

# 航 空 宇 宙 技 術 研 究 所 資 料

TECHNICAL MEMORANDUM OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TM-405

電気油圧式エンジン制御装置用小型トルクモーターの試作

遠 藤 征 紀

1980 年 2 月

航 空 宇 宙 技 術 研 究 所  
NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

項 目	担 当 者
設 計	遠 藤 誠
実 験 計 測	遠藤 誠，室岡 勝次

\* 石川島播磨重工業(株)

昭和 55 年 7 月 16 日

配布番号

171

所 属 管 理 部

河 崎 俊 夫 殿

全 面 課 長

配布先限定文献の取扱いについての注意

この文献（航空宇宙技術研究所資料 TM-405）は、  
配布先限定につき、取扱いには十分注意して下さい。

なお、貴殿の番号は上記番号です。また転送取の際には全面保  
調査係まで、御連絡下さい。

## 目 次

1. はじめに .....	1
2. トルクモータの目標性能 .....	2
3. 設 計 .....	2
(1) 動作原理 .....	2
(2) 永久磁石の形状設計 .....	3
(3) コイルの設計 .....	5
(4) トーションスプリングの設計 .....	5
(5) 共振周波数 .....	6
(6) 材料の選定 .....	6
(a) 磁性材料保持力の影響 .....	7
(b) 磁性材料の透磁率 .....	7
(c) 磁性材料の抵抗率 .....	7
(d) 磁性材料のキュリー温度 .....	7
(e) 飽和磁束密度 .....	7
4. 製 作 .....	11
5. 試 験 .....	11
(1) 特性試験 .....	11
(2) 追加試験 .....	17
(i) 永久磁石による空隙部磁束密度の測定 .....	17
(ii) コイルによる空隙部磁束密度の測定 .....	18
(iii) トーションスプリングのヒステリシス特性 .....	18
(3) 試験結果の検討 .....	19
(i) 出力特性 .....	19
(ii) ヒステリシス特性 .....	20
(iii) 周波数応答特性 .....	21
6. ま と め .....	21

# 電気油圧式エンジン制御装置用 小型トルクモーターの試作\*

遠 藤 征 紀\*\*

本文中で使用する記号

$B_g$	空隙の磁束密度
$B_M$	永久磁石による空隙の磁束密度
$B_c$	コイルによる空隙の磁束密度
$B_d$	設計点における永久磁石の磁束密度
$F$	アーマチャーに加わる力
$F_c$	コイルの起磁力
$H_d$	設計点における永久磁石の減磁界の強さ
$G$	横弾性係数
$I$	アーマチャーのトーションスプリング回りの極慣性モーメント
$K$	トーションスプリングのねじり弾性係数
$L$	トーションスプリングの長さ
$L_M$	永久磁石の長さ
$R_c$	コイルによる磁気回路の磁気抵抗
$S_M$	永久磁石の断面積
$S_g$	空隙部の断面積
$T$	トーションスプリングに加わるねじりモーメント
$T'$	トーションスプリングの弾性によるねじりモーメントの反力(トルク)
$U$	弾性エネルギー
$a, b$	十字形トーションスプリングの長さ・厚さ
$d$	円形トーションスプリングの直径
$g$	重力による加速度
$l$	アーマチャーのトーションスプリング回りのねじりのうでの長さ
$k_1, k_2, k_3$	長方形断面はりの、たてとよこの長さの比で決まる定数
$\phi$	永久磁石による磁束
$\phi_c$	コイルによる磁束

$\mu_0$	真空の透磁率
$\gamma$	リーケージ係数(永久磁束)
$\gamma'$	リラクタンス係数
$\beta$	リーケージ係数(コイル)
$\phi$	たわみ角
$\tau$	せん断応力
$\rho$	比重量

## 1. はじめに

現在航技研では、通産省工業技術院の大型工業技術研究開発の一つ、「航空機用ジェットエンジンの研究開発」のもとで、電気油圧式エンジン制御装置の研究開発を行っている。電気油圧式エンジン制御装置は、従来の機械油圧式エンジン制御装置の検出器部、演算論理判断部等の、精度と融通性を強く要求される部分を電子化して電気部とし、ポンプやピストン等の作動部で、油圧機器の特色を生かせる部分は、従来通りに油圧部として残して、両者を結合することによって制御装置の制御機能の質と量の増強を図った新しい制御装置であり、各国が競って研究開発を行っている。

我国で研究開発中の電気油圧式エンジン制御装置では、出力が1~2kg<sup>\*注1</sup>のトルクモータが最大3個、電気信号を油圧信号に変換する電油変換器として使用されるが、このクラスの出力を出す航空用の小型トルクモータは米国でも限られたものしかなく、もちろん国産はされていない。そこで、トルクモータはこの制御装置の重要部品

\*注1 トルクモータの出力は、名前からすればトルク(力×距離)であるが、距離は、トルクモータのトーションバーの長さとして決まってしまうので、ここでは外部の機器を駆動するために使用できる力を出力として用いる。

\* 昭和55年1月17日 受付

\*\* 原動機部

であること、他の同様な制御装置にも用いられること等を考慮して、国産化を目的とした試作研究を行ったが、本報告はその経過と成果を報告するものである。

## 2. トルクモータの目標性能

図1に研究開発中の電気油圧式エンジン制御装置の全体構成を示す。図中DECは、パイロットのパワー指令、エンジン各部に取付けた電氣的検出器からの信号をもとに制御に必要な演算、論理判断を行う一種の搭載型デジタル計算機であり、EHCはDECの作動部及び故障時のバックアップとして働き、燃料ポンプ及び各種サーボ機構から成る。トルクモータは、DECよりの電気信号をEHC内の油圧信号に変換する。トルクモータの目標性能は次の各事項を考慮して表1のように決定した。

