

# エンジン直結形ブラシレスACジェネレータ

Direct-Coupling Type Brush-less AC Generators

蓑 輪 勉\* 立 見 栄 男\*  
Tutomu Minowa Hideo Tatumi

In conventional AC generators for automobile use exciting current is supplied to a field coil through brushes and slip rings, and the field coil is wound in the generator rotor. The new type AC generator employs a special magnetic circuit and the field coil is installed independent of the rotor. This construction has dispensed with the need of brushes and slip rings. Also, the rotor is so designed that it can withstand high angular acceleration; therefore, it can be coupled to the engine crankshaft. Besides these features, this new generator is far more durable than the conventional types and can be operated in oil.

## 1. 緒 言

1,000cc以下のエンジンを搭載(とうさい)した自動車用発電機には、エンジンレイアウトより、クランクシャフト直結形を採用しているものがあり、また二輪車は全般的にクランクシャフト直結形の発電機を装着している。

このような直結形発電機にも各種の方式があるが、エンジンの小形高速化および電気負荷の増大にこたえるため三相交流発電機(ブラシ付ACジェネレータ、略称ACG)が近年使用されはじめている。

このブラシ付直結形ACGを、さらに軸方向の長さを短縮し、メンテナンスフリーとして広範囲な条件に適応させるため発展させたのがブラシレスACGであり、保証寿命と用途を大きく伸ばしうるものとして今後の発電機の指標となるものである。

以下、エンジン直結形ブラシレスACGの概要と、磁気回路および強度上の問題について述べる。

## 2. 構造と動作

エンジン(クランクシャフト)直結形ブラシ付ACGはたとえば図1に示すように、発電機のロータがエンジンのクランクシャフトに直接テーパ結合される特殊な方式を採っている。

この直結形ACGは、三相発電コイルを有するステータ、界磁コイルとそれに電流を供給するスリップリングを有するロータ、スリップリングに電流を流すブラシを保持するブラシホルダの3主要部品から構成される。

このACGからスリップリング、ブラシ、ブラシホルダを取り除くことができるならば、ACGの長さが短縮できるとともに、エンジンオイルの中に発電機を配置することもでき、エンジンの軸方向長さはさらに短縮される。また、ブラシがないのでブラシ交換の必要がなく発電機としては全く保守不要という利点が追加され、ここにブラシレスACGの必要性が見いだされるのである。

エンジン(クランクシャフト)直結形ブラシレスACGの構造は図2に示すとおりである。

ステータコイルと界磁コイルはクランクケースまたはクランクカバーなどに直接固定され、ロータはエンジンのクランクシャフトにテーパなどで直結され回転する。

動作は一般の三相交流発電機と同じであるが、ブラシレスACGはブラシをなくすために、界磁コイルを回転子より切り離して固定させている。したがって界磁コイルと回転子は2個所の空隙(く

