

円すい回転子電動機の軸推力特性

The Characteristic of Axial Force of the Motor with Tapered Rotor

塙 俊 郎* 北 村 彦 蔵*

Toshio Hanawa Hikozi Kitamura

内 容 梗 概

ホイストに用いられる円すい回転子電動機では、起動時に大きな軸推力を必要とするので、この推力特性について検討した。その結果、軸推力は単に鉄心空げき間の鎖交磁束のみではなく、千鳥漏えい磁束が関係しており、起動時にはその値がかなり大きくなること、また斜めスロットにした場合鎖交磁束の分布の変化によって、軸推力がさらに大きくなることが判明した。

1. 緒 言

円すい回転子電動機に発生する軸推力は、ホイストのブレーキ開放に利用できる。その軸推力は運転時もさることながら、起動時にはさらに大きいものが望ましい。その理由は、ホイストではブレーキの制動トルクとして電動機の定格トルクの約3倍を必要とするため、ブレーキバネ力が大きく、したがって運転時の軸推力はこれより大きいことが必要であり、さらに起動時にはモータピニオンの歯面や軸受のしゅう動抵抗が働くので運転時より大きい軸推力が必要となるのである。一方、円すい回転子電動機についての研究は足立氏⁽¹⁾などによって実験検討されているが、同期速度近辺についてのものであり、起動時についてはほとんど触れていない。また円筒回転子電動機の起動時の軸推力に関する研究⁽²⁾はあるが定性的なものであり、円すい回転子電動機に関するものは現在見うけられないようである。運転時の理論をそのまま起動時に当てはめると、実際とは逆に運転時の数分の1の推力の計算値しか得られず、過大な円すい回転子電動機を設計してしまうことになる。したがって小形化するためには起動時の軸推力特性を解明する必要がある。以下、推力特性について検討した結果を述べる。

2. 円すい回転子電動機の軸推力の理論的検討

電動機の回転子に働く力は、(1)電流に対して磁束が通過する場合に生ずる電磁力と、(2)鉄の表面を磁束が通過する場合に生ずる磁気力であるといわれている⁽³⁾。したがって回転子の軸推力は回転子各部分の電流と磁束を握し、その作用力の大きさを検討すればよい。軸推力に関係すると考えられる要因をあげると

- (1) 鎖交磁束により回転子表面に作用する磁気推力
- (2) 回転子の端環に流れる電流とその部分を通過する磁束によって生ずる電磁力
- (3) 空げきを通過する千鳥漏えい磁束により、回転子表面に作用する磁気推力
- (4) 斜めスロットによる空げきの鎖交磁束分布の変化に対応する回転子表面磁気力の変化

などが考えられる。以下各項目について検討を加える。

2.1 鎖交磁束による軸推力

鎖交磁束が回転子の表面を通過することにより、その表面には、相対する固定子表面へ向かう力が発生するが、その軸方向の成分は回転子の軸推力となって現われる。足立氏⁽¹⁾はこの軸推力を、空げきのエネルギーを軸方向に微分することによって求め、次式で与えている。全負荷時にはこの式で求めた値と実験値とが一致することが確かめられている。

* 日立製作所多賀工場

$$P = \frac{B_{\text{eff}}^2}{2g\mu} \pi \frac{D_1 + D_2}{2} \left(g_e + \frac{D_2 - D_1}{2} \right) K \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに P : 回転子軸推力 (kg)

B_{eff} : 磁束密度の実効値 (Wb/m²)

g : 重力の加速度 9.8 (m/s²)

μ : 透磁率 $4\pi \times 10^{-7}$ (Wb/AT·m)

D_1 : 回転子の最小径 (m)

D_2 : 回転子の最大径 (m)

g_e : 空げき長 (m)

K : カータ係数

注: 鎖交磁束以外の磁束の場合はカータ係数を除いて計算する。

鎖交磁束は、電動機の等価回路を用い起動時について計算すると、一次電圧降下のため運転時に比較して減小し、後述する供試機では60%程度となる。したがって回転子の軸推力は起動時には運転時の3分の1程度に激減することになる。しかし実測してみると、起動時のほうが運転時より逆に軸推力が大きくなることから、起動時には他の大きな要因が関係してくることが明らかである。

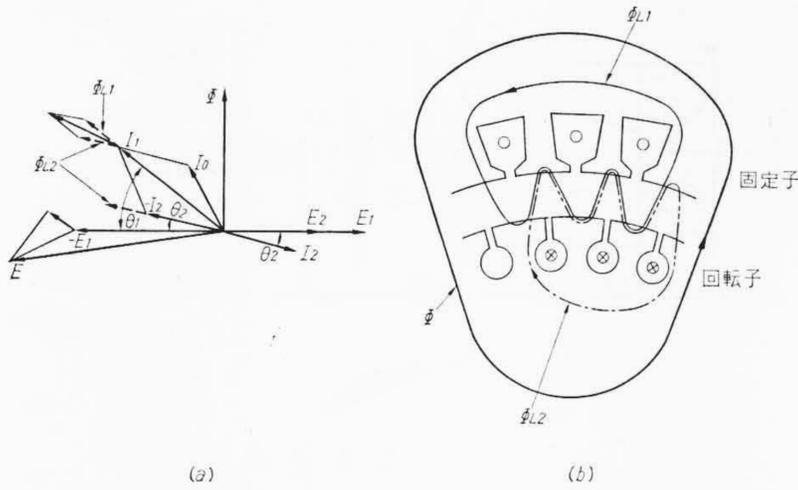
2.2 回転子の端環電流と端環部を通る磁束による電磁力

江森氏⁽²⁾は円筒回転子電動機の、起動時における軸推力について述べているが、これによれば端環電流と、端環部を通過する磁束によって電磁力が軸方向に発生し、二つの端環に働く力の方向は互いに電動機積厚の中心を向くと述べている。円すい回転子電動機では左右の回転子端環の大きさに差があるので、その力の差が回転子を吸引する方向の力となる。一例として後述の供試機について、起動時に端環に働く力を計算すると端環部を通る磁束は非常に少ないので、全発生軸推力の数百分の一となり、結局省略できる程度のものであることがわかる。