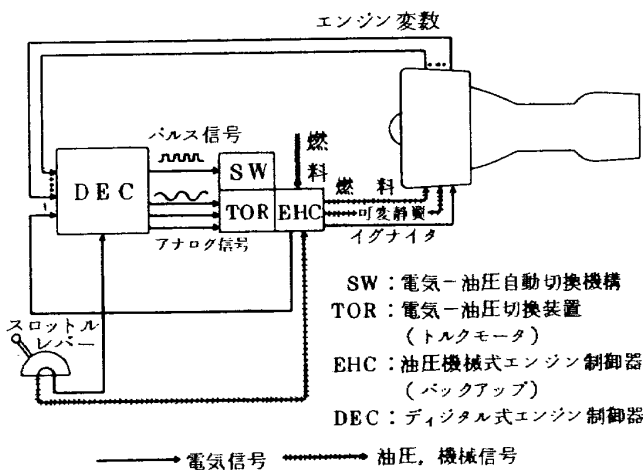


図1 電気油圧式エンジン制御装置

表1 試作トルクモータの目標性能

出力	中立点において1kg以上
変位	±0.15mm以上
消費電力	5W以下
ヒステリシス	2%以下
共振周波数	400Hz以上
形状	現用のModel-20・5A・55より小形でエンジン制御装置に適合する。
周囲温度	-54°C ~ +120°C
耐振動衝撃	MIL-STD-810Bに従う。
汚染	JP-4, JP-5等の航空燃料に耐える。

。電気油圧式エンジン制御装置は安全性、信頼性を最優先とする設計が成されており、DECの内部は検出器、出力信号増幅器、カウンタ、演算器、入出力装置がすべて2重に設けられている。また、EHCは過去の実績により高い信頼性が保証されている。従ってトルクモータには高い信頼性が要求される。

。電気油圧式エンジン制御装置はまた、全体として従来の機械油圧式エンジン制御装置と同程度または、それ以下の重量、容積にまとめる必要がある。EHC内に組込むトルクモータは現在燃料流量制御用と可変静翼設定角度制御用の2個必要となっているが、予備用も含めて3個使用される可能性があるため小型化する必要がある。

。EHCはエンジンに装備されるため、200Hz前後の振動的外力を受けるほか、燃料中にひたした状態で使用するため、周囲温度が広範囲に変化する。

。トルクモータは、後に図36に示すようにEHC内部のサーボピストンを直接駆動するために、中立点で最低1kgの出力、±0.15mm以上の変位が得られることが望ましい。

。現用の同様な使い方をするトルクモータの最小小型のものは米国のSERVOTRONICS INC社製のものであるが、性能は同程度又はそれ以上、寸法はそれ以下にすることが望ましい。

研究開発は2段階に分けて行った。第1段階では小型トルクモータ開発上の問題点を明らかにして、設計計算上のデータを得ること及びEHCに組込むトルクモータの出力を決定する資料を得ることを主目的として中立点における出力が1kg、2kg、3kgの3種類を試作した。これを本報告ではそれぞれ、Ⅰ型、Ⅱ型、Ⅲ型と呼ぶ。また第2段階では、第1段階で試作した3種類のトルクモータの試験結果及びトルクモータ駆動増幅器、大きさ、消費電力を考慮して2kg型のみについてヒステリシス特性を中心に改良試作を行い、試験を行った。これをⅡA型と呼ぶ。

## 3. 設計

### (1) 動作原理

図2にトルクモータの動作原理を示す。トルクモータは、永久磁石、継鉄、アーマチャー、トーションスプリング、コイル及びケーシングより成る。図2においてコイルに電流が流れていない時は、4個の永久磁石が空隙部においてアーマチャー（磁性体）に加えるトーションスプリング回りのねじりモーメントは釣り合っており、アーマチャーは上下の継鉄（磁性体）の中間に位置する。これが中立点である。次にコイルに電流を通じると上下

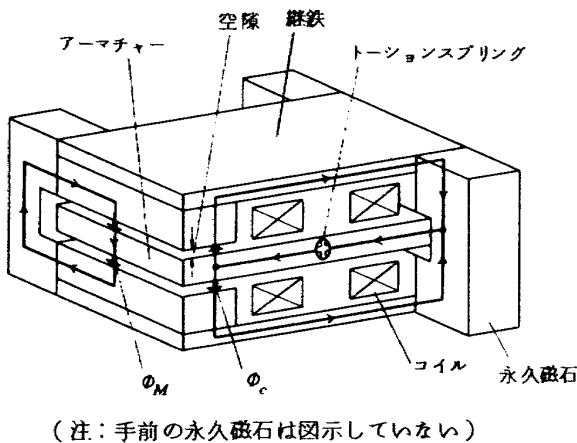


図2 トルクモータ原理図

の継鉄とアーマチュアとの間の4個所の空隙部の磁束密度が変わり、アーマチュアに対してトーションスプリング回りのねじりモーメントを加える結果、アーマチュアはトーションスプリング回りのねじりモーメントとトーションスプリングの弾性力とが釣り合う位置まで変位する。出力はアーマチュアの一端に突出部を設け、外部機器と接合することにより取出す。トルクモータの特性としては、一般に最大変位が大きいこと、出力としての力(トルク)が大きいこと、電流対出力の線形性が優れていること、ヒステリシスが小さいこと、周波数応答性が良いこと、等が要求される。図3に入力電流と中立点出力特性の設計目標を示す。入力電流と中立点出力特性はマグネットの温度特性(アルコニ系で約 $-0.02\%/^{\circ}\text{C}$ )を考慮し、室温において出力を10%増にしてある。

## (2) 永久磁石の形状設計

磁気回路の空隙に働く力は、磁束の洩れが無く、均一な磁束密度とすると(1)式で与えられる。

$$F = \frac{B_g^2}{2\mu_0} \cdot S_g \quad [\text{N}] \quad (1)$$

図2において1個の永久磁石によって空隙に作られる磁束を $\phi_M$ 、コイルにより空隙に作られる磁束を $\phi_c$ とすると、出力 $F$ は、

$$\begin{aligned} F &= 2 \cdot S_g \left\{ \frac{1}{2\mu_0 S_g^2} (2\phi_M + \phi_c)^2 - \frac{1}{2\mu_0 S_g^2} (2\phi_M - \phi_c)^2 \right\} \\ &= \frac{8}{\mu_0 S_g} \cdot \phi_M \cdot \phi_c \quad [\text{N}] \\ &= \frac{0.816}{\mu_0 S_g} \cdot \phi_M \cdot \phi_c \quad [\text{kg}] \end{aligned} \quad (2)$$