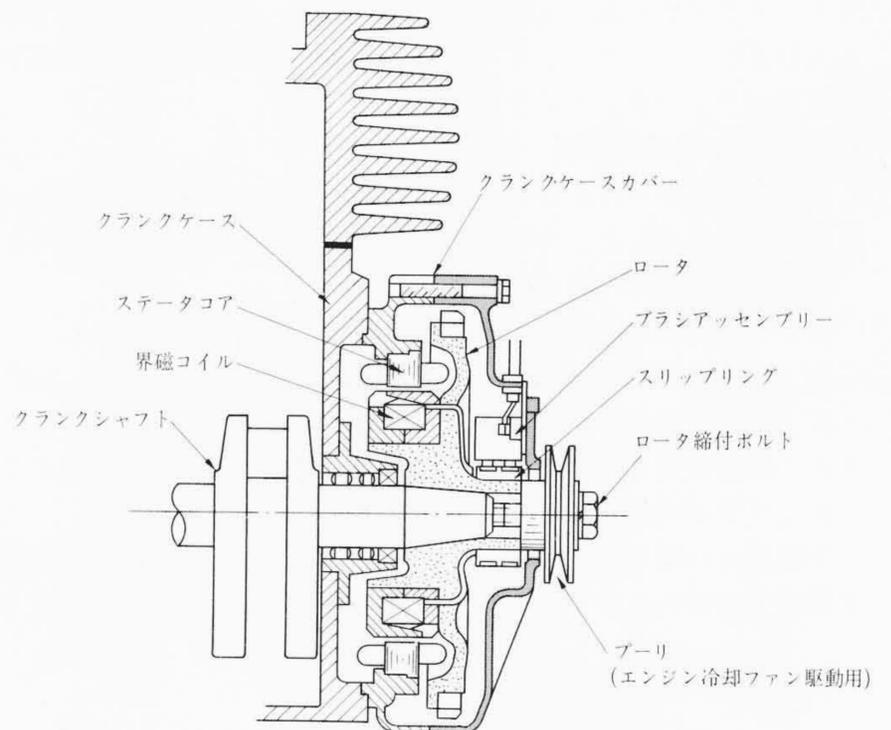


図1 直結形ACG取付構造図

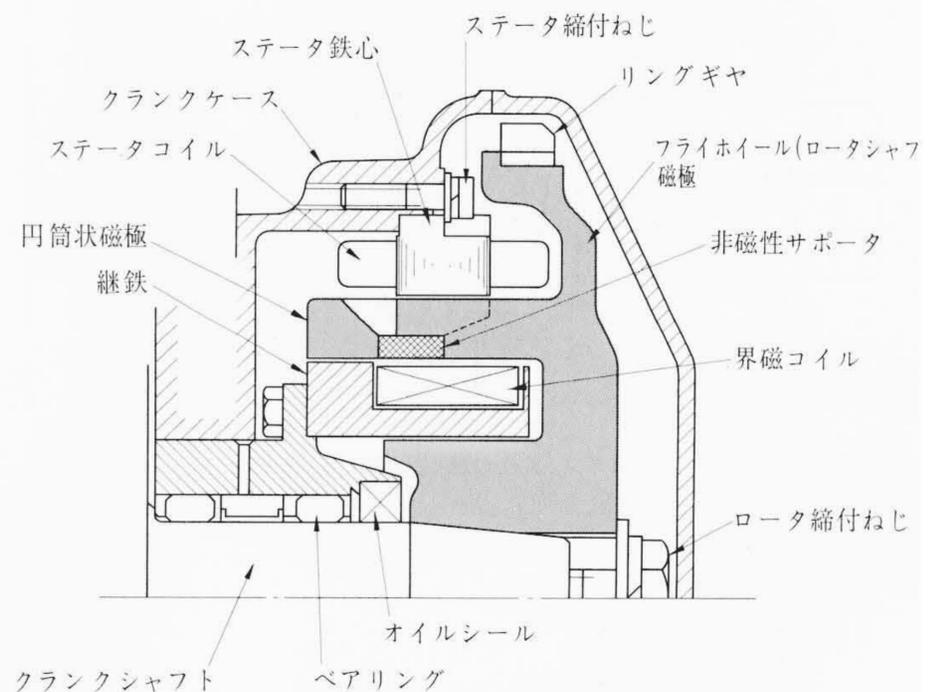


図2 直結形ブラシレスACG取付断面図

うげき)で分けられている。

ブラシレスACGの構造には各種あるが、エンジン直結形としては、そのうちここであげた構造の「単一界磁コイル固定配置形ACG」が最も適している。しかしながらエンジン直結という特殊な条件下における電氣的、機械的問題についての解析検討が必要であり以下に説明を加えていく。

\* 日立製作所佐和工場

### 3. 磁気回路の解析

エンジン直結形という特殊な条件に最も適している「単一界磁コイル固定配置形ブラシレスACG」は電氣的にも他の構造のものより磁束利用率の高い経済的な発電機である。

ここではエンジン直結形として特殊な条件下におかれる項目について述べる。

#### 3.1 磁気回路の構成

エンジン直結形ブラシレスACGの磁気回路構成は図3のようになっている。磁束 $\Phi$ は矢印のように流れる。ロータシャフトはクランクシャフトに取り付けられ、リングギヤを装備する形となるので鋳造製となることが多い。また界磁コイルの巻装されるヨークはクランクシャフト支持用ベアリング部に装着されるため、ほぼL字形状となり、ロータシャフト部と対向している。

磁気回路上の特徴としては、漏えい磁束特にフライホイールとステータコア間の漏えい磁束がフライホイールの形状により異なる点およびこのフライホイール部よりの漏えい磁束により磁極の磁束量がアンバランスになる点である。

#### 3.2 漏えい磁束の解析

直結形ブラシレスACGの漏えい磁束は図3に示すように $\phi_1 \sim \phi_6$ の6種類の流れとして解析される。すなわち次のようになる。

- $\phi_1$  : 磁極側面間の漏えい磁束
- $\phi_2$  : 磁極先端と磁極根元側面間の漏えい磁束
- $\phi_3$  : 磁極先端部と磁極リング間の漏えい磁束
- $\phi_4$  : 磁極内面と界磁継鉄外周間の漏えい磁束
- $\phi_5$  : 磁極根元とステータコア端面間の漏えい磁束
- $\phi_6$  : フライホイールとステータコア間の漏えい磁束

上記漏えい磁束のうち $\phi_1 \sim \phi_5$ に関しては一般のブラシレスACGで解決済みであるので、ここでは直結形として生ずる $\phi_6$ の漏えい

