

# 回転子に永久磁石を用いた小形モータ

## Small-Size Motor with Permanent Magnet Used on Rotor

池上 和一\*  
Kazutoshi Ikegami

### 内 容 梗 概

永久磁石をロータとした小形モータについて主としてトランジスタを用いたものにつき各種の実例をあげてその動作原理を述べ、永久磁石をロータとしたときの諸問題につき検討を加え、設計上の注意などについて記した。

### 1. 緒 言

永久磁石を回転機に応用したものに、マグネトー、自転車ランプなどの発電機が最も古くから知られているが、電動機に応用されたのはオモチャを除いてはあまり見受けられなかった。従来は、時計用、電池式カミソリなどのきわめて小形のものに利用されていたが、最近ではテープレコーダー、8ミリカメラ、ポータブルレコードプレーヤーなどにマイクロモータはきわめて多量に用いられるようになった。しかし、いずれもきわめて小出力のものばかりである。ごく最近に至って数10Wのものが作られ始めたが、その理由は、磁石の性能の向上により励磁の必要がなくなったため効率が向上したことで、価格低廉なためである。

これらのモータは固定界磁として永久磁石を用いたものばかりで、これらモータに応用する場合の設計法、または、問題点についてはすでに多数の文献があるので、改めて述べる必要はないと思うが、回転子に永久磁石を用いた場合について、記述する。

### 2. 永久磁石回転子形モータ

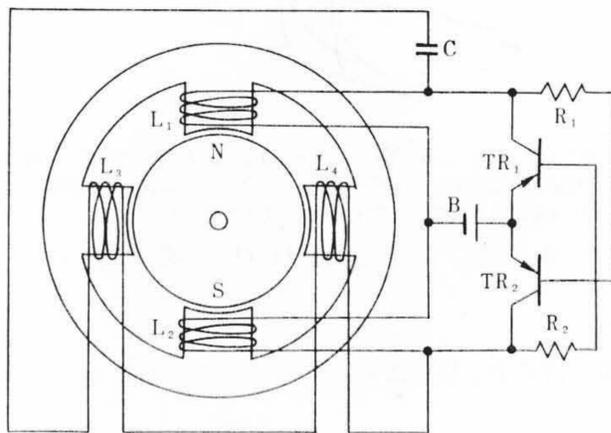
この種モータには大別して二つの形式がある。

一つは同期電動機形で、小形交流モータとしては、誘導電動機より効率がよい。しかし回転速度が一定で電源の周波数がきまると速度を連続的に変えられないし、起動トルクを大きくできない欠点がある。また、最近自動車または電池などを用いた移動用としては、交流電源がないので直接利用できない。そこで、トランジスタによるインバータで交流を発生させる方法が考えられた。

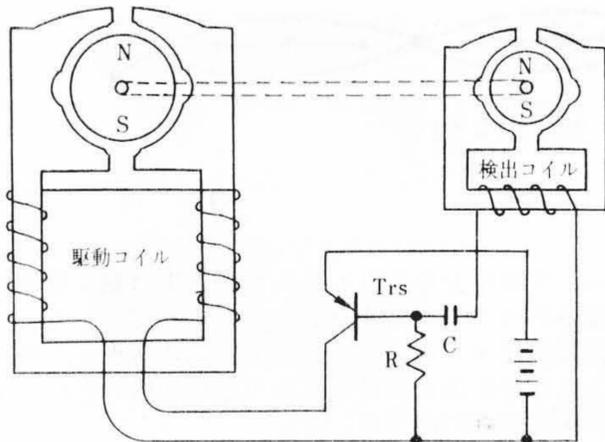
第1図はインバータ形トランジスタモータで、2個のトランジスタ  $TR_1$ ,  $TR_2$  によりプッシュプル発振器を形成しており、電機子は発振器の変圧器の代わりをする。 $L_1$ ,  $L_2$  はコレクタに接続されたインダクタンスで、これにトランジスタのコレクタ電流が流れると誘起起電力がコイルの両端に発生し、それぞれ反対側のトランジスタのベースに帰還されて発振する。 $C$  は進相コンデンサで、回転磁界を発生させる。起動時は電機子鉄心の飽和によるロイヤル発振器として飽和特性によって定まる低周波発振周波数の交流磁界が発生するが、永久磁石回転子が回転を始めると発振周波数は回転子の回転に同期するので、負荷による回転数がある程度変化しても同期はずれることはない。

このモータは、慣性の小さいロータでは起動できるが、大形のものでは起動が困難である。この起動の問題を解決するため種々の工夫がなされている<sup>(1)</sup>。回転子に永久磁石を用いず普通の誘導電動機の回転子を用いたものは効率が悪いが起動が容易なので、アメリカ<sup>(2)</sup>などで実用化されはじめた。