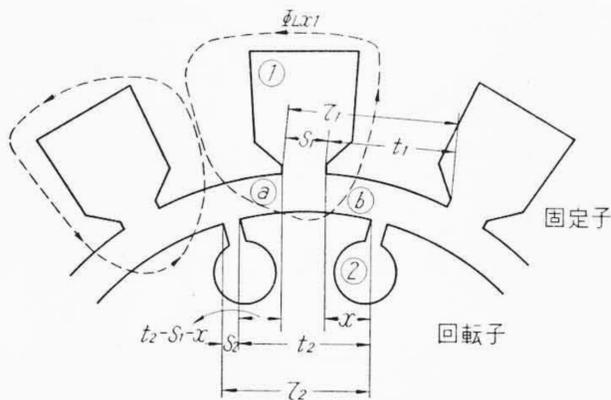
2.3 千鳥漏えい磁束による軸推力

固定子および回転子のスロット内導体に流れる電流により第1図(b)の ϕ_{L1} 、 ϕ_{L2} のような空げき中を通る千鳥漏えい磁束が生じ、この磁束により回転子には軸推力が発生するはずである。以下千鳥漏えい磁束について検討する。

第1図(a)は電動機のベクトル図であり、第1図(b)はそれに対応する諸磁束を図解したものである。一次電流 I_1 による磁束と二次電流 I_2 による磁束は方向が逆であるから打ち消し合い、その差が鎖交磁束となるが、一方諸漏えい磁束とともに一次電流による千鳥漏えい磁束 ϕ_{L1} と、二次電流による千鳥漏えい磁束 ϕ_{L2} とは、打ち消されずに残る。しかもこの ϕ_{L1} と ϕ_{L2} とは空げき中では逆に重なり合う傾向を示す。すなわち ϕ_{L1} と ϕ_{L2} との位相的關係は I_1 と $-I_2$ との関係と同一となる。無負荷時には I_1 と $-I_2$ とは約90度の位相差を有し、しかも電流が小さいので千鳥漏えい磁束は小さいが、起動



第1図 ベクトル図と磁束との関係



第2図 千鳥漏えい磁束

時には I_1 と $-I_2$ との位相差がほとんどなくなって重なり、さらに電流も大きいので千鳥漏えい磁束は非常に大きくなる。

次に千鳥漏えい磁束を計算する前提として次の仮定をおく。

- (1) 鉄部の飽和はないものとする。
- (2) フリンジングは無視する。
- (3) 斜めスロットはない。

第2図において固定子スロット①の電流によって発生する千鳥漏えい磁束 ϕ_{Lx1} は固定子スロットの周囲を通り空けき②を通過して回転子の歯先を通り、空けき③を通ってもどるものである。 ϕ_{Lx1} の量は、固定子スロット内のアンペアターンと、磁路の空けき④および③のパーミアンスを乗ずることにより(2)式のように求めることができる。

$$\phi_{Lx1} = \frac{f_{w1} I_1 n_1 L \mu (t_2 - s_1 - x) x}{g_e (t_2 - s_1)} \dots (2)$$

ここに ϕ_{Lx1} : 固定子と回転子の歯先の関係位置が第2図のようにだけ変位したときの固定子スロット①の周囲の千鳥漏えい磁束の実効値 (Wb)

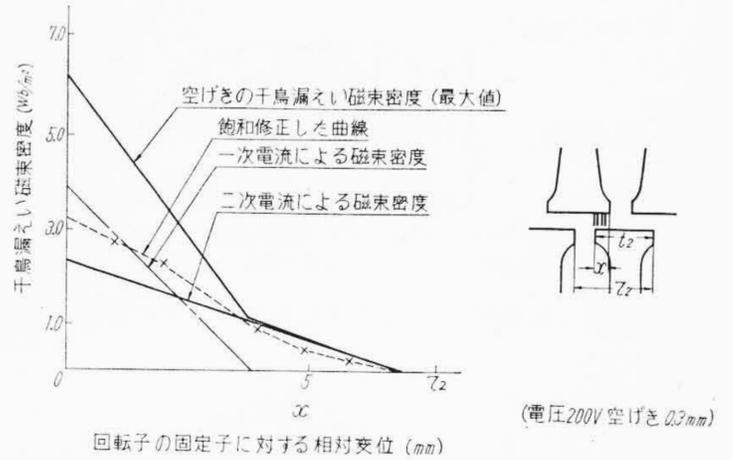
- f_{w1} : 固定子の巻線係数
- I_1 : 固定子導体電流の実効値 (A)
- n_1 : 固定子スロット内の導体数
- L : 有効積厚 (m)
- t_2 : 回転子の歯先の幅 (m)
- s_1 : 固定子の歯先のスロット幅 (m)
- x : 第2図のような固定子に対する回転子の変位 (m)

また ϕ_{Lx1} による空けき磁束密度は回転子表面の各部で異なり、また変位 x によっても変化するが、これらについて実効値 B_{L1} を求めると(3)式ようになる。

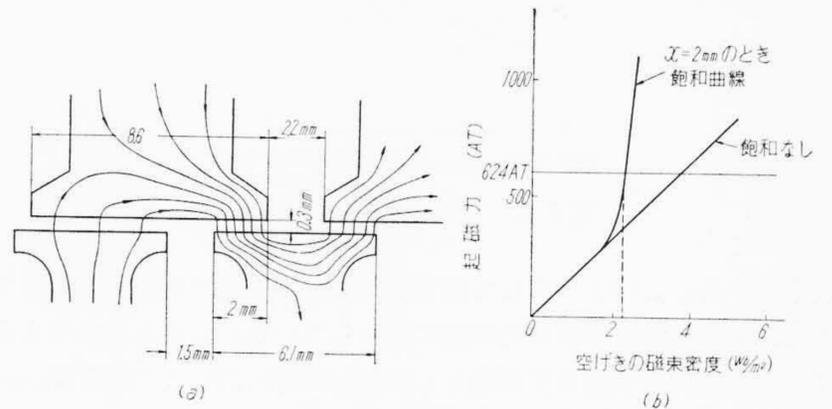
$$B_{L1} = \frac{f_{w1} I_1 n_1 \mu (t_2 - s_1)}{g_e \sqrt{6} \tau_1 \tau_2} \dots (3)$$