コイル側の磁気抵抗 $R_c$ は空隙部の磁気抵抗がほとんどを占める。即ち、

$$R_c \doteq l_g / \mu_0 S_g$$

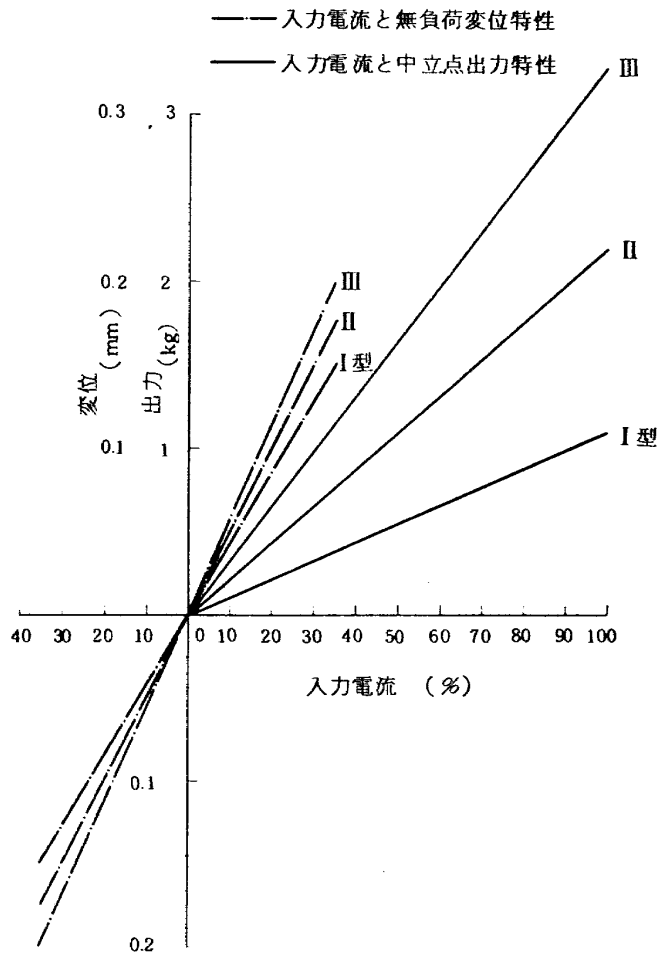


図3 設計目標特性

である。従って、

$$\phi_c = \beta \frac{F_c}{R_c} = \frac{\beta \cdot \mu_0 \cdot S_g}{l_g} \cdot F_c \quad (3)$$

従って(2)式は、

$$F = 0.816 \cdot \beta \cdot \frac{1}{l_g} \phi_M F_c \quad [\text{kg}] \quad (4)$$

となる。更に永久磁石の磁気回路の磁束の連続性及び起磁力と磁束との簡易実験式(5)を用いる。

$$\left. \begin{aligned} B_d S_M &= r B_g \cdot S_g \\ H_d \cdot L_M &= r' \frac{B_g}{\mu_0} \cdot (l_g \times 2) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

ただし、

$r$  ; リーク係数で、永久磁束からの磁束が空隙部の周囲に、また継鉄、磁石表面から漏えいするための補正係数

$r'$  ; リラクタンス係数で、永久磁石によって生じた起磁力が継鉄および接合部において消費されたりするための補正係数

永久磁石としてはALNICO-5を使用し、その動作点

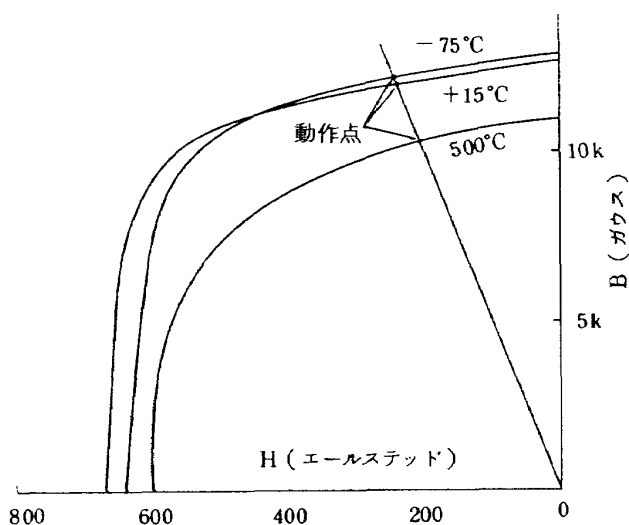


図4 ALNICO 5 減磁曲線の温度特性及び動作点

は次の理由により図4に示す近傍を使用する。

- (イ) 永久磁石の周囲温度変化に伴う不可逆減磁を防ぐ。
- (ロ) パーミアンス係数を高くし(長い磁石), 時間変化を小さくする。
- (ハ) 逆磁界(外部からの逆方向磁界)による不可逆減磁を防ぐ。
- (ニ) レラクタンスの変化による不可逆的減磁が起こらない。

まず, 予め定めた設計目標形状の  $l_g$ ,  $S_g$  及び図3に示す設計目標出力  $F$  を与え, 式(3), (4)を用いて, この時の磁束密度  $B_g$  及びコイルの起磁力  $F_c$  の組を求める。次に, 設計点における  $B_d$ ,  $H_d$  及び(5)式を用いて, 上に求めた  $F_c$ ,  $B_g$  の組に対応する永久磁石の形状  $S_m$ ,  $L_m$  を求める。いくつかの  $F_c$  のうちから, 次に述べるコイルの設計の観点から1つを決定し, 最終的に  $S_M$ ,  $L_M$  が求まる。表2にこのようにして決めた  $S_M$ ,  $L_M$  及び設計目標形状から決めたトルクモータの主要形状, 及び重量の実測値を示す。