もう一つの形式は、分巻電動機としての回転界磁形モータである。電機子を固定子とし、ロータを永久磁石とすれば、ロータに電力を



第1図 インバータ形トランジスタモータ



第2図 動起動形トランジスタモータ

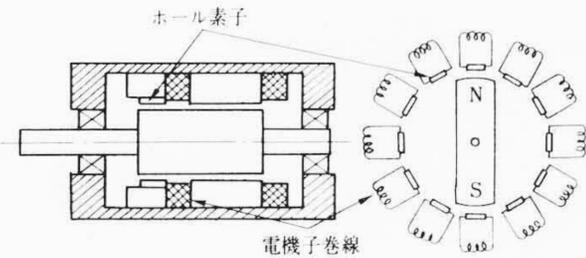
供給する必要がないので、刷子やスリップリングをなくし、無刷子化することができる。このモータの無刷子化ということは重要な意義をもつ。

まず、火花がまったくなくなり、そのため火花による有害な電磁波の発生がなくなる。これは、エレクトロニクス応用機器には、しばしば要求される。また、火花による引火、またはカーボン、金属粉末の発生なども、それぞれの用途に有害な場合があろう。機械的な接触、摩擦は刷子整流子の摩擦をきたし、やがてモータの寿命を決定する最大の要因となる。

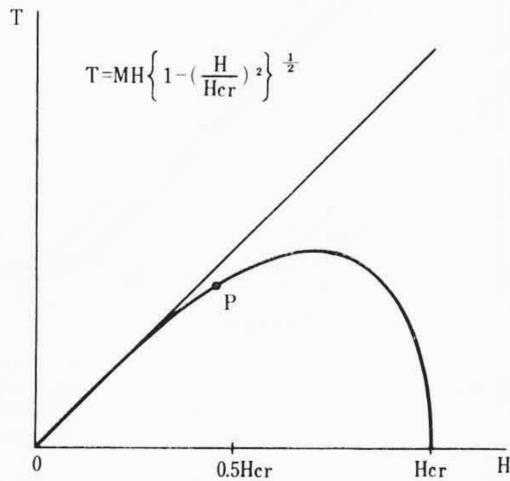
刷子電動機の整流作用を無接触で行なう方法については、トランジスタの発明により、フランスの LEON HATOT 社<sup>(3)</sup>や、川原田政太郎氏<sup>(4)</sup>により、1953~1955年ごろより開発が行なわれ始めた。その原理を第2図により簡単に説明すると、回転子に永久磁石を用い、この軸に取り付けられたもう一つの永久磁石が回転することにより、そのまわりにある検出コイルに発生した起電力がトランジスタをスイッチングし、はじめの回転を助けるような駆動電流を電機子に流すことによりモータが回転する。

このような誘起起電力による整流作用は起動時には行なわれないので起動しないから内燃機関と同様に始動装置が必要である。これ

\* 日立製作所中央研究所



第3図 ホール素子モータ



第6図 磁界とトルクの関係  
(トルクは任意スケール)

を解決するため第3図のホール素子モータ<sup>(5)(6)</sup>や、第4図の高周波検出モータ<sup>(7)(8)</sup>、第5図の光スイッチングモータ<sup>(9)(10)</sup>が考えられた。

これらのモータには、ほとんど永久磁石回転子が使用される。そこで回転子としての磁石に要求される特性について、次に述べることとする。

### 3. 永久磁石ロータの特性

電磁石の代わりに永久磁石をモータに用いたとき、最も注意を要する点は、過大電流が電機子に流れた場合であろう。同期電動機においては交流なので、電圧が過大にならなければそれほど問題とはならない。起動の際も何らかの起動法が講ぜられているから、過大電流は流れない。しかし分巻電動機においては、端子電圧と回転数との関係は、 $V$ : 外部端子電圧 (V),  $I_a$ : 電機子電流 (A),  $r_a$ : 電機子抵抗 ( $\Omega$ ),  $\Phi$ : 1極当たりの磁束 (wb) としたとき、回転数 (rpm)  $N$  は