ここに B_{L1} : 一次電流による千鳥漏えい磁束密度の回転子全表面に対する実効値 (Wb/m²)

- τ_1 : 固定子の歯のピッチ (m)
- τ_2 : 回転子の歯のピッチ (m)



第3図 空けきの千鳥漏えい磁束密度 (起動時)



第4図 磁束の分布と飽和曲線

また二次電流による千鳥漏えい磁束密度も(4)式によって求めることができる。

$$B_{L2} = \frac{I_2 n_2 \mu (t_1 - s_2)}{g_e \sqrt{6} \tau_1 \tau_2} \dots (4)$$

ここに B_{L2} : 二次電流による千鳥漏えい磁束密度の実効値 (Wb/m²)

- I_2 : 回転子の導体電流の実効値 (A)
- n_2 : 回転子導体の数=1
- t_1 : 固定子の歯先の幅 (m)
- s_2 : 回転子の歯先のスロット幅 (m)

さらに B_{L1} と B_{L2} とを合成すると全千鳥漏えい磁束密度となり、その実効値は(5)式のようになる。

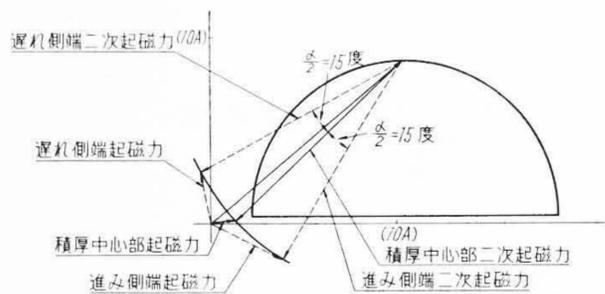
$$B_L = \sqrt{B_{L1}^2 + B_{L2}^2 + 2 B_{L1} B_{L2} \cos(\theta_1 - \theta_2)} \left\{ 2 \frac{t_2 - s_1}{t_1 - s_2} - \left(\frac{t_2 - s_1}{t_1 - s_2} \right)^2 \right\} \dots (5)$$

ここに B_L : 全千鳥漏えい磁束密度の実効値 (Wb/m²)
 θ_1 : 一次電流 I_1 の遅れ角 } 第1図参照
 θ_2 : 二次電流 I_2 の遅れ角 }

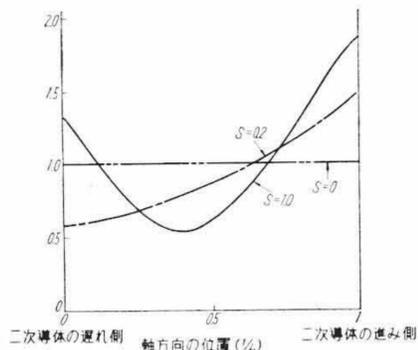
斜めスロットの場合については、仮に磁束が積厚方向には通らないとして千鳥漏えい磁束および磁束密度を計算すると、前述の斜めスロットのない場合の(2)~(5)式と全く同一式が得られる。積厚方向の磁気抵抗はかなり大きいので結局斜めスロットのない場合とほとんど同一となる。

後述するような仕様の供試機について千鳥漏えい磁束密度を計算すると、電流最大のときは第3図のようになり、6.7 Wb/m² に達する。しかしこの計算は鉄の飽和を無視しているため、実際にはこれよりかなり低下する。

飽和を加味した正確な計算は困難であるが、概算は可能である。すなわち、固定子に対する回転子の各変位に対して第4図(a)のような磁束の分布状態を想定し、各磁束密度に対する起磁力を求め、第4図(b)のような磁束密度-起磁力曲線を求める。この飽和曲線より空けきの磁束密度が求められるが、この場合、鎖交磁束の影響およびフリンジングの影響、起磁力変化による磁束分布の変化などを無



第 5 図 起動時の円線図 (斜めスロットの影響)



第 6 図 軸方向起磁力の分布

視している。このようにして概算したのが第 3 図の飽和修正曲線であり、(2)式の計算値の約 60% に低下している。しかしそれでも全千鳥漏えい磁束密度の実効値としては起動時において 0.55 Wb/m^2 になるので鎖交磁束密度と同程度の推力を発生することになる。このように電流の大きい同期速度以外の点では千鳥漏えい磁束の影響は無視できない。軸推力はこれら磁束の実効値を(1)式へ代入して求められる。

2.4 斜めスロットの影響

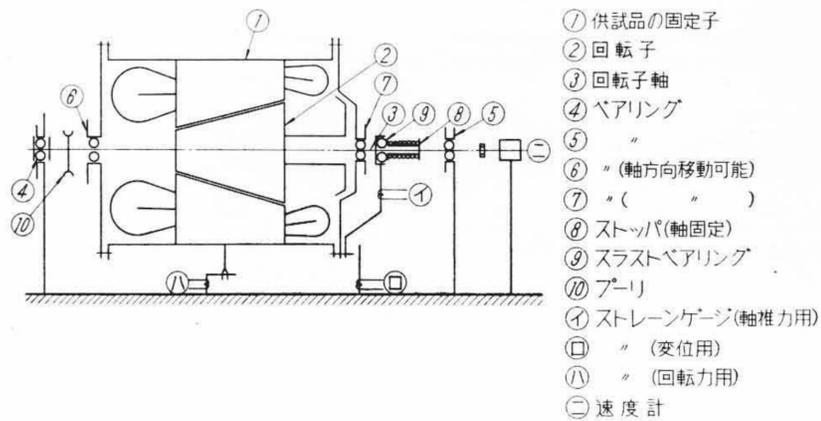
電動機は一般にクローリングあるいは騒音を避ける目的でスキューしているが、スキューすることにより空げきの鎖交磁束密度の分布状態は軸方向に変化する⁽⁴⁾⁽⁵⁾。石黒氏⁽⁴⁾はその分布状態を円線図から求めうることを実証している。すなわち鉄心端面の起磁力関係は、中心断面における円線図の二次起磁力を第 5 図のように電気的斜めスロット角の 2 分の 1 だけそれぞれの方向に回転したものとなり、結局端面の起磁力は一次起磁力と二次起磁力のベクトル差となる。この起磁力の分布から鎖交磁束密度の分布を求めることができる。