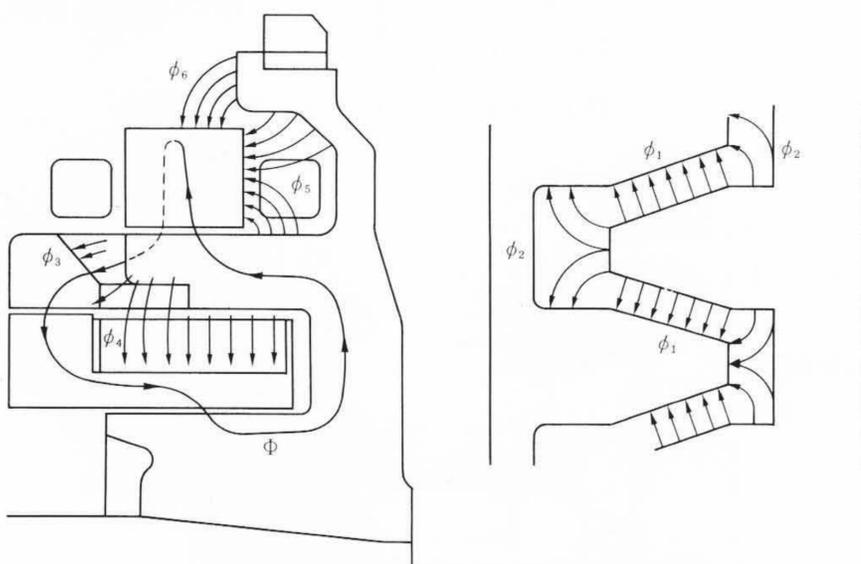


図3 磁気回路図と漏えい磁束

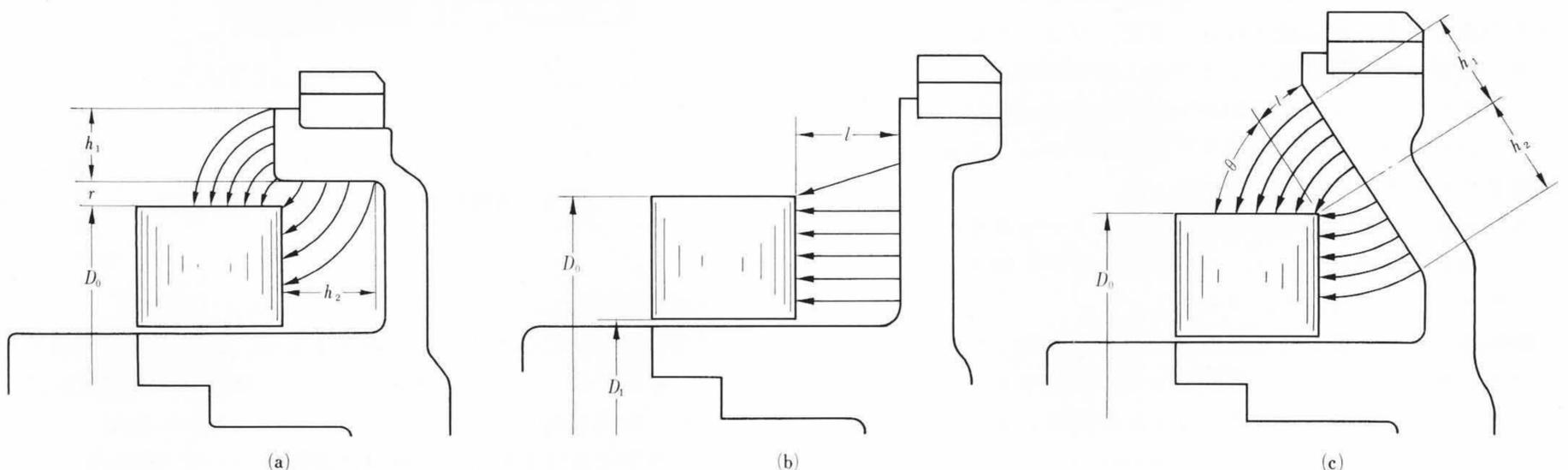


図4 フライホイール漏えい磁束

磁束解析を行なうことにする。

フライホイールとステータコア間の漏えい磁束 $\phi_6$ は図4に示すようにフライホイールの形状により(a)~(c)のように異なった値を示すことになる。

#### (1) 形状(a)の場合のパーミアンス

この部分のパーミアンスは近似的に(1)式で表わされる。

$$P_6^a = \int_0^{h_1} \frac{2\mu S_1}{\pi(r+x)} dx + \int_0^{h_2} \frac{2\mu S_2}{\pi(r+x)} dx$$

$$h_1 \doteq h_2$$

$$S_1 \doteq S_2 = 2D_0\pi h_1/P \text{ とすると}$$

$$= 2 \int_0^{h_1} \frac{2\mu(2D_0\pi h_1)}{\pi P(r+x)} dx$$

$$= \frac{8\mu D_0 h_1}{P} \log e \left(1 + \frac{h_1}{r}\right) \dots\dots\dots(1)$$

#### (2) 形状(b)の場合のパーミアンス

この部分のパーミアンスは(2)式で表わされる。

$$P_6^b = \frac{\mu S}{l} = \frac{\mu(D_0^2 - D_1^2)\pi}{2Pl} \dots\dots\dots(2)$$

#### (3) 形状(c)の場合のパーミアンス

この部分のパーミアンスは角度 $\theta$ 、最小間隙 $t$ により次式で表わされる。

$$P_6^c = \int_0^{h_1} \frac{2\mu S_1}{\pi\left(\frac{t}{\sin\theta} + x\right)} dx + \int_0^{h_2} \frac{2\mu S}{\pi\left(\frac{t}{\cos\theta} + x\right)} dx$$

$$h_1 \doteq h_2 \quad S_1 \doteq S_2 = 2D_0\pi h_1/P \text{ とすると}$$

$$= \frac{4\mu D_0 h_1}{P} \log e \left(1 + \frac{h_1 \sin\theta}{t}\right) \left(1 + \frac{h_2 \cos\theta}{t}\right) \dots\dots\dots(3)$$

以上の計算式(1)~(3)で求められたパーミアンスにより、漏えい磁束 $\phi_6$ は(4)式で求められる。

$$\phi_6 = P_6 AT = P_6 (ATg + ATt + ATa) \text{ [max]} \dots\dots\dots(4)$$

ここに、 $ATg$  : 主空隙の消費起磁力

$ATt$  : ステータコア歯部の消費起磁力

$ATa$  : ステータコアコアバックの消費起磁力

すなわち、ステータコアの飽和度によって漏えい磁束 $\phi_6$ の値は変わる。厳密にはフライホイールの消費起磁力 $ATf$ の飽和度によって値は変わるが、実用的には(4)式によって計算してさしつかえない。

#### 3.3 磁極磁束量のアンバランスとその対策

フライホイールとステータコア間の漏えい磁束 $\phi_6$ は図6でも明らかのように、ステータコアから主空隙を通して円筒状磁極に流れるため、フライホイール側の磁極との間に磁束量のアンバランスが生ずることになる。