$$N = K \frac{V - I_a r_a}{\Phi}$$

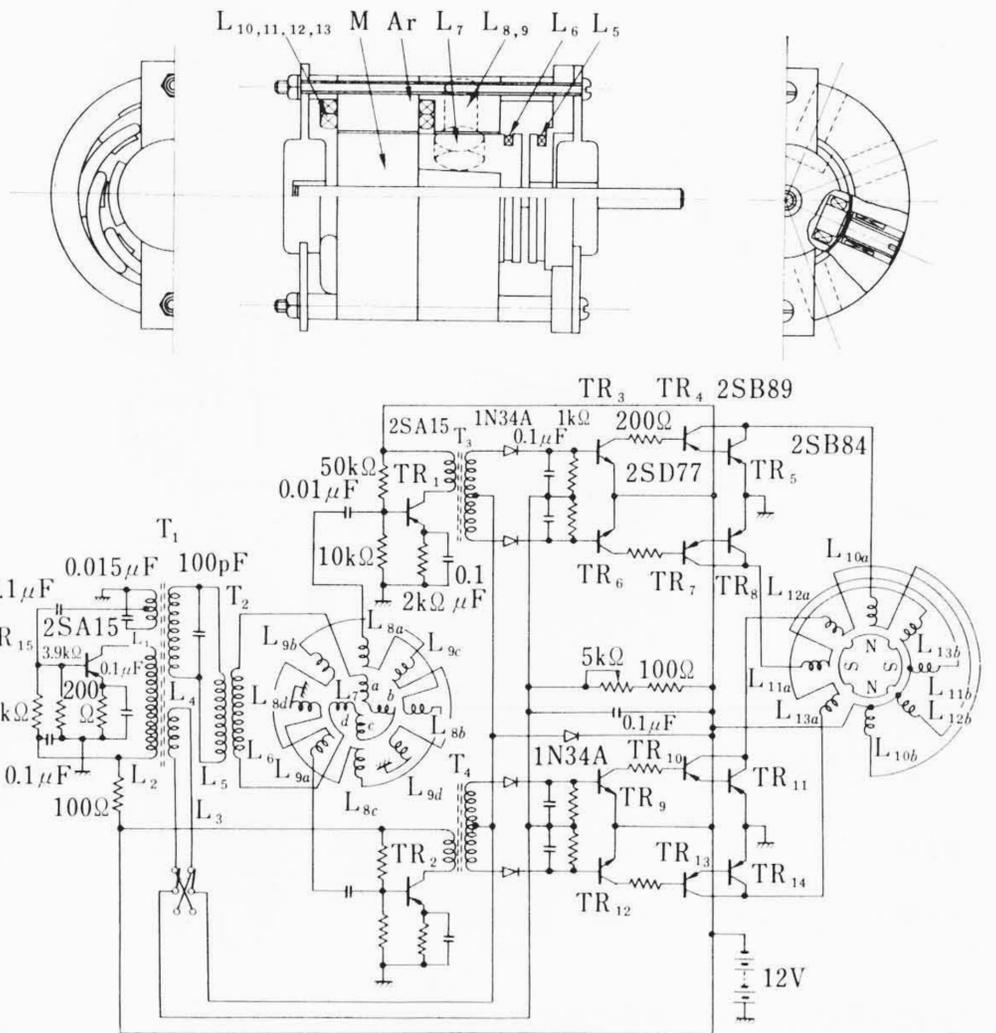
一般に  $V \gg I_a r_a$  であるから

$$N = K \frac{V}{\Phi}$$

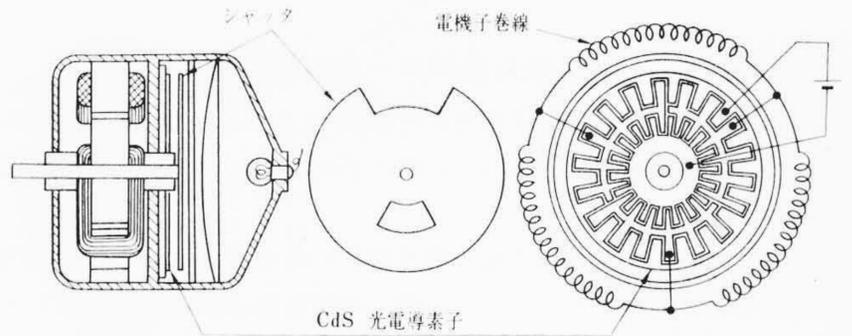
となり、回転数は印加電圧に比例する。

それゆえ、この形のモータにおいては直巻電動機の場合と異なり、電圧印加と同時にその電圧の速度に達するように慣性にさからって過大電流が流れる。この過大電流は、永久磁石を減磁させるとともに磁極の移動を起こさせ、無負荷回転数が上昇し、遂にはモータとして使用できなくなる。この過大電流を防止するための起動抵抗が必要となる。

また、過負荷の際もまったく同様で、負荷の大小は回転数には無関係で電機子電流のみに関係するから、前述同様の過大電流が永久磁石を減磁して失速させる。この場合の失速とは回転が止まるばかりでなく、トルクがほとんどなくなることで、電動機の焼損、またはスイッチング半導体素子の破損をきたすきわめて危険な状態を意