第 5 図は供試品の円線図であり、破線は両端面の起動時の起磁力関係である。第 6 図は第 5 図のような手法で、無負荷時、すべり 0.2、起動時について求めた起磁力の分布状態である。単位は無負荷時の起磁力を 1 として表わしている。軸方向の分布状態は無負荷時には一定であるが、起動時には回転子導体の進み側端面では中心部の 3 倍になっている。したがってその実効値は斜めスロットのない場合よりも高く 1.7 倍となっている。このようにスキューしない場合に比較してスキューした場合には無負荷時以外の軸推力がかなり大きくなるのがわかる。

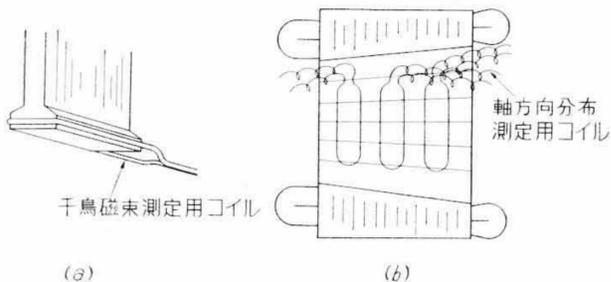
3. 実 験

3.1 実験の方法

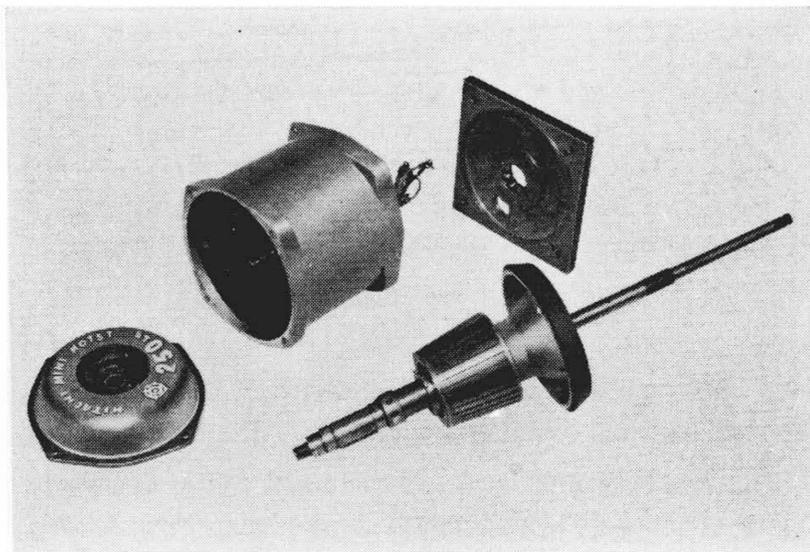
軸推力は理論的検討によれば、空げきの鎖交磁束、千鳥漏えい磁束および斜めスロットにより両鉄心端面で鎖交磁束が増加する現象の 3 要素に支配されており、いずれも回転数と関係している。そこでわれわれは回転数、軸推力、電流、鎖交磁束による誘起電圧などを同時に記録できる装置を製作した。第 7 図は測定装置の原理図である。①は供試機の固定子、②は回転子である。回転子の軸はベアリング④と⑤でささえられており、軸方向には移動できない。固定子は⑥と⑦のベアリングでささえられ軸方向に移動できる。しかし回転しないように⑧の部分にストップが設けられている。固定子に



第 7 図 測定装置原理図



第 8 図 測定用コイルの位置



第 9 図 供 試 機 の 分 解 図

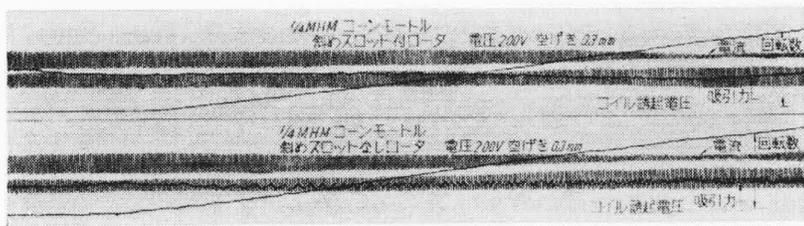
第 1 表 供 試 機 の 仕 様

電 源	200V 50~	定格出力	500W	
回 転 数	1,410 rpm	定格電流	2.7 A	
固 定 子	接 続	△	回 轉 子	
	一相直列巻数	912	最 大 径	89.19mm
	スロット数	24	最 小 径	74.61mm
積 厚	64	スロット数	34	
		空 げ き	0.3	