$$\phi_A = \phi_B + \phi_6 \text{ [max]} \dots\dots\dots(5)$$

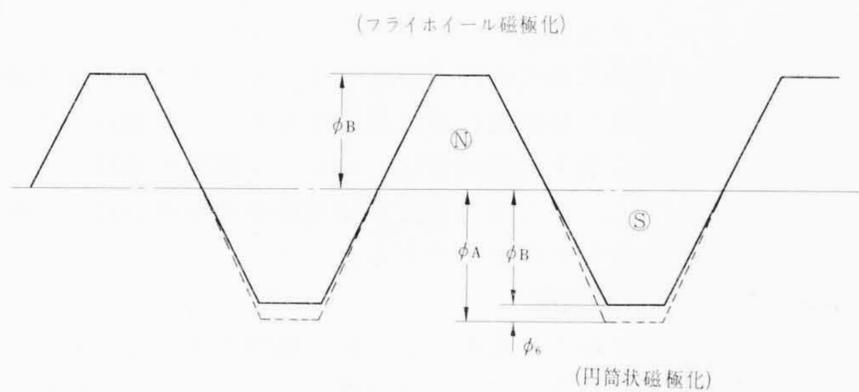


図5 磁束分布

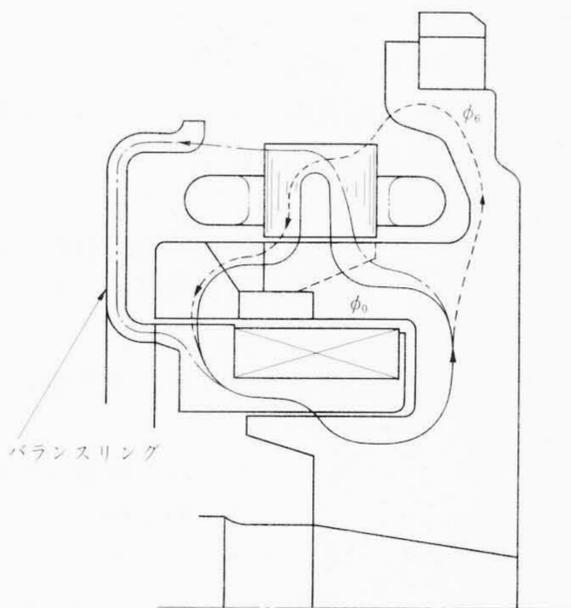


図6 バランスリング装着時磁束分布

ここに、 $\phi_A$ ：円筒状磁極の全磁束量〔max〕  
 $\phi_B$ ：フライホイール側磁極の全磁束量〔max〕

よってステータコイルと交さる磁束量もN S極で異なる形となる。磁束の変化を図で示すと図5のようになる。

図5のようにN S極の磁束量が異なった場合、ステータコアから見た磁束分布がアンバランスになるので、磁気発生に対して不利となる。

漏えい磁束 $\phi_a$ が多くなるような構造の場合には図6のようにバランスリングを入れ磁束のバランスをとるようにすれば磁気音は防止される。

### 3.4 ダクタイル鋳鉄(FCD-45)の磁気特性

エンジンフライホイールの外周にリングギヤを装備する場合、図2のように鋳鉄製フライホイールとなる。この鋳鉄製フライホイールと磁極を共合させるためには、磁気特性のすぐれた鋳鉄を選定しなければならない。また、サポータ(SUS27材)とのろう接性のすぐれた材料であることが必要となってくる。

そこで今回ダクタイル鋳鉄(FCD-45)を用い磁気特性を測定した結果十分満足することがわかった。

図7はダクタイル鋳鉄(FCD-45)、ネズミ鋳鉄(FC-10)、軟鋼(S20C)の磁気特性を示すものである。今回試作したFCD-45材は、一般のダクタイル鋳鉄の磁気特性に比べ30%程度上回るものである。また、950°Cまでのろう接では磁気特性が改善される方向にあり良好であった。

## 4. ロータの強度

直結形ブラシレスACGのロータは特殊な構造をしているので、強度確保を図る必要がある。すなわちロータのつめ形磁極は電機子鉄心と界磁コイルの狭い空間を高速回転するので、磁気回路上から定まる各部寸法と、運転中この部分に要求される強度とを満足させるバランスのとれた設計としなければならない。

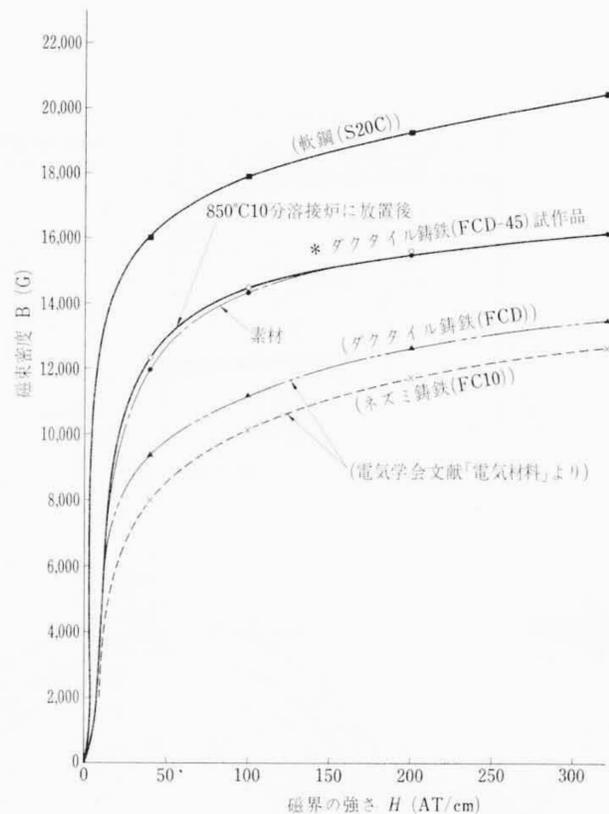


図7 ダクタイル鋳鉄の磁気特性

表1 直結形ブラシレスACGロータに要求される強度

No.	条件	例	理由
1	耐熱性	160°C	エンジンから熱を受けやすい
2	耐振性	70G	エンジン振動を直接受ける
3	耐過回転	16,000rpm以上	常用回転の200%保証
4	耐急加減速	$5 \times 10^4$ rad/s	エンジン爆発時の回転変動を直接受ける

ここではロータ全体と各構成部品にかかる運転中の荷重より、各部に生ずる応力を求める方式を述べる。

### 4.1 要求強度の設定

運転中ロータに要求される強度は、耐過回転強度、耐急加減速強度そして耐振強度の3強度である。

まず耐過回転強度であるが、これはロータのつめ形磁極外径ふくらみ、およびロータの破壊回転数の算出を行ない確認する。

次に耐急加減速強度はエンジンの最大角加速度より求められ、ロータつめ形磁極接合部強度が決定される。

最後に耐振強度(耐疲労性)であるが、これはロータのつめ形磁極2個を接合している非磁性リングの寸法決定に関する強度の一つである。

以上述べたことに温度条件を加えてまとめると、直結形ブラシレスACGロータに要求される強度は表1に示すものとなる。

### 4.2 ロータの構造

ロータの強度を算出するにあたり、直結形ブラシレスACGロータの構造を図8に示すようなものとする。ロータは3個の部品から構成されている。すなわちエンジクラクシャフトに直結されるコの字形をした磁極と、円筒形磁極(この二つの磁極はつめ形状を有している。)そして円筒形磁極をクラクシャフト直結の磁極に接合させる役目をもった非磁性リングから成り立っている。