第4図 高周波検出モータ

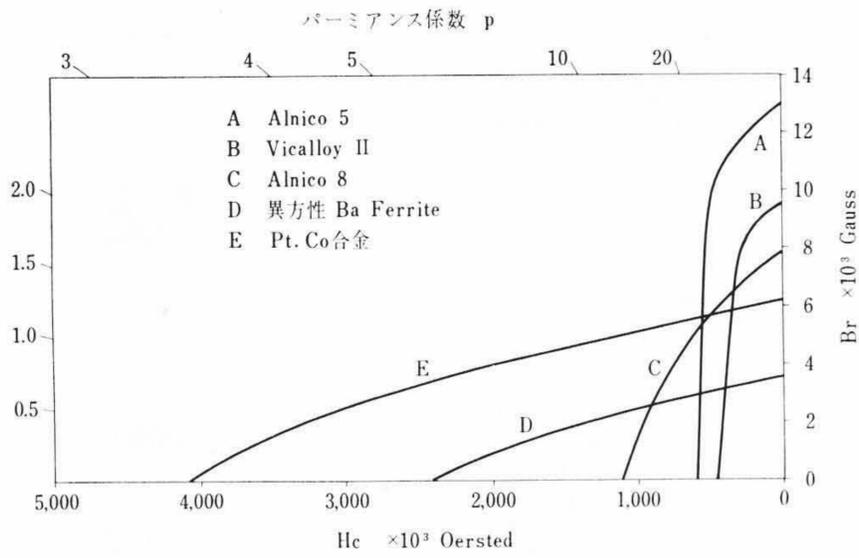


第5図 光電素子を用いたモータ

味する。

このような危険からモータを保護するために磁石に要求される特性を第6図<sup>(12)</sup>について説明する。

図は電機子電流による磁界の強さと、永久磁石に働くトルクとの関係を示すもので、曲線上の点Pまではなんら問題はないが、P点をこえると電機子電流による磁化が永久磁石の磁化を移動させるので、このような動作範囲にはいるとトルクは減少し再びもとに戻らなくなる。実用上、P点は0.4~0.5 Hcr. に設定するのが通常である。この Hcr. は、球、または円筒状磁石においては、減磁曲線の Hc に等しいが棒状、または磁化と直角方向にえぐられた第9図(c)(d)のような形状の場合は Hc より大きな値となる。減磁曲線における Hc が大きくなれば、動作範囲は広がるので Bm とともに Hc が大であることが望ましい。回転子に永久磁石を用いた場合、Hc の小さい鑄造磁石の場合は、その形状に円筒状は適さない。またその形状を工夫しても過負荷に対して前述の失速の危険がある。これらの特性のうち、モータに最も適したものとしては、第7図に見られるように減磁曲線が急に降下しないようなもの、すなわち、白金コバルト磁石ということになるが、価格の点では他の磁石と比べて問題とならないほど高価である。したがって、バリウムフェライトが用いられることになろう。この場合は磁束密度はアルニコな



第7図 磁性材料の減磁曲線

第1表 強度計算式の例

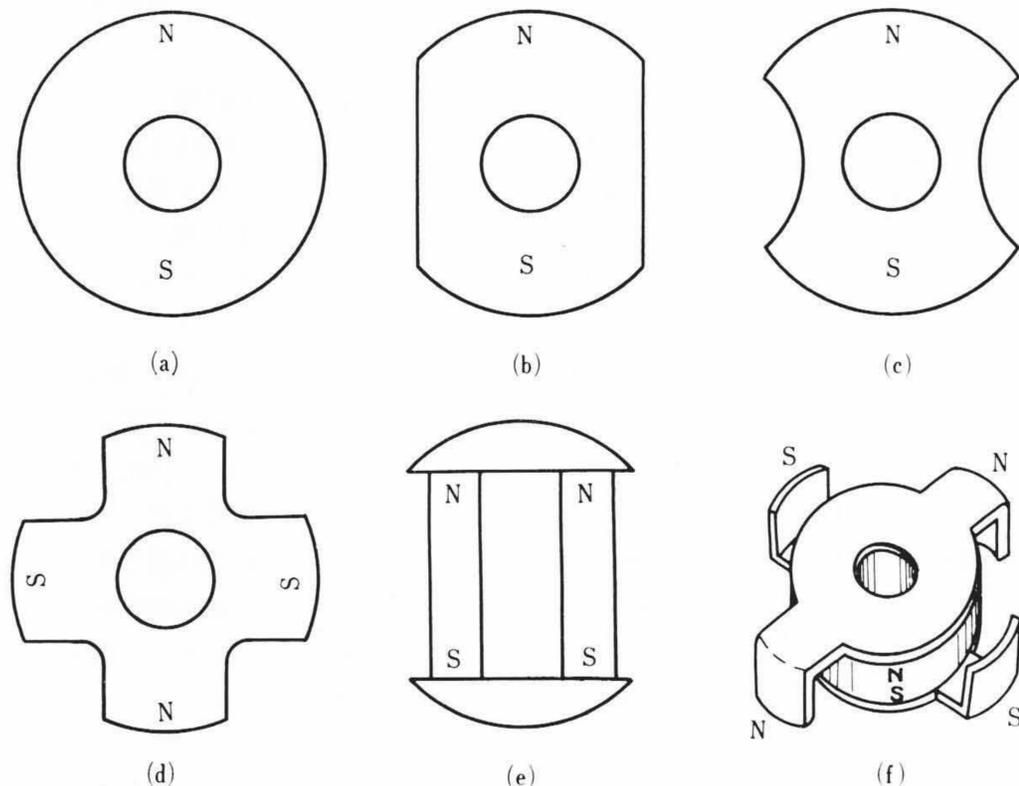
	$\gamma$ [kg/cm <sup>3</sup> ]	$\sigma_0$ [kg/cm <sup>2</sup> ]	$N_c$ (rpm) $\times 10^4$			
			$\alpha$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{3}$	0
YBM-3	$5.0 \times 10^{-3}$	30	$\frac{4.01}{b\sqrt{1+\alpha+\alpha^2}}$	$\frac{3.03}{b}$	$\frac{3.34}{b}$	$\frac{4.01}{b}$
YCM-2	$7.5 \times 10^{-3}$	1,000	$\frac{18.9}{b\sqrt{1+\alpha+\alpha^2}}$	$\frac{14.3}{b}$	$\frac{15.7}{b}$	$\frac{18.9}{b}$

どに比べ半分ほどなので効率は望めないが高速回転に適する。バリウムフェライトはまた絶縁体なので、うず電流損はまったくなく、この点からも高速回転に有利である。しかし強度の点に問題がある。そこで、回転数はどれだけ上げられるかを次章に述べることにする。