表2 試作トルクモータ主要形状, 重量

型		I	II	III	IIA
外形	A	26	35	43	36
	B	29	38	40	39
	C	22	26	28	27
空隙 (mm) (mm <sup>2</sup> )	$l_g$ (平均)	0.46	0.61	0.54	(0.5~0.7)
	$S_g$	70	128	187	120
永久磁石 (mm) (mm <sup>2</sup> )	$L_M$	19	23	26	23
	$S_M$	46	72	105	72
アーマチャー (mm)	A	10	16	17	15
	B	32	38	46	40
	C	3.1	3.6	4.5	3.5
	D	21	23	27	23
重量 (gr)		105	193	280	204

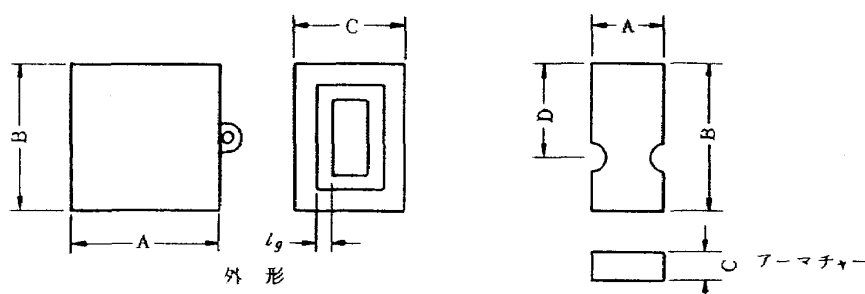


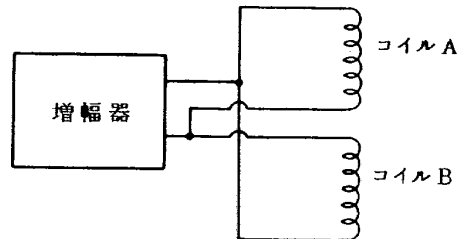


表3 コイル諸元

型 項 目	I	II	III	IIA
片側起磁力(AT)	40 (40)	125 (50)	128 (60)	85 (100)
定格電流(mA)	175	175	175	250
ターン数	231 (229)	716 (285)	732 (343)	340 (400)
コイル平均値(mm)	46	65	69	69
抵抗値( $\Omega$ )	18.8 19.2 並列	60.9 60.8	65.3 64.3	17.8 18.0
導体径(mm)	0.120	0.140	0.140	0.170

上段：製作値

下段：設計計算値



## (3) コイルの設計

次に、コイルに流す最大電流を I, II, III型について 175mA, IIA型については 250mA と決め、(2)で求めた  $F_c$  の値のうちから、予め定めた設計目標形状内に納まるような(コイルのターン数が適当であること)  $F_c$  をえらぶ。このようにして求めたコイルの諸元を表3に示す。なお、コイルは表3の下部に示したように A, B 2つのコイルを並列に配置した。

## (4) トーションスプリングの設計

I, II, III型のものでは、トーションスプリングを円形にすると I 型のもの直径が 1mm 程度になり、加工精度、ヒステリシス等の点で問題があると考え、十字形のものとした。しかし、IIA型ものは直径が 2mm になるので、加工時の残留ひずみの少ない円形とした。トーションスプリングは左右に同形のものがついているので片側で考えると同一トルクでたわみ角を 2 倍として計算する。十字形トーションスプリングは長方形断面のものが 2 個重なった構造なので、たわみ角をさらに 2 倍にして長方形断面の式を用いる。

円形断面トーションスプリング、長方形断面トーションスプリングのたわみ角、せん断応力、エネルギーは以下の式で表わされる(図5参照)。

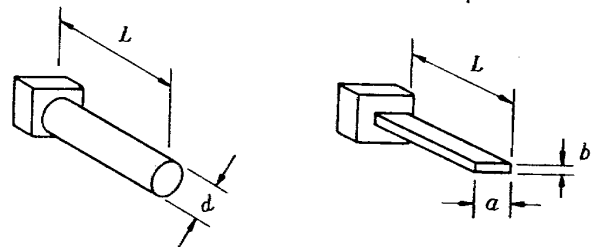


図5 トーションスプリング形状

円形断面

$$\phi = \frac{32\tau L}{\pi d^4 G}$$

$$\tau = \frac{16T}{\pi d^3}$$

$$U = \frac{\tau^2}{4G}$$

長方形断面

$$\phi = \frac{TL}{K_2 ab^3 G}$$

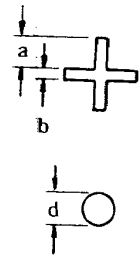
$$\tau = \frac{T}{K_1 ab^2}$$

$$U = \frac{K_3 \tau^2}{G}$$

設計目標特性(図3)より、35%電流時における無負荷時の変位とトルクとの関係が、また予め定めた設計目標形状または表2よりアーマチャーの長さ、トーションスプリングの長さが与えられるから、上式よりトーションスプリングの直径  $d$  又は  $a, b$  の値とせん断応力が表4のように求められる。ただし材料は SUS を用いるものとし、横弾性係数  $G$  は  $7.5 \times 10^3 \text{ kg/mm}^2$  とした。

表4 トーションスプリングの応力

型	出力 (kg)	変位 (mm)	たわみ角 (rad)	せん断応力 (kg/mm <sup>2</sup> )	形状 (mm)
I	0.39	0.15	0.0077	6.1	$a = 2.9$ $b = 0.65$
II	0.77	0.18	0.0079	5.0	$a = 4.1$ $b = 0.85$
III	1.15	0.20	0.0076	5.4	$a = 4.9$ $b = 1.0$
IIA	0.77	0.18	0.0079	7.3	$d = 2.0$