### 4.3 ロータの耐過回転強度

ロータを構成する部品の中で磁気回路および構造上より回転強度の弱い部品は、円筒形状をなすつめ形磁極である。したがってこの部品に十分な回転強度が必要である。図9は円筒形状をなすつめ形磁極(ロータコア)を示したものである。

耐過回転強度はロータ外径ふくらみ量と破壊回転数で定められる。

#### (1) 外径ふくらみ量

常用最高回転数の140%で運転したときの外径ふくらみ量が規

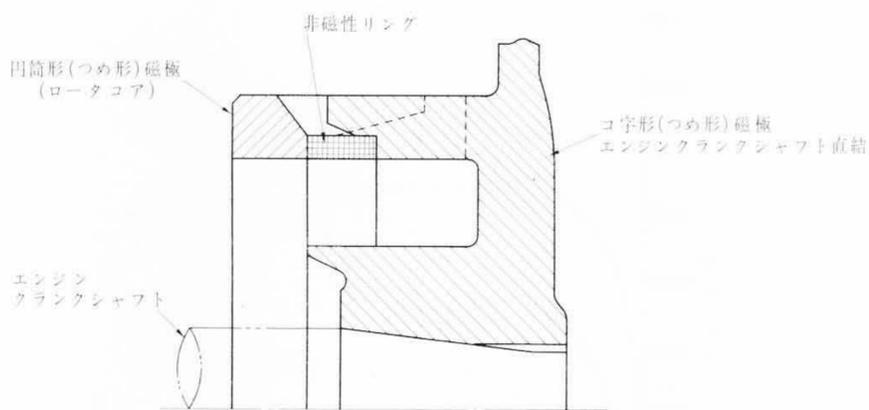


図8 ロータ構造

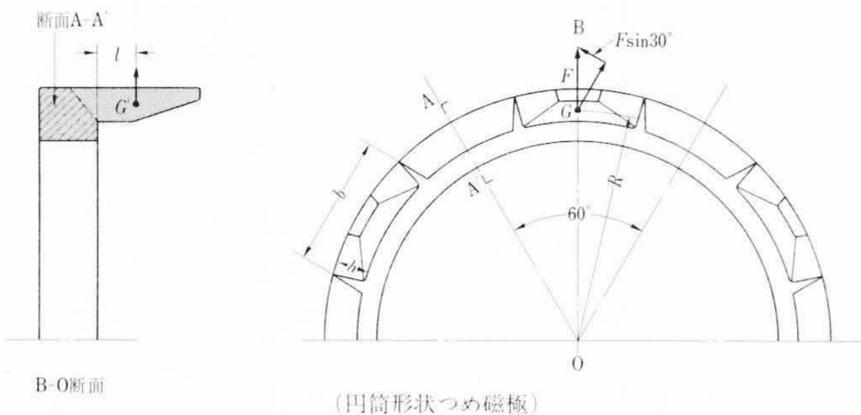


図9 ロータコア

定されており（一般にふくらみ量 $0.05\text{mm}$ が多く適用されている）、各回転における外径ふくらみ量は次式により求められる。

$$\delta = \frac{4 \cdot F \cdot (l/h)^3}{b \cdot E} = \frac{4 \cdot W_1 \cdot \omega^2 \cdot R}{b \cdot E} \left(\frac{l}{h}\right)^3 \dots\dots(6)$$

ここに、 $\delta$ ：つめ部先端たわみ量  $R$ ：重心距離  
 $b$ ：つめ部根元幅  $\omega$ ：角速度  
 $E$ ：ヤング率  $g$ ：重力加速度  
 $F$ ：つめ部分遠心力  $l$ ：つめ部重心の距離  
 $W_1$ ：つめ部分重量  $h$ ：つめ部根元厚さ

(2) 破壊回転数

常用最高回転数の200%の回転で運転したとき、円筒形状をなすつめ形磁極が破壊しないという規定を満足するよう、次により求める円筒部内部応力とつめ部根元に発生する内部応力で確認する。

$$\sigma_1 = \frac{F \cdot \sin 30^\circ}{A} = \frac{W \cdot \omega^2 \cdot R \cdot \sin 30^\circ}{A \cdot g} \dots\dots(7)$$

$$\sigma_2 = \frac{W_1 \cdot \omega^2 \cdot R \cdot l}{Z \cdot g} \dots\dots(8)$$

ここに、 $\sigma_1$ ：円筒部(A-A断面)応力  $Z$ ：つめ部根元の断面係数  
 $\sigma_2$ ：つめ部根元に生ずる応力  $A$ ：A-A部 断面積  
 $W$ ：磁極重量

4.4 ロータの耐急加減速強度

エンジン装着運転時にロータに急加減速（回転変動）がかかるがそれは2個のつめ形磁極を非磁性リングで接合している部分にかかる。

接合している部分で、コ形磁極（クランクシャフトに直結する）と非磁性リングの接合部は円筒形つめ形磁極と非磁性リングの2部品を固定するので、この部分に十分な強度を持たせる必要がある。

接合部に要求される強度と、接合強度を次式にて求める。

$$\left. \begin{aligned} T_1 &\leq T_2 \\ T_1 &= I \cdot \omega \\ T_2 &= \frac{1}{2} \cdot D \cdot F = \frac{1}{2} \cdot D \cdot \tau \cdot A \end{aligned} \right\} \dots\dots(9)$$