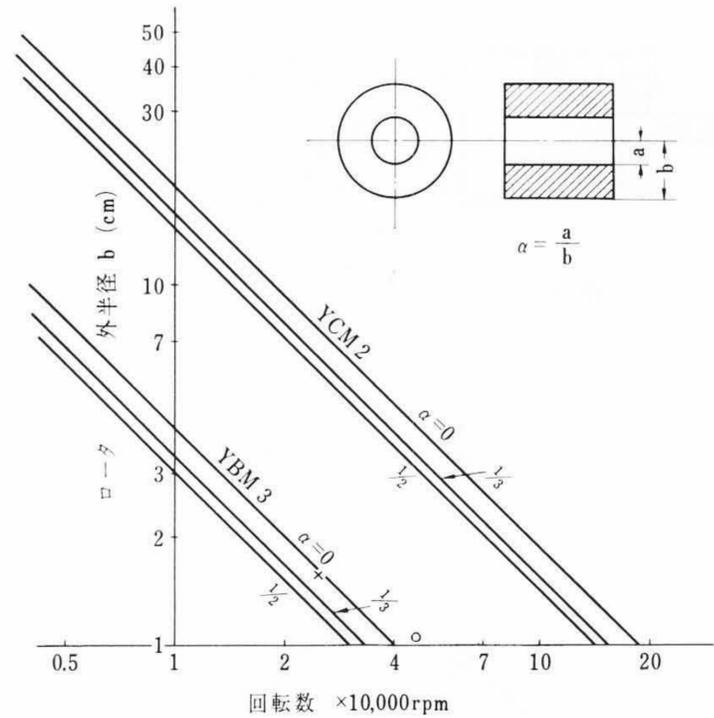
#### 4. 永久磁石ロータの強度

ロータの強度は形状によりそれぞれ計算されなければならないが、ここでは高速回転用として、特にバリウムフェライトを使用した場合について考える。

この種の磁石は、着磁方向の長さをきわめて小さくできるため円筒状のまま使用できるからこの最も単純な形状を取り上げることにする。第9図(a)のような円筒形物体の回転による半径  $r$  における半径方向、および接線方向応力を、それぞれ  $\sigma_r, \sigma_t$  とすれば次のように表わされる。



第9図 ロータの形状



第8図 破壊値グラフ

$$\sigma_r = \frac{3+\mu}{8g} \gamma \omega^2 \left( a^2 + b^2 - r^2 - \frac{a^2 b^2}{r^2} \right)$$

$$\sigma_t = \frac{3+\mu}{8g} \gamma \omega^2 \left( a^2 + b^2 - \frac{1+3\mu}{3+\mu} r^2 + \frac{a^2 b^2}{r^2} \right)$$

- ここで、
- $\gamma$ : 単位体積の重量 (kg/cm<sup>3</sup>)
  - $a$ : 内半径 (cm)
  - $b$ : 外半径 (cm)
  - $\mu$ : ホアソン比
  - $\omega$ : 回転角速度 (rad/s)
  - $g$ : 重力の加速度 (cm/s<sup>2</sup>)

また、その最大値をそれぞれ  $\sigma_{r \max}, \sigma_{t \max}$  とすれば、最大値はおのおの  $r = \sqrt{ab}$ ,  $r = a$  の点で与えられ、 $\sigma_{t \max} > \sigma_{r \max}$  なので  $\sigma_{t \max}$  の点で破壊されると従来いわれてきた。しかし最近バリウムフェライトのようなもろい材料の破壊に対しては Grammel の提唱した平均応力説<sup>(11)</sup>を引用したほうが適当であろう。すなわち、接線方向の応力の平均値が材料の引張強さに等しくなったとき、円筒の破壊が生ずるものと考え、平均応力を  $\sigma_{\text{mean}}$  とすれば

$$\sigma_{\text{mean}} = \frac{1}{b-a} \int_a^b \sigma_t dr = \frac{\gamma \omega^2 b^2}{3g} (1 + \alpha + \alpha^2)$$

ただし、 $\alpha = a/b$ 、回転数を  $N$  (rpm) とおくと  $\omega = 2\pi N / 60$  であるから、引張強さを  $\sigma_0$  とし、 $\sigma_0 = \sigma_{\text{mean}}$  なる回転数を  $N_c$  とすれば、これがこの材料の円筒を回転したときの破壊回転数となる。

$$N_c = \frac{30}{\pi b} \sqrt{\frac{3g \sigma_0}{\gamma(1 + \alpha + \alpha^2)}}$$

ここで、フェライト磁石 YBM-3 と、铸造磁石 YCM-2 の場合について計算すると第1表のようになり、これをグラフに示すと第8図のようになる。

図中○印はバリウムフェライトロータで実際に回転させた例であり、×印は実際に破壊した例を示す。

以上述べたことから、バリウムフェライトロータは誘導電動機のロータに比べ、構造は簡単であるが機械的強度が弱いので、径を小さく軸方向に長く設計しなければならない。

#### 5. 永久磁石ロータの形状

ロータの形状は、バリウムフェライトのような磁化方

向の長さが短くてよいものと、アルニコなどのように長くしなければならない場合があり、種々な形状が考えられる。

バリウムフェライトはほとんど第9図(a)のような円筒形であり、ときには円筒の磁極と直角方向をそりおとした形状(b)のものが見られるが、アルニコの場合はこれをもっとくぼませた形(c)(d)などが望ましい。異方性の磁石を作る場合、作りやすい軸並行に着磁しヨークを付けたもの(f)がアルニコ、バリウムフェライト両者に見られる。