## (5) 共振周波数

図6を参考として、トルクモータの共振周波数を求める。トルクモータの発生トルクは入力電流に比例する。

$$T = c_1 l i \quad (c_1 \text{は定数})$$

無負荷時入力電流  $i$  と変位角  $\phi$  との間には、ダンピングが無いものとし、以下の式が成立つ。

$$T - T' = I \frac{d^2 \phi}{dt^2} \quad (6)$$

$$c_1 l i - K \phi = I \frac{d^2 \phi}{dt^2} \quad (7)$$

(7)式をラプラス変換して

$$\phi(s) = \frac{c_1 l}{K} \frac{1}{(I/K)s^2 + 1} i(s) \quad (8)$$

無負荷時のトルクモータの共振周波数  $f_r$  は

$$f_r = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{I}} \quad (9)$$

となる。ただし

$$I = \frac{\rho}{12} a b c (b^2 + c^2), \quad K = \frac{4k_2 a b^3 G}{L} g$$

であるから各型の共振周波数の計算値が表5に示すように求められる。

## (6) 材料の選定

表6に主要部品の材料を示す。永久磁石としては、次の理由によりすべてALNICO-5を使用した。

- (イ) 残留磁束密度が大きい
- (ロ) キュリー温度が高い(温度係数が小さい)
- (ハ) 機械的強度が大である

アーマチャー、継鉄用の磁性材料としては、I、II、III型には純鉄に近いJIS-C-2504を、また、IIA型では

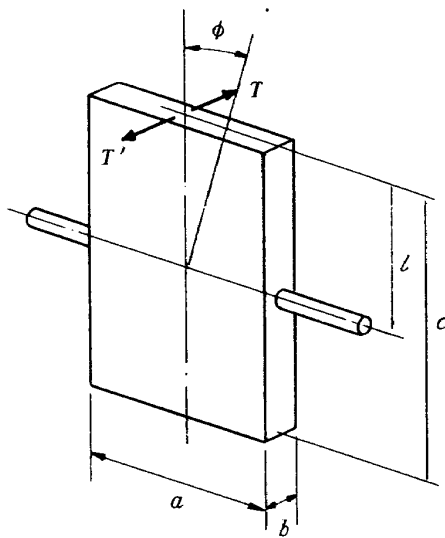


図6 アーマチャー

表5 トルクモータの周波数特性

型	I	II	III	IIA
項目				
共振周波数(実測値)	650 Hz	700 Hz	570 Hz	450 Hz
共振周波数(計算値)	737 Hz	595 Hz	548 Hz	767 Hz
30 Hzでの位相差 (実測値)	-15°	-20°	-26°	-45°
30 HzでのGAIN (実測値)	-1 dB	≒ 0 dB	-1 dB	-2 dB

表6 試作トルクモータ主要部品の材料

部品名 \ 型	I	II	III	IIA
永 久 磁 石	ALNICO5	ALNICO5	ALNICO5	ALNICO5
アーマチャ	JIS-H-2504 (純鉄)	JIS-H-2504	JIS-H-2504	$S_i - F_e$ (3% 珪素鉄)
継鉄	同 上	同 上	同 上	同 上
トーションスプリング	SUS 304	SUS 304	SUS 304	SUS 304
クレーンク	同 上	同 上	同 上	同 上
コイルボビンケース	(エポキシ)	(エポキシ)	(エポキシ)	アルミ
ギャップ	JIS-H-4000 (高力アルミ合金)	JIS-H-4000	JIS-H-4000	JIS-H-4000

飽和磁束密度が大きく、保持力の小さい3%珪素鉄を使用してヒステリシス特性の改良を図った(表7に各種磁性材料の特性を参考として示す)。次に磁性材料の選定に当たって検討した経過を述べる。

#### (a) 磁性材料保持力の影響

動作点の  $H_d$ ,  $B_d$  より、継鉄、空隙、アーマチャのパーミアンス係数は、 $H_d/B_d = 0.0203$  と求まるから、コイルの起磁力を除いた時にギャップ部に残留する磁束密度は、 $H_c/0.0203 \text{ Gauss}$  と求められる。この磁束密度のヒステリシスへの影響は、コイルの作る磁束密度に対する比で求められる。最大変位( $\pm 0.18 \text{ mm}$ )のときの磁束密度が計算によって  $0.836 \text{ KGauss}$  と求められる。このときのヒステリシスは、 $(H_c/0.0203/836) \times 100 \%$  となる。従って、磁氣的ヒステリシスを2%以下とするためには、 $H_c$  は

$$H_c \leq 0.34 O_e \quad (10)$$

を満たす必要がある。

#### (b) 磁性材料の透磁率

磁気回路の磁気抵抗はそれを構成する材料の透磁率による。空隙の磁気抵抗にくらべて磁性材料の磁気抵抗を十分小さく、 $1/100$  以下とするには、

$$\frac{l_g}{\mu_o S_g} \frac{1}{\mu_o} \frac{1.2 \text{ mm}}{120 \text{ mm}^2} < \frac{1}{\mu} \frac{l}{S_{\min}} \times \frac{1}{100}$$

ただし、 $l$  は磁路長、 $S_{\min}$  は磁路最小面積  
即ち、

$$\mu > 11670 \mu_o \quad (11)$$

となる。

#### (c) 磁性材料の抵抗率

磁性材料の抵抗率は高周波特性に影響する。抵抗率が

大きい程うず電流損が大きくなるので抵抗率は小さい方がよい。トルクモータでの応用の場合、使用周波数は低いのであまり大きな影響はない。

#### (d) 磁性材料のキュリー温度

一般にキュリー温度が高い程、温度に対する影響(各磁性特性の温度係数)が少ない。

#### (e) 飽和磁束密度

トルクモータ用磁性材料として必要な飽和磁束密度を求める。磁束密度が最も大きくなるのは、コイルによる磁束と永久磁石による磁束とが合わさる空隙部と考えられる。まずコイルによる磁束は、

$$\Phi_c = \frac{F_c}{R_c} = \frac{400 \times 2 \times 0.25}{\frac{1}{\mu_o} \frac{l_g}{S_g}} = 2.51 \times 10^{-5} (W_b)$$