ここに、 $T_1$ ：要求トルク  $\tau$ ：接合部剪（せん）断強さ  
 $T_2$ ：接合部伝達トルク  $D$ ：接合部平均直径  
 $I$ ：慣性モーメント  $A$ ：接合面積

$\omega$ ：角加速度

以上により接合部強度が求められるが、ロータに作用する最大角加速度と磁極接合強度をいかに設定するかに十分留意する必要がある。なぜなら最大角加速度は、エンジン容量や車種により異なるものであるし、また接合強度は使用条件や接合方式の信頼性により定められるものだからである。

4.5 ロータの耐振強度

運転中ロータにかかる振動により最も応力の生ずる部分は、2個のつめ形磁極を接合している非磁性リングである。非磁性リングにかかる荷重は、振動によるもののほかにも種々あるのでここでは総合して検討を加える。

(1) 運転中非磁性リングに生ずる応力は次の4種である。

①振動による応力 $\sigma_3$  ②遠心力による応力 $\sigma_4$  ③つめ形磁極のアンバランスによる応力 $\sigma_5$  ④エンジン回転変動による応力 $\sigma_6$

(2) 各応力は次式により求められる。

①振動による応力 $\sigma_3$

$$\sigma_3 = \frac{W \cdot G}{A_1} \dots\dots(10) \quad W: \text{つめ形磁極(円筒)} + \text{非磁性リング重量}$$

$$G: \text{振動の大きさ} \quad A_1: \text{リング断面積}$$

②遠心力による応力 $\sigma_4$

$$\sigma_4 = \frac{P_1}{2A} = \frac{F \cdot D \cdot L}{2A} \dots\dots(11) \quad P_1: \text{直径} D \text{を境にリングをさかんとする力}$$

$F$ ：単位体積についての遠心力  
 $A$ ：断面積  $L$ ：リング幅

③つめ形磁極のアンバランスによる応力

$$\sigma_5 = \frac{P_2}{2A} \dots\dots(12) \quad P_2: \text{アンバランスが回転の上昇で非磁性リングに及ぼす力}$$

④エンジン回転変動（急加減速）による応力

$$\sigma_6 = \frac{16 \cdot D \cdot T}{0.8 \pi (D^4 - d^4)} \dots\dots(13) \quad T: \text{急加減速により生じたリングおよびつめ形磁極の回転力}$$

$D$ ：リング外径  $d$ ：リング内径

以上述べた各種応力を非磁性リングは運転中に生ずるので、リングには信頼性の高い材料を使う必要がある。

5. 実験機の仕様と試験結果

5.1 実験機の仕様

具体的な設計基準値と仕様は表2に示すとおりである。図10は実験機の外観を示したものである。

5.2 試験結果

電氣的諸性能と機械的強度とは計算値と試験結果がよく一致し満足すべき結果が得られた。

参考までに試験結果の一部を述べると、出力特性、無負荷飽和特性、 $I_c$ - $I_f$ 特性、交流短絡特性は図11~14に示すようになる。

表3は強度の結果を、図15は過速試験の結果を示すものである。

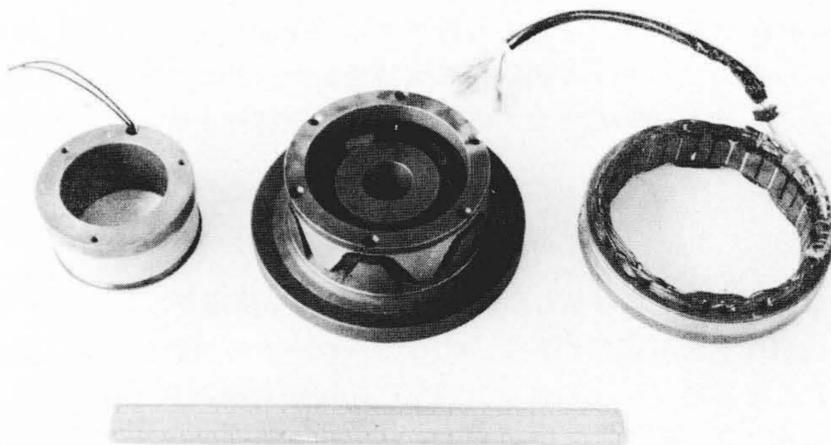
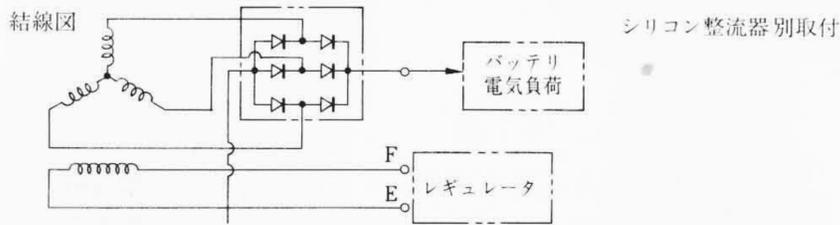


図10 実験機の外観

表2 実験機のおもな仕様

定格出力	12V 35A	極数	12	温度	ステータコア	密閉扉中155deg以下
電池電圧	12V	相数	3	上昇	界磁コイル	密閉扉中120deg以下
定格回転数	5,000rpm	結線	入	極	性	⊖アース
14V時回転数	1,000rpm	重量	5kg	組合	レギュレータ	チリル式



コア外径 (mm)	165φ	主磁束	$\Phi = 29,200$ (max/pole)
コア内径 (mm)	130φ	電機子反作用起磁力	$ATd = 307$ (AT/pole)
有効積厚 (mm)	24	磁極形状	
スロット数	36		
1スロット導体数	9		
一相直列導体数	108		
カータ係数	1.111		
極弧率	0.67		
整流電圧効率	0.425		
整流電流効率	0.828		
継鉄部磁束分布係数	0.739		
漏えいリアクタンス $\lambda_s = 1.836$			
$\lambda_c = 0.320$			
$\lambda_H = 0.730$			
$X_L = 0.756N \times 10^{-4}$ (Ω/相)			
$N = 1,000\text{rpm}$ $X_L = 0.0756$			
$N = 2,000\text{rpm}$ $X_L = 0.1512$			
$N = 5,000\text{rpm}$ $X_L = 0.3780$			
機械的強度			
ロータ外径ふくらみ量 $\delta$	0.027mm/11,200rpm		
ロータ破壊回転数	17,500rpm		
磁極接合強度	15kg <sup>m</sup> 以上		