この一例を第10図のトランジスタモータに示す。

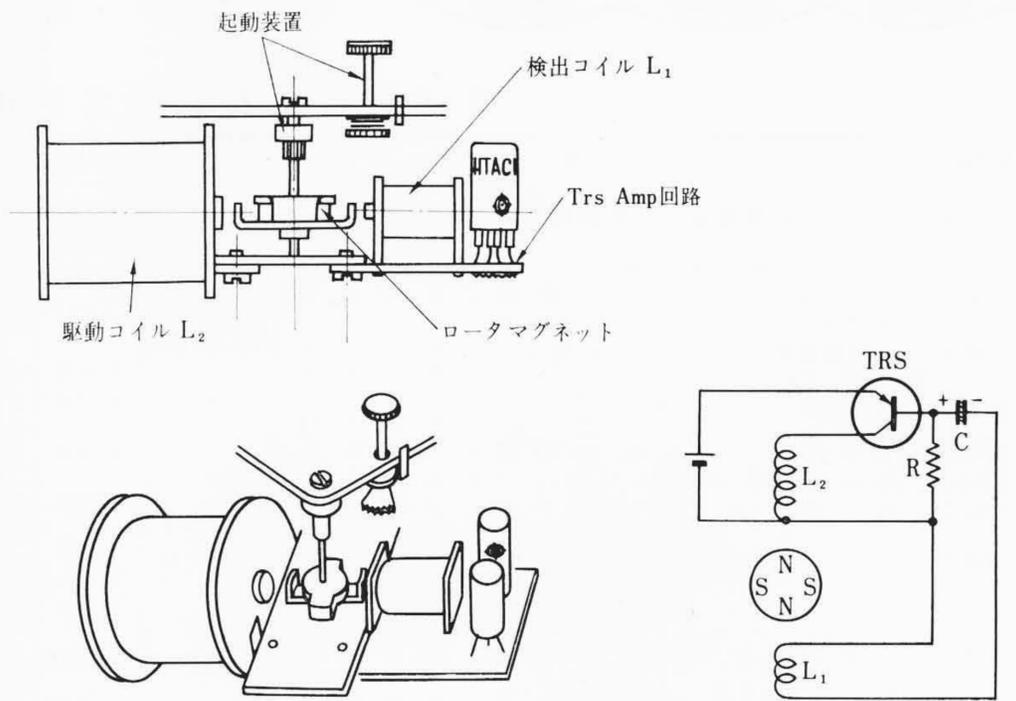
6. 結 言

モータの無刷子化のために永久磁石回転子を用いる方法は、トランジスタの発達とともに交流、直流を問わずますます発展するであろう。トランジスタは次第に耐圧の高いものが作られるようになってきたので、この種モータの能率を高めることになり、さらに大形のものを作るのにきわめて有望である。永久磁石も新しい材料が開発されつつあるので近い将来、まったく変わった新しいモータが身近に出現することになろう。

終わりに、フェライトマグネットの強度、および永久磁石の特性について示唆をいただいた中央研究所藤江、三上両ユニットリーダーに感謝の意を表す。

参 考 文 献

(1) 木村, 米光, 小林: National Technical Report p. 291, 7. 3. (昭 36-9)  
 (2) John R. Riggo: ELECTRO-TECHNOLOGY p. 118 (APRIL 1963)



第10図 時計用トランジスタモータ

(3) エドアルト・ディーチュ: 特許公報 (昭 31-6288)  
 (4) 川原田: 特許公報 (昭 32-9820)  
 (5) ELECTRONICS APRIL 6, 1962 p. 60-61 Brushless D-C Motor Uses Hall-Effect Devices.  
 (6) 武安, 沼倉, 大島, 上村: 電学連合大会 880 (昭 40-4)  
 (7) 池上: 電学東海支部連合大会 s-3-6 (昭 38-10)  
 (8) 池上: 電子工業 p. 49 (昭 38-10)  
 (9) 伴: 特許公報 (昭 38-5904)  
 (10) Philip A. Studer: NASA TECHNICAL NOTE D-2108 (FEBRUARY 1964)  
 (11) 機械設計(下) 日本機械学会機械要素部門委員会編  
 (12) G. Robinson: Preprint Vol. 1, 36.1, International Conference on Magnetism and Crystallography (1961)



特許 第421327号

特 許 の 紹 介



宮 崎 健・竹 内 久 祐

銅系溶浸材を含浸せしめた鉄系焼結体の製造方法

一般に、鉄多孔質焼結体に銅および銅合金をそれら金属の溶融点以上で溶浸を行なって、すなわち毛細管現象によって焼結体の空孔を埋め、完全にち密な複合金を作る方法が工業的に実施されている。