磁束密度が最大になるのはアーマチャ部( $15 \times 3.5 \text{ mm}^2$ )で

$$B_c = 2.51 \times 10^{-5} / (15 \times 3.5 \times 10^{-6}) = 0.478 (W_b/\text{m}^2) \\ = 4.78 \text{ KGauss}$$

空隙部では、

$$B'_c = 2.51 \times 10^{-5} / (8 \times 15 \times 10^{-6}) (W_b/\text{m}^2) \\ = 2.09 \text{ KGauss}$$

次に、永久磁束による磁束は、

$$\Phi_M = B_d \cdot S_M = 8.60 \times 10^{-5} (W_b)$$

空隙部での磁束密度は、

$$B_M = 2 \times \Phi_M / S_g = 14.3 \text{ KGauss}$$

故に空隙部での最大磁束密度は、

$$B = B_M + B'_c = 14.3 + 2.09 = 16.39 \text{ KGauss} \quad (12)$$

となり、 $17 \text{ KGauss}$  以上の飽和磁束密度が必要となる。

以上の結果より磁性材料として、IIA型においては、3%珪素鉄を使用した。

表7 磁性材料の特性比較

	主成分	名称	初期透磁率 $\mu_i$	最大透磁率 $\mu_m$	飽和磁束密度 $B_s$ (kG)	保磁力 $H_c$ (Oe)	抵抗率 $\rho$ ( $\mu\Omega$ -cm)	キュリー温度 $T_c$ (°C)	密度 $D$ (g/cm <sup>3</sup> )	備考
$F_e$		純鉄	300	8000	21.5	0.8	11	770	7.86	
$S_i - F_e$	1% $S_i$	1%珪素鉄	400	10000	21.0	0.4	25	770	7.8	
$S_i - F_e$	3% $S_i$	3%珪素鉄	1000	30000	20.0	0.3	45	750	7.65	
$Al - F_e$	16% $Al$	16-Alfenol	5900	57000	8.0	0.025	140	400	6.5	
$C_o - F_e$	2% $V$ 49% $C_o$	Permendur	650	6000	24.0	2.0	28	980	8.15	熱間加工
$C_o - F_e$	2% $V$ 49% $C_o$		1200	11000	24.0	0.8	28	980	8.15	熱間加工
$N_i - F_e$	5% $C_u$ 2% $C_r$ 77% $N_i$	Mumetal	25000	80000	7.0	0.02	60	350	8.62	
$N_i - F_e$	45% $N_i$	45 Permalloy	4500	60000	15.0	0.08	45	450	8.25	
$N_i - F_e$	50% $N_i$	Deltamax	600	100000	15.5	0.1	40	500	8.25	
$N_i - F_e$	5% $M_o$ 79% $N_i$	Supermalloy	100000	500000	8.0	0.007	60	410	8.25	

16	NAME PLATE	
15	BLOCK	
15	BLOCK	
15	BLOCK	
15	BLOCK	
14	デフロン熱収縮チューブ	
13	RIVET	
12	SCREW	
11	SCREW	
10	SCREW	
9	OUTPUT NUT	
8	CAP (TOP)	
7	CAP (BOTTOM)	
6	MAGNET	
5	COIL (LOWER)	
4	COIL (UPPER)	
3	CASE (RIGHT)	
2	CASE (LEFT) ASS'Y	
1	TORQUE MOTOR ASSY	
符号	名	称