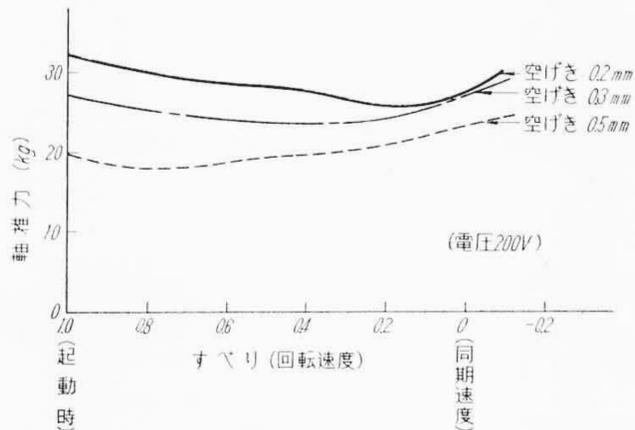
作用する軸推力は④の部分とスラストベアリング⑨を介して⑧のストップで受ける構造となっている。負荷は⑩のプーリへかけられる。

軸推力は④部にはり付けたストレインゲージによって測定され、回転速度は⑭の速度計で、またハウジングの移動距離および回転力は⑫および⑬のストレインゲージで読むことができる。

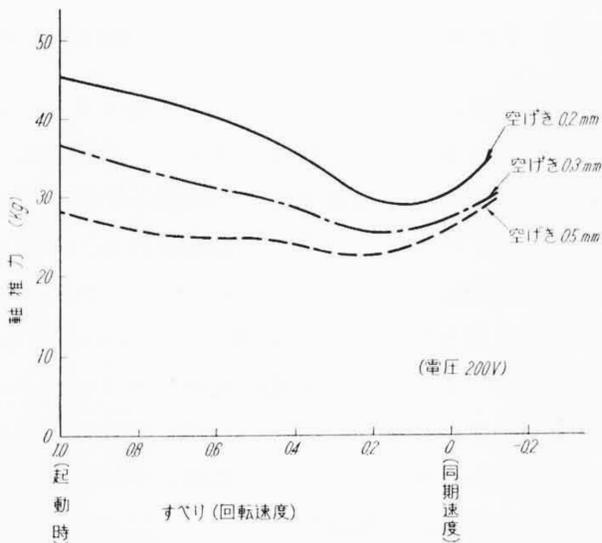
実験では斜めスロットの影響を分離するため、同一仕様で斜めスロットのある回転子とない回転子を製作し、究明を行なった。鎖交磁束は固定子 1 極の歯先の周囲にコイルを巻き、これに誘起される電圧から求めた。千鳥漏えい磁束の測定は困難であるが、一次電流による千鳥漏えい磁束は第 8 図(a)のような 1 歯の先に巻いたコイルに高調波電圧を誘起するので、これから解析の試料を得た。また斜めスロットの影響については固定子内面に第 8 図(b)のように軸方向に 3 箇所コイルをはり付け、これに誘起される電圧から磁束密



第10図 軸推力の実測例



第11図 斜めスロットのない場合の全軸推力と回転速度(空げきとの関係)



第12図 斜めスロットのある場合の全軸推力と回転速度(空げきとの関係)

度の軸方向分布状態を測定した。

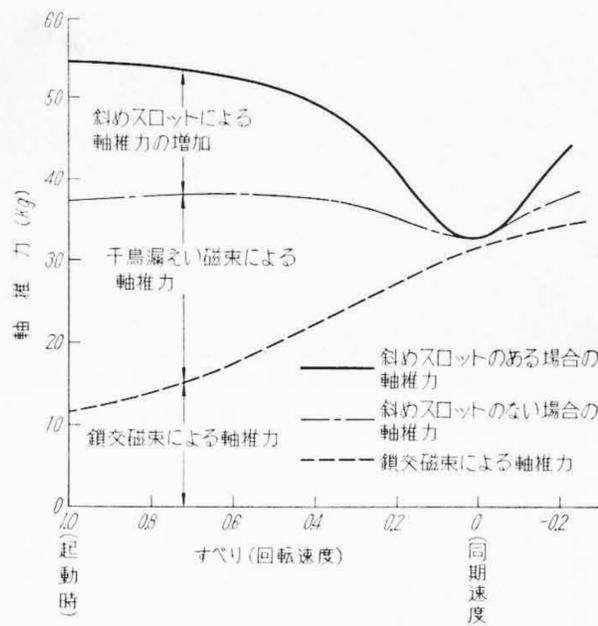
供試機の仕様は第1表のとおりであり、第9図はその分解写真である。周波数は50Hzについて実験した。

3.2 実験の結果と検討

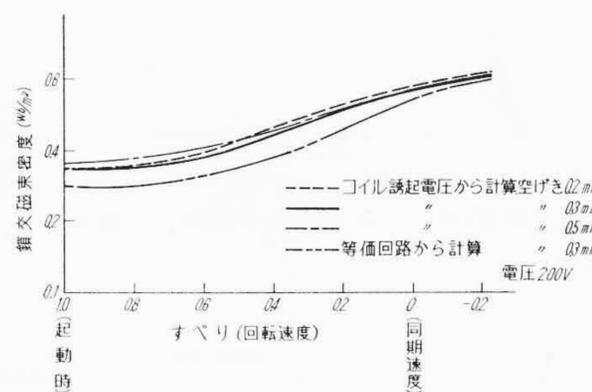
前節で述べたような測定法により、軸推力および推力に関する鎖交磁束、千鳥漏えい磁束、斜めスロットによる磁束密度の分布などを測定した結果について、以下各項目ごとに説明する。

3.2.1 軸推力の測定結果

前節のような装置によって、斜めスロットのない回転子と斜めスロットのある回転子(スロット以外は同一仕様)について回転数を変化させながら実測した例が第10図である。回転数、一次電流および鎖交磁束を測定するためのコイル誘起電圧も同時に記録してある。斜めスロットのない回転子についてこの軸推力を回転数との関係で示したものが第11図であり、斜めスロットのある回転子の場合が第12図である。また、すでに述べた理論により計算した結果が第13図である。第13図において鎖交磁束および千鳥漏えい磁束による軸推力を加えた鎖線は、斜めスロットのない場合の軸推力、すなわち第11図に対応し、さらに斜めスロットによる軸推力の増加を加えた実線は、斜めスロットのある場合の軸推力第12図に対応する。第11図と第12図の実測した軸推力特性曲線と第13図の計算値とを比較すると、斜めスロットのある場合もない場合も次のような諸点で一致していることがわ