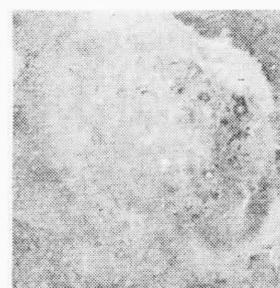
この方法を採用することによって、鉄焼結体のみでは引張り強さがたかだか 20~25 kg/mm<sup>2</sup> 程度で、伸び 1% 以下のものしか得られなかったのを、引張り強さ 40~45 kg/mm<sup>2</sup>、伸び 5% 以上の強じんな材料を得ることができる。

しかし従来のものにおいては、溶浸材すなわち銅または銅合金が溶浸後焼結体の表面に付着し（これを一般に残さいという）容易にはく離せず、これがため仕上に非常に工数を必要とするばかりか、焼結体表面肌を悪くする欠点があった。

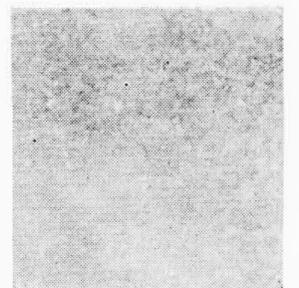
本発明は、上記欠点を解除し、かつまた引張り強度のすぐれたものを得ようとするもので、溶浸材の銅または銅合金中に 0.1~5% のアルミニウムを添加したものである。

ここでアルミニウム 0.1~5% としたのは、0.1% 以下ではその効果少なく、他方 5% 以上では伸びが 5% 以下と著しく低下するためである。

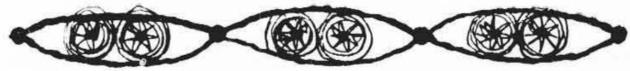
本発明によれば、残さいはく離は、ただ単に焼結体の表面の付着物を手でかき取る程度の作業で済み、このことは、アルミニウムを添加したものは非常にはく離作業が容易であることを示す。また図の比較（第1図は従来、第2図は本発明のもの）からも明らかなように、本発明になるものは、残さいはく離後の焼結体表面が非常に美しい。また引張り強さを、アルミニウム 2% 添加では 52 kg/mm<sup>2</sup>、3% では 55 kg/mm<sup>2</sup>、5% では 60 kg/mm<sup>2</sup> と著しく向上することができる。（郷古）



