逆向きの磁界が絶え ず作用している。永久磁石に逆磁界が作用した場合の動作点の移動 は,第34 図に示すようになる。着磁された後の磁石は,磁気回路の 示される(5)。

--126 -----



*μ*: ポアソン比

$$\alpha: -\frac{a}{b} \left( \frac{-\underline{P}\overline{A} }{\underline{P}} \right)$$

g: 重力の加速度 (cm/s<sup>2</sup>)

5.5 設計上制約を受ける点

磁石材料は加工上の点で制約を受ける場合が多い。そのほか異方 性効果をもたせるためにも種々な制約を受ける。

(1) 加工性のための制約

磁石材料は非常にかたく,もろいので加工費を最小にするとい うことは,磁気エネルギーを有効に利用する形状の設計と同等に 考慮されなければならない。磁石材料の加工は,ほとんど研摩加 工であるので,その形状は円筒研摩および平面研摩加工に適した 形状にするのが経済的である。複雑な磁気回路が要求される場合 は、ヨークなどを適当に設計して使用するのが普通である。

(2) 結晶異方性のための制約

YCM-1C, YCM-1Dのように磁場中冷却効果以外に端面に冷し金を使用して結晶を冷し金面より垂直に発達させる結晶異方性をもたせる磁石は,端面の直径を長さに比し十分大きくとる必要がある。この場合は円筒形か角形の磁石に限定される。したがってACダイナモ用の突極形磁石やフライホイールマグネト用の磁化方向が扁平な磁石では,結晶異方性をもたせることは特別な場合を除いてできない。

てば幸いである。

磁気回路の解析については仮定磁路法によった。計算精度につい てはなお問題はあるが,実用上十分な近似が得られることを示した。 磁石発電機の特性計算においては,磁束波形の波形定数が重要な 要素になっている。負荷時の逆磁界による波形のひずみ,および磁 気飽和によるインダクタンスの変化,高速回転時のうず電流損など の負荷特性までは言及し得なかったが,今後これらの問題を究明し, より完全な設計理論を確立したい。

マイクロモータにおいては,界磁磁束分布が,モータ特性に与える影響が大きいことを述べたが,整流特性,磁束分布など定量的な 解析は今後の課題としてさらに発展させたい。

磁石回転機は今後ますますその需要が増大するものと思われるが 材料面での今後の動向として,発電機などのロータの磁石材料とし ては保磁力にすぐれた機械的特性をもつ Alnico 系高保磁力磁石が その中心になるものと思われる。またマイクロモータなどのステー タ用としては寸法精度,温度係数,磁性のバラツキなどに多くのす ぐれた特長をもつ E.S.D(Elongated Single Domain)磁石の占め る割合が増大するであろう。これら新しい磁石材料のより効果的な 設計による性能向上,コストダウンが今後の課題である。

### 参考文献

- (1) R. J. Parker & R. J. Studder: Permanent Magnets and Their Application 205 (1962)
- (2) F. Strauss: Synchronous Machines with Rotating Per-

# 6. 結 言

以上回転機に使用される磁石のうち,ACダイナモ,マイクロモ ータについて磁気回路および電気的特性の計算について論じた。拙 稿により磁石とその応用機器の関係についての理解に少しでも役だ manent-Magnet Field Part II 887~893 (1952)

- (3) 藤崎, 小笠原: 日立評論 45, 1975 (昭 38-12)
- (4) 北川: 日立評論 43, 1095 (昭 36-9)
- (5) 北畠, 片山訳: 材料力学(下) p.168



# 蒸気タービン調整装置

負荷の変動に関係なく,蒸気タービンを一定回転数で運転させる 調速装置の一つに第一段ノズルを幾つかの群に分け,各ノズル群ご とに独立して設けられた弁を個別的に操作し蒸気量を変化させて負 荷変動に応じているノズル締切調速法なるものがあることは周知で ある。

この発明はこのような調速装置に関し,特にタービンの低負荷運 転時において有利な調速動作を行なう改善された装置を提供するも のである。

最近の蒸気タービン作動蒸気は高温高圧で,機器に対する熱影響, つまり熱応力,熱衝撃などの面で作動条件が厳しくなっている。こ のことは運転に当たり部分負荷運転,急速起動を要求されるものに おいて特に留意しなければならない。

この発明は2段になるノズル弁でもって消費蒸気量の多寡に応じ て別々の弁により蒸気流量の調整を行なうものであり,具体的にい えば、ノズル締切調速を備えた蒸気タービンの加減弁に、弁棒によ る操作を直接受ける子弁と、この子弁を収容し、弁の操作範囲を越え る範囲において操作される親弁とからなる二重弁を採用し、起動時 には各弁の小弁を並行して開き、各ノズル群から均等に蒸気を流し、 以後負荷の増大とともに各弁を個別的に制御するようにしたもので ある。 キング,5はカバー押えボルト,6は親弁体,7は子弁体で,親弁体6に収容され弁棒3に直結されており,ピン12により親弁体6と 結合されている。8は親弁側部に穿設された子弁蒸気入口孔,9は

親弁低部に開口する子弁蒸 気出口孔である。さて,今, 低負荷状態で弁棒3が弁開 方向に操作されると,ピン 12と子弁体とピン孔とのク リアランス10の範囲にお いては子弁7だけが上動し て蒸気入口孔8,蒸気出口 孔9を通じて作動蒸気を/ ズルに供給し,以後負荷の 増大とともに各弁を個別的 に制御するものである。

このようにこの発明は前 記の構成により起動時およ び低負荷時においても作動 蒸気をノズルに均等に流 し,温度分布の不均等な点 より生じる熱応力を避ける ことができる。(山本)



これを図面で説明すると、1は調速弁本体、2は調速弁カバー、3はガバナーからの指令に基づき弁の開閉を行なう弁棒、4はパッ

9 (\*\* 1 57

第 1 図