第13図 軸推力の計算値



第14図 斜めスロットのない場合の鎖交磁束密度と回転速度

かる。

- (1) 起動時は同期速度時より軸推力が大きい。
- (2) 同期速度よりやや低い回転数で最低を示す。
- (3) 同期速度以上で軸推力が増加し、その増加率は大きい。

また第11、12図の実測値によれば

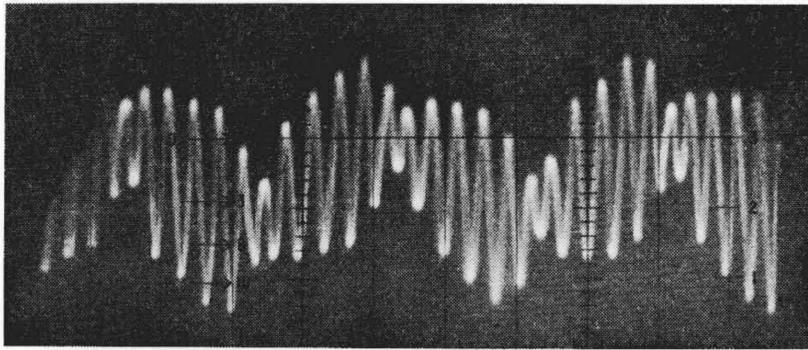
- (4) 軸推力の空げきの変化による影響は同期速度近辺では少ないが、起動時には大きく、空げきが増すと軸推力は減少する。
- (5) 斜めスロットのある場合はない場合より軸推力が大きい。

すなわち、(1)は起動時、鎖交磁束は少ないけれども千鳥漏えい磁束や斜めスロットの影響が大きいため軸推力が大きいのである、(2)および(3)は鎖交磁束が、同期速度以下で小さく、同期速度以上で大きいことと、千鳥漏えい磁束および斜めスロットの影響が同期速度に対してほぼ対称となっており、同期速度時に最低となっているからであると解される。また(4)の空げきとの関係は、三つの軸推力に関する要素のうち空げきにより大きく影響を受けるのは(2)式のように千鳥漏えい磁束のみであり、これは起動時には大きいので空げきの影響も大きく現われると解される。

以上のように円すい回転子電動機の軸推力は、鎖交磁束、千鳥漏えい磁束および斜めスロットによる鎖交磁束の分布の変化の三要素により発生するものと考えたと事実と一致することがわかる。以下さらにこれを確かめるため、各磁束およびその分布を実測した結果について述べる。

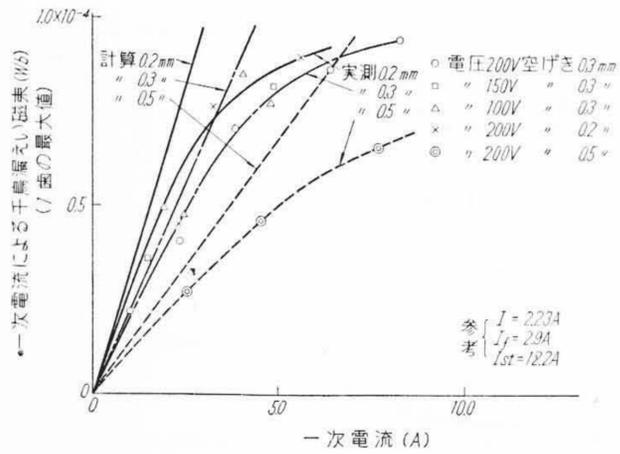
3.2.2 鎖交磁束

鎖交磁束を調べる目的で、固定子1極の回りにコイルを巻き付け、これに誘起される電圧を測定した。このコイルに誘起される電圧は鎖交磁束に比例した正弦波である。第14図は斜めスロットのない場合について測定した誘起電圧から鎖交磁束密度を計算

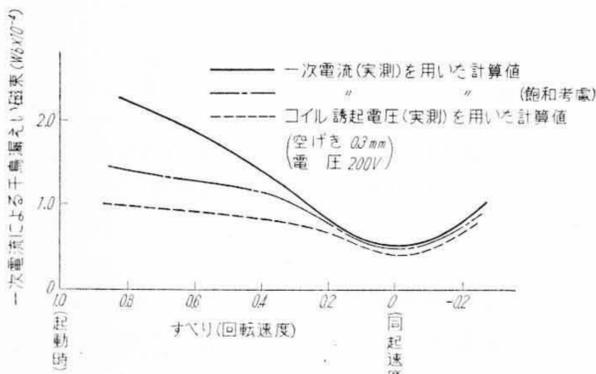


電圧 200 V, 空げき 0.3 mm, 回転数 970 rpm, 基本波 50~, 高調波 550~

第15図 固定子歯先の誘起電圧波形



第16図 一次電流と千鳥漏えい磁束



第17図 千鳥漏えい磁束と回転速度

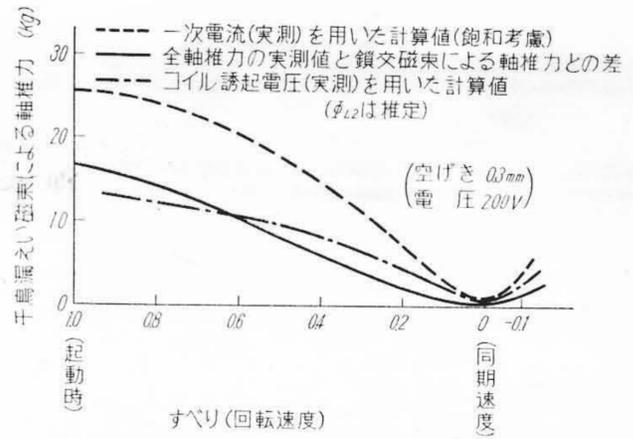
し、これを回転数との関係で示したものである。電動機の等価回路から計算した値も併記した。これによれば