表3 ロータ強度

項目	過速試験 11,200rpm 外径ふくらみ	磁極接合強度 150°C	破壊試験 16,000rpm以上
実測値	0.035 mm	50kg <sup>m</sup>	18,000rpm以上
(設計計算値)	0.027 mm	50kg <sup>m</sup>	17,500rpm以上
仕様基準値	0.050 以内	15kg <sup>m</sup> 以上	16,000rpm以上

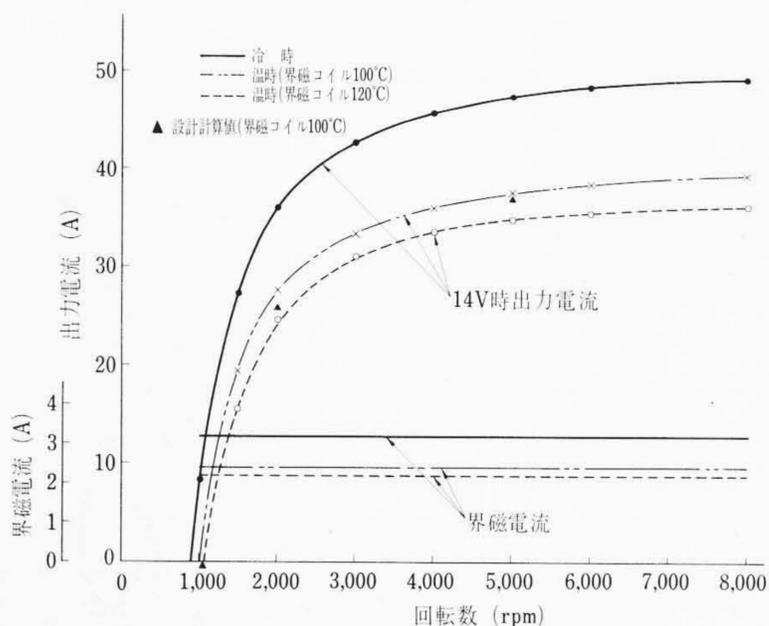


図11 12V35A直結形ブラシレスACG速度特性曲線

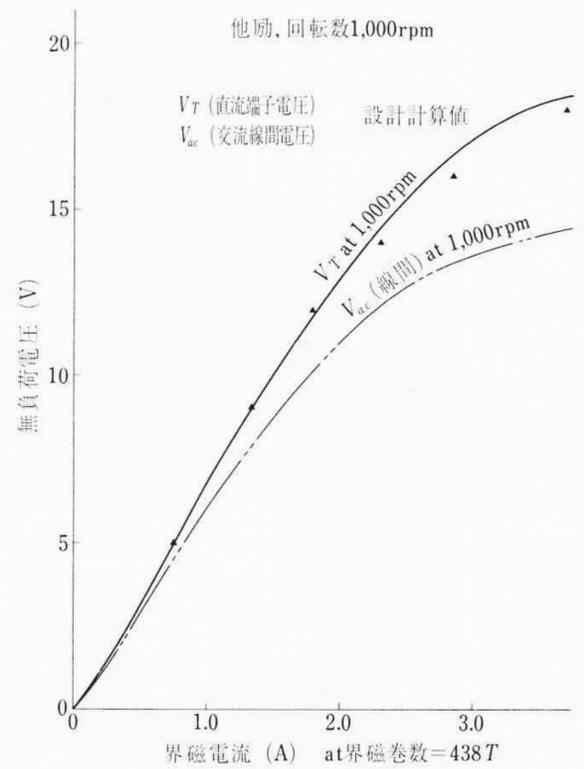


図12 無負荷飽和特性曲線

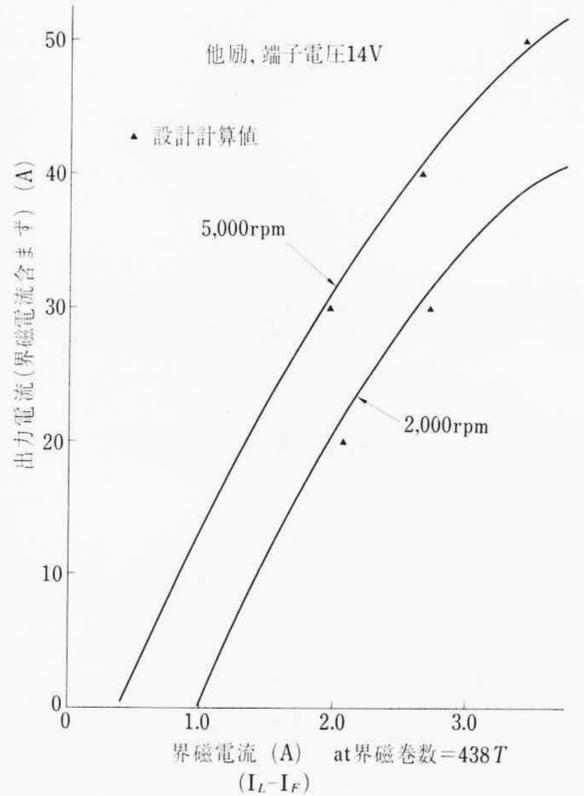


図13 電機子特性曲線

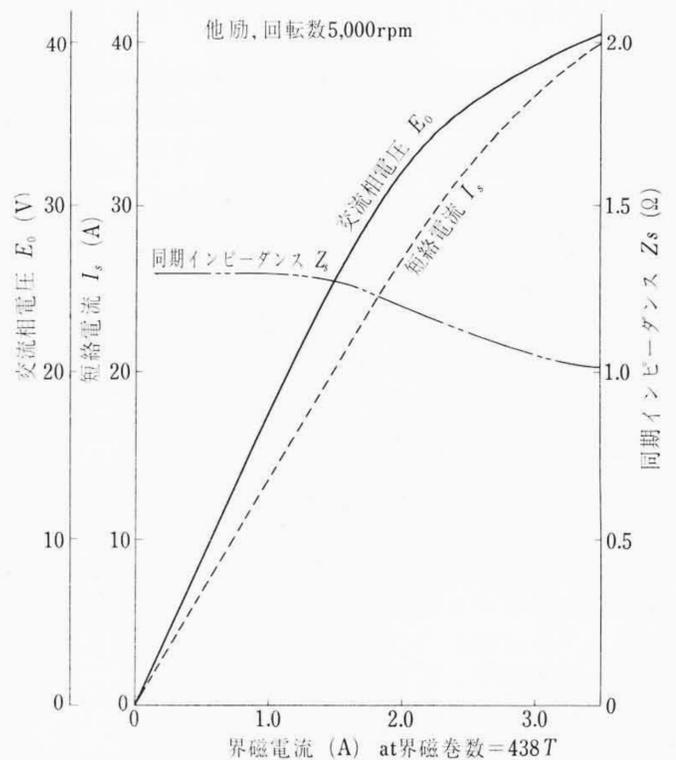


図14 交流短絡特性曲線

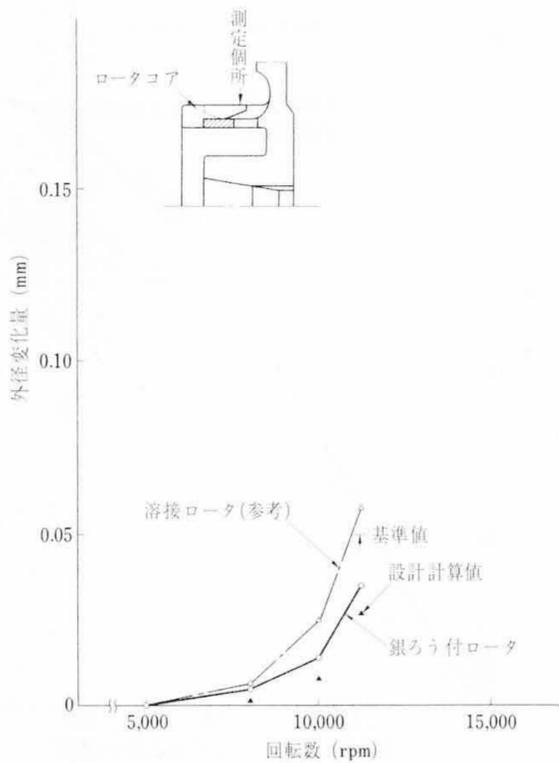


図15 ロータコア外径変化量

### 5.3 耐久試験結果

現在の直結形電装品の実用耐久試験を各種項目について行なった結果は所期の性能を満足し、十分実用に供しうることがわかった。

特に寿命試験においては 1,000時間の高温高速連続試験で性能劣化や不ぐあい点がなく、ブラシレスの特長を十分発揮することが確認された。

## 6. 結 言

エンジン直結形ACGのブラシレス化に着目し、軸方向を短くしてメンテナンスフリーとした発電機を検討し実用化することができた。

直結なるがゆえに特殊な条件にさらされた場合の電氣的機械的問題点を解析して実用に供しうるACGとすることができた。

終わりにのぞみ、本件にご協力いただいた、日立製作所日立研究所、渡辺主任研究員と佐和工場の関係各位に深謝する次第である。



## 特 許 の 紹 介



特許第458826号(特公昭40-8134号)