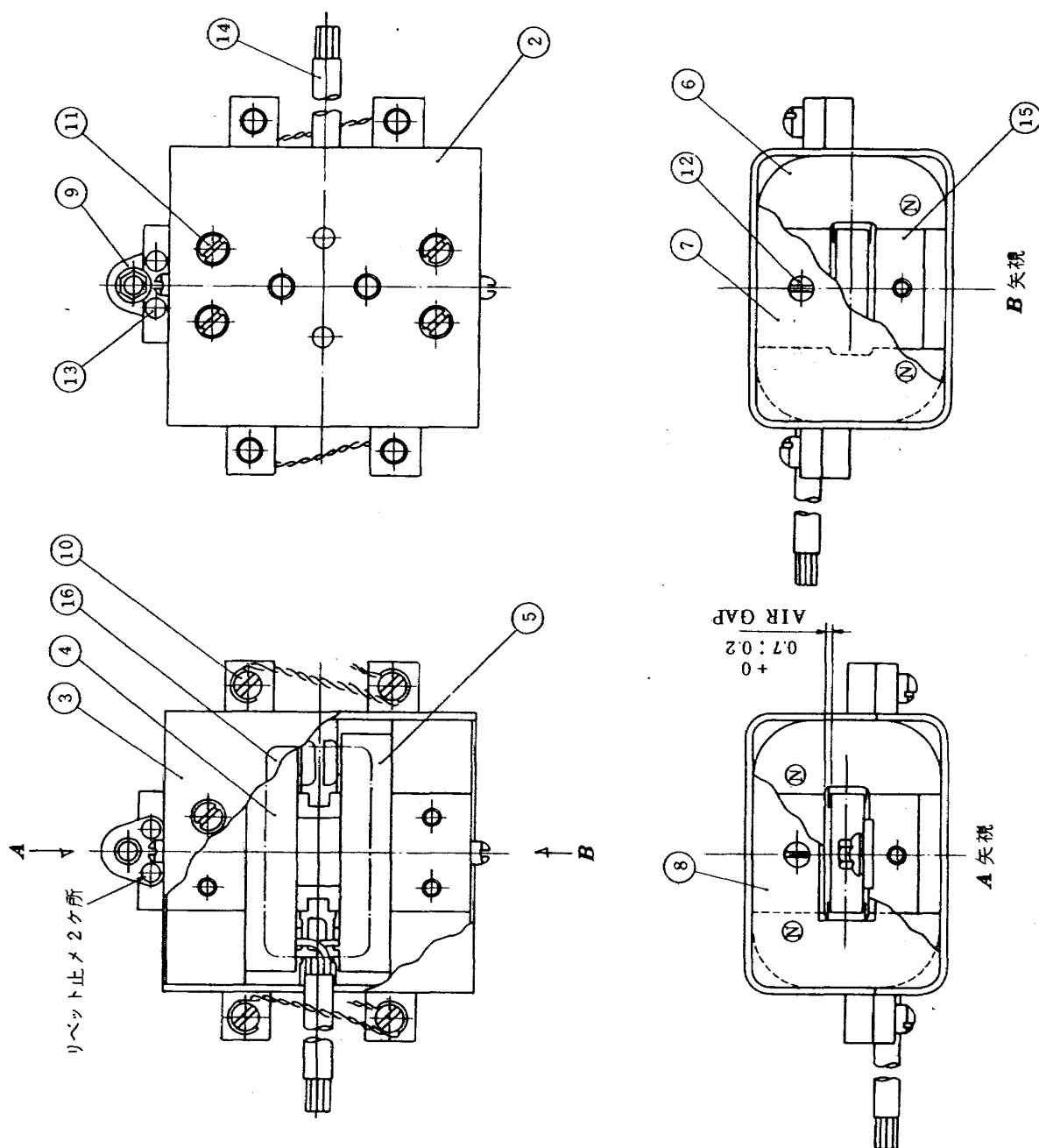
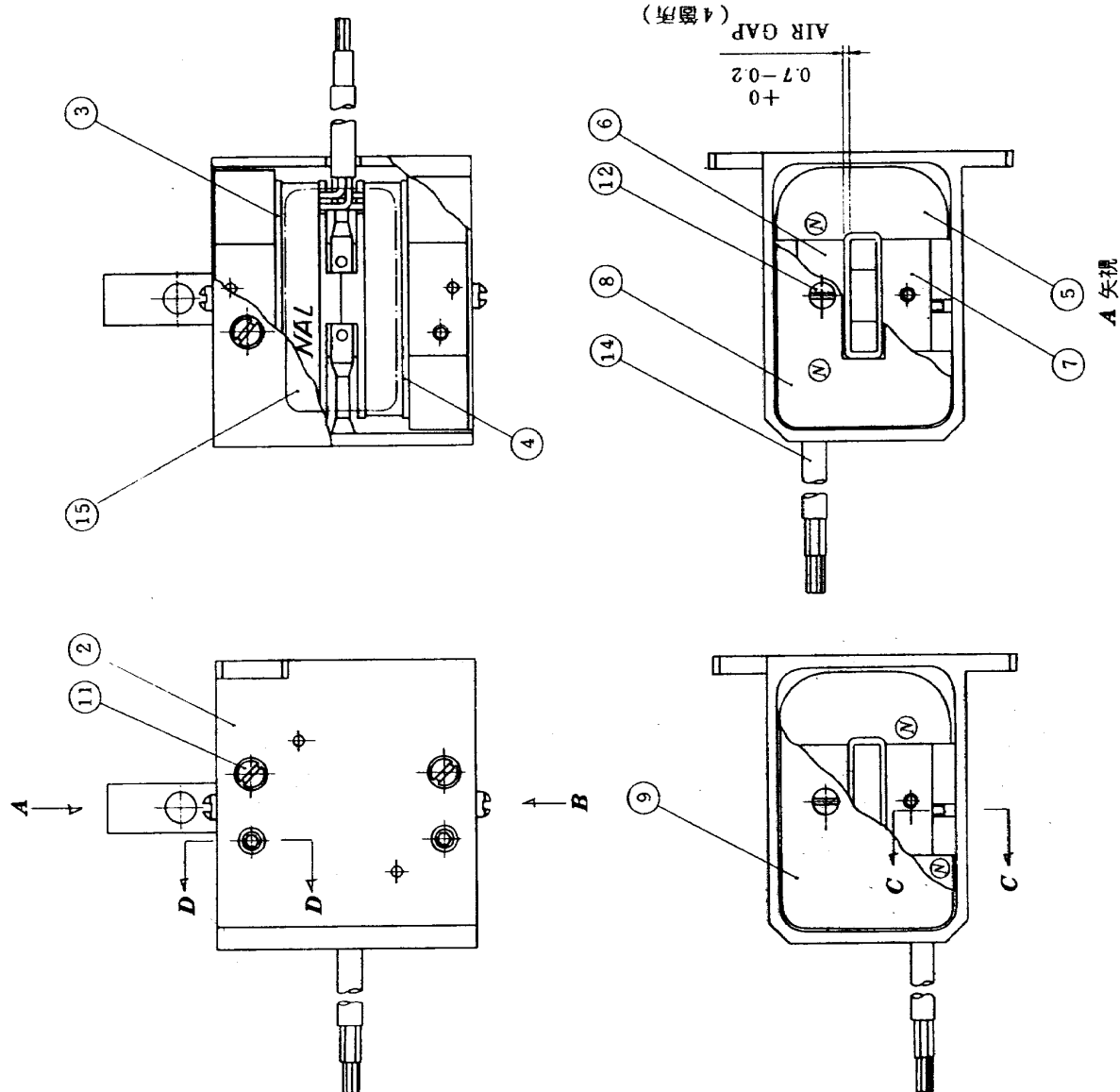


図7 トルクモータ組立図 (Ⅱ型)

符号	名	称
1	TORQUE MOTOR ASS'Y	
2	TORQUE MOTOR SUB-ASS'Y	
3	COIL ASS'Y (UPPER)	
4	COIL ASS'Y (LOWER)	
5	MAGNET	
6	BLOCK-2	
6	BLOCK-2	
6	BLOCK-2	
7	BLOCK-1	
7	BLOCK-1	
7	BLOCK-1	
7	BLOCK-1	
8	CAP (TOP)	
9	CAP (BOTTOM)	
10	PIN-1	
11	SCREW	
12	SCREW	
13	SET SCREW	
14	テフロン熱収縮チューブ	
15	NAME PLATE	



D-D 断面 (2/1)

C-C 断面 (2/1)