- (1) 回転数が減ると鎖交磁束も減る。
これは回転数が減ると一次電流が増し、一次の電圧降下が大きくなって鎖交磁束が減るのである。
- (2) 空げきの変化により、鎖交磁束はほとんど影響を受けない。ただし空げきは、円すい状の回転子を軸方向に動かして変化させた。
- (3) 等価回路から計算した値は起動時にやや下回るがほぼ一致している。

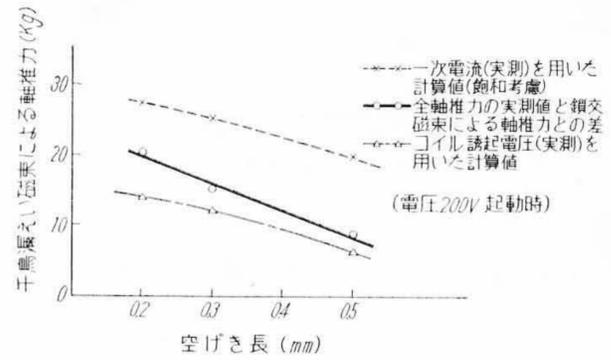
などがわかる。測定した磁束密度から軸推力を計算すると第13図の破線のように起動時には著しく低下することになる。しかし軸推力を実測すると第11図あるいは第12図のように起動時における大きな低下はみられない。このことから鎖交磁束以外に軸推力を発生する要因のあることが推察される。また同期速度時には、逆に軸推力の計算値は実測値(第11図)を上回っていることが注目される。

3.2.3 千鳥漏えい磁束

千鳥漏えい磁束を直接測定することは困難であるが、固定子の1歯の歯先に測定用のコイルを巻き、これに誘起される高調波電圧からその傾向をつかむことができる⁽⁶⁾。固定子の歯先を通る磁束は鎖交磁束と、一次および二次電流による千鳥漏えい磁束であるが、測定用コイルには第4図からもわかるように二次電流によ



第18図 千鳥漏えい磁束による軸推力



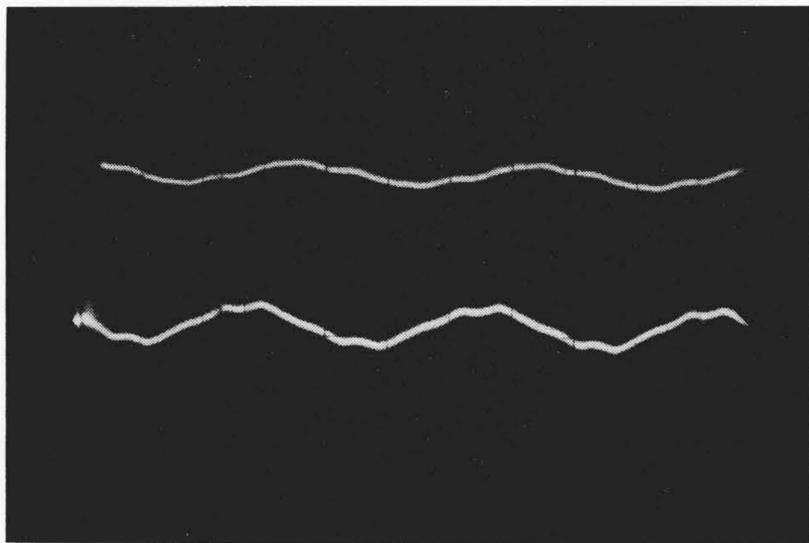
第19図 千鳥漏えい磁束による軸推力と空げきとの関係

る千鳥漏えい磁束の作用は現われない。結局コイルには鎖交磁束により誘起される50c/sの正弦波電圧と、一次電流によって生じた千鳥漏えい磁束による高調波電圧(回転子の歯が通過するたびに電圧が生ずる)の重なったものが観測される。千鳥漏えい磁束の波形は(2)式のように二次式であるので、これによって誘起される電圧は一次式となり、三角波に類似したものとなる。第15図は実測した波形であるが、高調波の波形はフリッジングなどにより三角の山がくずれて正弦波に近いものになっている。千鳥漏えい磁束は(2)式からもわかるように電流と空げき長のみの関数であり、回転数や電圧と直接関係はない。したがって、もしこれらの高調波電圧から求められる測定値が千鳥漏えい磁束であるなら回転数や電圧に無関係に(2)式の直線上に乗るはずである。第16図はこれを確かめるために、(2)式(磁束最大値)と測定された高調波を正弦波とみなして求めた磁束最大値を電流についてプロットしたものである。各測定点は電圧、速度に無関係に(2)式の近辺に存在しており、測定値が正しいことを示している。

この結果からわかることは、飽和の影響が強くでていることであり、定格電流付近ですでに飽和が始まっていることである。第17図はこの一次電流による千鳥漏えい磁束と回転数との関係を表わしたものであるが、千鳥漏えい磁束の実測値は計算値より多少少ない。第18図はこの磁束を軸推力に換算し、また斜めスロットのない場合の軸推力(実測値)から鎖交磁束による軸推力(修正値)を差し引いたものを千鳥漏えい磁束による軸推力の実測値として比較したものである。傾向的に皆一致しているが、計算値が大きい理由は、計算の過程において千鳥漏えい磁束が鎖交磁束の存在により飽和が増大することを無視しているからである。第19図は空げきとの関係を示したものである。