村上国輔・伊藤晏達  
八木清

### 鋳型模型定盤の基準孔せん孔方法

鋳型の製造において鋳型模型定盤と鋳わくとを組み合わせる合せピンとピン孔とは砂塵(さじん)の介入により摩耗しやすく、このため鋳わくと鋳型模型定盤の位置関係を正確に長期間、また多数の鋳型を製造する間保持することは困難であり、ピン孔と合せピンはしばしば交換しなければならない。ピン孔の交換には低融合金を用いれば容易に行なうことができるが、従来の方法では模型とピン孔との位置関係を正確に出すことは非常に困難であり、かつ模型が変わればその都度新たに模型との位置関係を出さねばならない。またピン孔交換のための鋳込治具も模型が変わるたびに換えなければならない。

本発明は、鋳型模型定盤に該模型定盤と鋳わくととの組合せには直接関係のない基準ピンを取り付け、該基準ピンを基準にして鋳型模型定盤にピン孔を鋳込むことにより上記の欠点を除去するものである。

図1ないし図5は本発明の方法を示したものである。図1に示す模型定盤1には基準ピン5が設けてあり、この模型定盤1を反転して図4に示す治具20の穴22内に模型定盤1上に設置した模型4をそう入しつつ、同時に基準ピン5を基準孔23と長基準孔24にそう入して模型定盤1を治具20上に安置する。図5は模型定盤1と治具20を組み合わせたピン孔と基準ピン部の断面図であり、上述のように模型定盤1を安置してからゲージピン25を模型定盤1の鋳込孔19内にそう入し治具本体21に設けた円錐(すい)孔28に図のように垂直に立てこれを鋳型として鋳込孔19内低融合金を流し込み固着後模型定盤1を治具20から抜き出せば図1に示す低融合金7でできたピン孔6を設けることができる。次に図2、3に示すように鋳わく8を模型定盤1の基準ピン5をガイドにして合せピン10の頭部12を前記のピン孔6にそう入すれば鋳わくの位置を正確に決めることができ、かつ摩耗が少なく長期間ピン孔と合せピンの補修をすることなく鋳わく鋳型を使用することができる。(繁田)