第1図



第2図



最近登録された日立製作所の特許

特許番号	名 称	氏 名	特許登録日	特許番号	名 称	氏 名	特許登録日
314629	アナログ計算機積分回路制御装置	三河浦武雄	39. 4. 15	426228	無 刷 子 直 流 電 動 機	池 上 和 一	39. 6. 22
314630	符 号 板 変 換 装 置	小沢重樹	"	426229	潜 弧 溶 接 用 溶 接 剤	一 景 久 見	"
314631	テ レ ビ ジ ョ ン 受 信 装 置	北村貞夫	"	426230	ターボ冷凍機の抽気ポンプ自動運転装置	和 俊 将 和	"
314632	高入力インピーダンス増幅器	村田尚順	"	426231	磁性金属薄膜の蒸着方法	瀨 賀 木 川 窪	"
314633	二回路重畳パラメトロン励振方式	辺田善一	"	426232	イ ン チ ン グ 装 置	北 村 一 俊	"
314634	多 点 記 録 方 式	横井井木	"	426233	ミリ波帯非可逆素子(イ)	江 大 尻 洋 司	"
314635	上下限リミット整定装置	河野小徳	"	426234	ミリ波帯可逆素子	江 大 尻 洋 司	"
414636	非対称マルチパイプレータ	近藤高橋	"	426235	ミリ波帯可逆素子	江 大 尻 洋 司	"
314637	角 変 位 変 換 器	高伴高佐徳	"	426236	ポ イ ラ 装 置	大 岸 秀 樹	"
314834	トランジスタ回路の温度特性補償装置	佐藤山田	39. 5. 12	426237	X線断層撮影用カセット送り装置	伊 大 盛 弘	"
314835	直進型超高周波用電子管	中村純之助	"	426238	パイプ組合せ部品の自動送入送出及び検測装置	伊 大 盛 弘	"
314836	電 場 発 光 変 調 方 式	中守徳永	"	426239	照 明 方 式	松 村 和 男	"
314837	原 子 炉 燃 料 要 素	守徳永	"	426240	セレンアレスタ破壊検出装置	松 村 和 男	"
314838	能動素子によるジャイレータ構成方法	徳永迪夫	"	426241	荷電粒子線照射装置	前 木 高 二 浩	"
314839	非相反型両方向増幅器	中藤浩行	"	426242	自動グリース給油装置	高 山 橋 保 吉	"
314840	多段式時分割交換機に於ける接続方式	中野純之助	"	425527	格子制御放電管の作動方式	友 友 貞 夫	39. 6. 4
314951	エレクトロルミネセンス発光板の製作方法	中野純之助	39. 6. 5	425528	自動追従型放射線液面計	友 友 貞 夫	"
314971	自 動 車 駐 車 装 置	加藤清次郎	"	425529	旋 回 ク レ ー ン の ポ ー タ ル	山 崎 嘉 一 堅	39. 4. 15
314972	自 動 車 駐 車 装 置	加藤清次郎	"	423580	微い工作機械のテーブル送り装置	佐 友 齋 陸 仁	"
314973	自動直通セルフラップ式ブレーキ弁	田上八十次	"	423581	行 印 刷 方 式	北 江 千 徳	"
314974	ス ケ ル チ 装 置	鈴木虎雄	"	423582	電子線に依る熔接熔融或は穿孔等の加工装置	江 片 桐 信 二 郎	"
314975	速 度 変 調 管	竹本猛夫	"	423583	多孔マスク型カラーテレビジョン受像管	片 桐 村 博 一 夫	"
314976	自 動 制 御 系	後藤水勝	"	423584	ワイヤを用いた測長装置	戸 根 木 光 次	"
315098	変 圧 器 差 動 保 護 継 電 装 置	清外小岡大内	39. 6. 19	423585	流 量 変 換 器	西 原 藤 村 一 功	"
315099	セ グ メ ン ト 軸 受	真岡藤久	"	423586	夜間単独呼出機能を有する大群PBX装置	近 木 尚 慮	"
315100	発光面の発光曲線追跡方式	真岡藤久	39. 6. 4	423587	超 多 点 打 点 記 録 方 法	木 村 健 夫	"
425530	トラクタ等の操縦装置	藤内島秀	"	423588	平板結晶を用いたX線分光器の波長直示装置	岡 野 健 夫	"
425531	半 導 体 装 置 電 極 用 合 金	宮川久司	"	423589	警 報 装 置	田 村 秋 雄	"
425532	微細黒鉛組織を有する鋳鉄鋳物を製造する方法	柳井村山	"	423590	破壊書込みを行なう正帰還二安定装置	中 喜 三 郎	"
425533	車 輛 用 電 動 発 電 機 装 置	高森村山	"	423591	半 導 体 処 理 方 法	中 喜 三 郎	"
425534	ベータートロンのX線、電子線切換装置	森村早一	"	423592	発 信 番 号 の 検 出 装 置	吾 妻 敏 一	"
425535	荷 電 粒 子 線 装 置	池田上村	"	423593	感 熱 器	桃 井 川 一 郎	"
425536	静 電 塗 着 法	池田上村	"	423594	半 導 体 装 置 作 用 治 具	木 吉 信 一 郎	"
425537	自動電圧調整機の過調整時に於ける停止装置	松村山木	"	423595	直 流 電 磁 石 の 励 磁 装 置	吉 坂 青 雄	"
425538	変 流 器	村茂一	"	423596	巻 上 機 用 無 衝 撃 制 動 装 置	石 富 治 坦	"
425539	変 電 機 電 圧 調 整 装 置	辻原上柄	"	423597	巻 上 機 用 制 動 装 置	富 渡 部 井 英 直	"
425540	電 気 集 塵 方 法	井真鈴	"	423598	電 気 端 子 の 半 田 付 方 法	渡 長 井 内 仁 博	"
425541	ベ ル ト 型 静 電 起 電 機	武金前沢	"	423599	ド ラ ム 型 フ ラ ン グ シ ャ ー	石 横 河 外 高 青 永	"
425542	荷 電 粒 子 加 速 装 置	前沢木崎	"	423600	自 動 車 用 座 席 位 置 調 整 装 置	青 永 亦 依 管	"
425543	軌 框 敷 設 車 法	山古高片上	"	423601	ト ラ ン ジ ス タ 定 電 流 回 路	田 鈴 上 田 古 上 中	39. 4. 17
425544	電 子 線 加 工	古高片上	"	423602	粒子加速装置におけるエネルギー並びにビーム強度の指示装置	田 古 上 中 横 外 芹 乾	"
426218	デ ィ ジ タ ル - ア ナ ログ 変 換 器	三岩内齋	39. 6. 22	423603	半 導 体 単 結 晶 の 検 査 方 法	又 内 木 田 内 寺 田 山 内 山 田	"
426219	車 輪 荷 重 調 整 装 置	齋藤村橋	"	423604	結晶回路構体およびその製造方法	田 古 上 中 横 外 芹 乾	"
426220	車 可 変 プ ロ グ ラ ム 装 置	小島松植	"	423605	自 動 車 の ラ イ ト 切 換 装 置	田 古 上 中 横 外 芹 乾	"
426221	液 面 計	原松野善	"	423606	ヘ ッ ド ラ イ ト の 自 動 切 換 装 置	田 古 上 中 横 外 芹 乾	"
426222	電 磁 流 量 計	仲野野村	"	423607	保 護 装 置 を 具 え た 半 導 体 装 置	田 古 上 中 横 外 芹 乾	"
426223	空 気 遮 断 器 操 作 装 置	仲野野村	"	423608	電 子 顕 微 鏡 等 の 試 料 微 動 装 置	田 古 上 中 横 外 芹 乾	"
426224	空 気 遮 断 器 の 開 閉 操 作 弁 装 置	仲野野村	"	423609	ラ イ ト の 自 動 切 換 装 置	田 古 上 中 横 外 芹 乾	"
426225	磁 界 型 電 子 顕 微 鏡	米納野	"				
426226	実 験 用 原 子 炉	甲和牧	"				
426227	原 子 燃 料 棒 の 製 造 法	甲和牧	"				