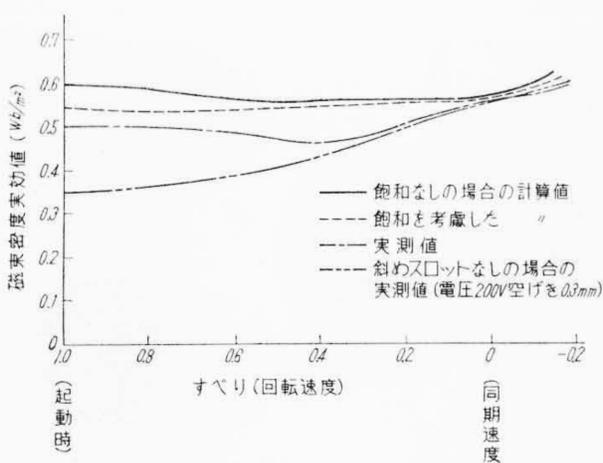
3.2.4 斜めスロットのある場合の鎖交磁束の分布

斜めスロットにより回転子の端面では一次電流と二次電流との位相関係が変化するため鎖交磁束密度が軸方向に変化する。この分布状態を実測するため、両端と中央にコイルをはり付けて誘起電圧を測定した。第20図は実測例であり、起動時に中央部および大径部(二次電流の遅れ側)のコイルに誘起された電圧波形である。無負荷時には波高、位相とも同一であったものが、起動時には大径部の位相が83度進んでいる。計算値の86度とよく一

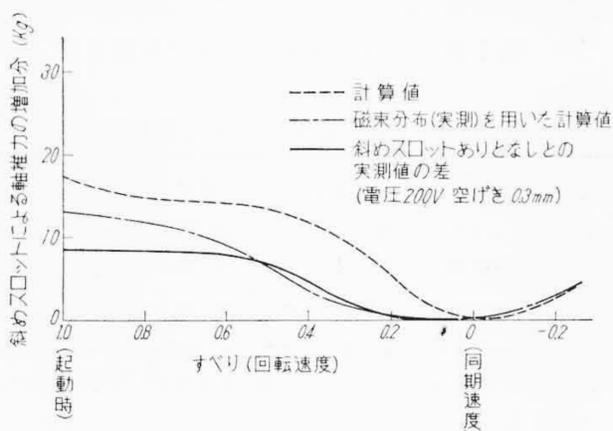


上: 中央部の磁束
下: 大径部(電流遅れ側端)の磁束
電圧 200 V, 空げき 0.3 mm, 起動時

第 20 図 斜めスロットのある場合の回転子両端面の磁束



第 21 図 斜めスロットによる磁束密度実効値の変化



第 22 図 斜めスロットによる軸推力の増加

致している。波高から磁束密度を計算し分布状態を調べた結果、測定点は計算で求めた磁束密度の曲線に対し、やや低目となっているが、よく一致している。第 21 図の一点鎖線は、このようにして測定した 3 点から分布曲線を描き、その実効値を各速度に対して求めたものである。第 22 図は斜めスロットによる軸推力の増加分の計算値、また前述の実測した磁束密度実効値を用いた計算値および斜めスロットのある場合とない場合の軸推力の差(実測値)などを回転数について示したものである。これらは同期速度で零となり、起動時および同期速度以上で大きくなる点で一致している。一方、量的な差のある原因としては、斜めスロットのある回転子とない回転子の固有の差および二つの測定値の差であるから、誤差の集積などが考えられる。

4. 結 言

円すい回転子電動機の軸推力について理論的に、また実験的に検討した結果、軸推力に関係する要因としては、従来取り扱われていた鎖交磁束のほかに千鳥漏えい磁束および斜めスロットによる鎖交磁束分布状態の変化に支配されていることが明らかとなった。まとめると下記のようなになる。

- (1) 鎖交磁束による軸推力(斜めスロットのない場合)
 - (a) 鎖交磁束による軸推力は起動時に最低となり、回転数の上昇とともに増加し、発電側で最大となる。
 - (b) 計算値は実測値と傾向的に一致し、量的にはやや上回る。
- (2) 千鳥漏えい磁束による軸推力
 - (a) 千鳥漏えい磁束による軸推力は同期速度以外の速度範囲で大きくなる。起動時には特に大きく、発生軸推力の大半を占める。
 - (b) 空げき長が増すと千鳥漏えい磁束による軸推力は減少する。
 - (c) 千鳥漏えい磁束は定格電流付近から飽和が起ころはじめる。起動時にはその飽和がはなはだしいため、(2)式の半分程度となる。したがって千鳥漏えい磁束による軸推力の算定にはこの飽和の影響を十分考慮する必要がある。
 - (d) 導体に鎖交する千鳥漏えい磁束量としてはかなり小さく、起動時でも鎖交磁束の10分の1以下であるが、空げきを縫って何度も往復し、また局部的に集中して通るため、磁束密度の実効値としては大きくなる。
- (3) 斜めスロットによる影響
 - (a) スキューすることにより、空げきの鎖交磁束密度はその影響を受ける。特に起動時には回転子の両端で著しく高くなる。その結果磁束密度の実効値は増し、軸推力は増加する。
 - (b) 斜めスロットによる軸推力の増加量は、同期速度では零であり、そのほかの速度範囲で大きくなり、起動時には最大となる。
 - (c) 空げき長の変化による影響はほとんどない。飽和による影響も少ない。
 - (d) 千鳥漏えい磁束は設計的にほとんど変えることができないが、斜めスロット角を調節することにより、軸推力特性はある程度調節ができる。

なお起動時の過渡的な現象、鉄心中の渦電流による影響、鋳込回転子の場合の現象、あるいは千鳥漏えい磁束の飽和計算の簡便化などの問題が残されているが、今後これらについても検討したいと考えている。

最後に本研究に終始ご指導ご協力いただいた関係各位にお礼申し上げます。

参 考 文 献

- (1) 足立良夫: 電気三学会連合大会講演論文集 273 (昭 29)
- (2) 江森三郎: 電気 3 学会支部連合大会講演論文集 277 (昭 29)
- (3) 古賀健一郎: 電気学会雑誌 73(2), 841 (昭 28-8)
- (4) 石黒敏郎: 電気学会雑誌 63, 165 (昭 18-2)
- (5) C. E. Linkons: A. I. E. E. Transaction III, 74, 760 (Aug. 1955)
- (6) 山村昌: 電気学会雑誌 74(上), 540 (昭 29-5)