#### 4. 製 作

図7, 8にⅡ, ⅡA型の組立図を示す。また図9にⅠ, Ⅱ, Ⅲ型トルクモータ外観を, また図10, 11にⅡA型トルクモータの外観, アーマチャー, 電磁石及び永久磁石を示す。Ⅰ, Ⅱ, Ⅲ型ではケーシングは板金加工としたが加工精度が悪く中立点においてアーマチャーが継鉄の一方に付着するスティックを起こしたり, 出力特性の電流に対する対称性が悪かったため, ⅡA型ではケーシングは一体物の削り出し加工とした。また継鉄, アーマチャー等の磁性材料は, ヒステリシス特性の改良のために, ⅡA型では水素雰囲気中で熱処理を行うことにより機械加工による歪とりを行った。トーションスプリング, 継鉄等は銀ろう付けによりケーシングに付着した。Ⅰ, Ⅱ, Ⅲ型のコイルは, 予め矩形にコイル巻きをした後, エボキシで固めたが, ⅡA型ではアルミニウムのボビンケースを削り出して製作し, これに巻いた。

なお, Ⅰ, Ⅱ, Ⅲ型のコイルの巻数(ターン数)については, リークageや製作誤差による出力不足が予想されたので, 設計法の確定のためのデータ収集試験を考慮して, 設計計算で求めたターン数よりかなり多いターン数で製作した(表3)。また, ⅡA型の設計計算では出力2.2 kg, コイルの起磁力を片側で100 ATとしたが, その時点でのエンジン制御装置側からの要求により出力1 kg以上で充分と見なし, 最終製作時の目標出力を1.2 kg, 片側のコイルの起磁力を85 ATとして製作した。コイルの起磁力は, アルミ製のボビンケースの肉厚を増してターン数を340に減らすことによって達成した。他の部分の形状寸法は設計計算で求めたとおりである。従って, もし $r, r', \beta$ 等の値が設計計算時に仮定した値とすれば, 試作したトルクモータの出力は, 目標性能から大きくずれることになるが, これについては後で検討する。なおⅡA型については, ターン数を400にすることによって容易に出力2.2 kgに変更できる。

#### 5. 性 能

##### (1) 特性試験

トルクモータの主要特性である入力電流対無負荷変位特性, 入力電流対中立点における出力特性, 周波数応答特性試験及び耐振動, 衝撃試験を行った。図12に試験用治具取付図を示す。また表8に試験に用いたアーマチャーの非接触変位計, 出力測定用のロードセルの主要特性を示す。入力電流対無負荷変位特性については図13に示す配線で緑-黄リード線のコイル, 赤-白リード線のコイルの両方に, 又はいずれか一方をはずして残りの一方

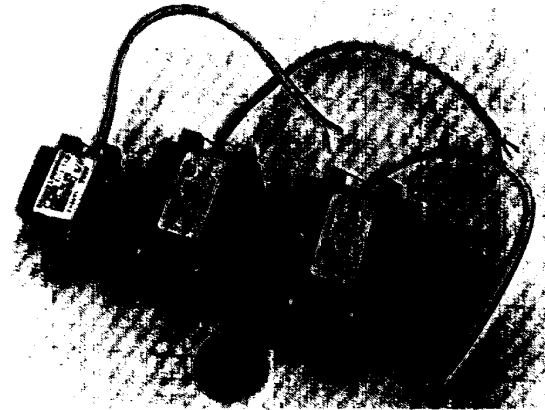


図9 試作トルクモータ (左よりⅠ, Ⅱ, Ⅲ型)

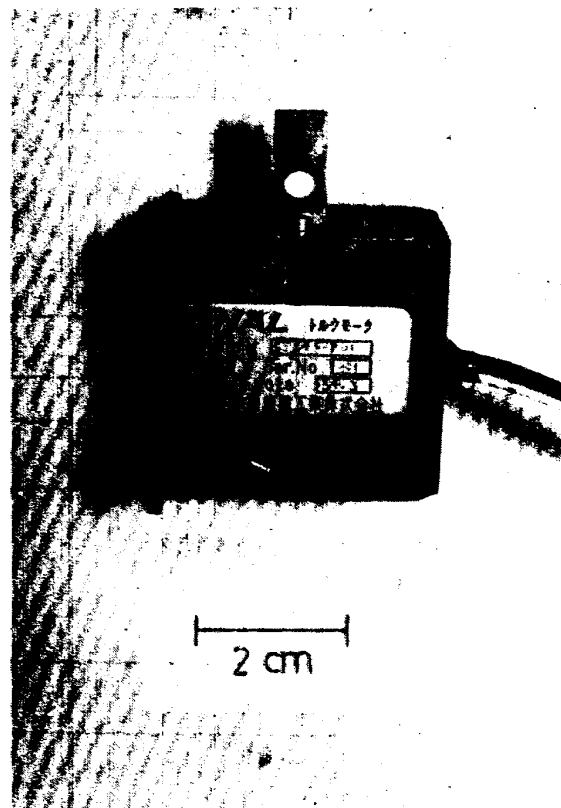


図10 試作トルクモータ(ⅡA型)

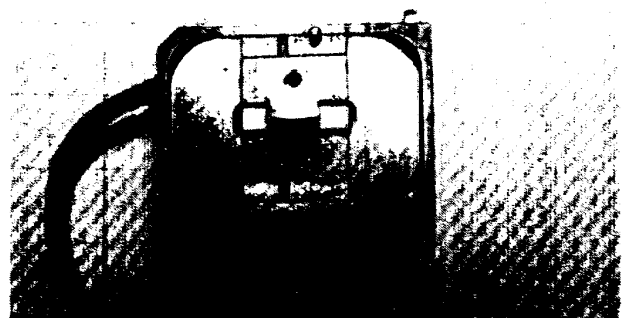


図11・ⅡA型トルクモータのアーマチャー, 永久磁石

だけに  $0 \rightarrow \max \rightarrow 0 \rightarrow -\max \rightarrow 0$  の順に電流を流して測定した。試験は室温及び  $-54 \pm 5^\circ\text{C}$ ,  $0 \pm 5^\circ\text{C}$ ,  $50 \pm 5^\circ\text{C}$ ,  $120 \pm 5^\circ\text{C}$  に保ったシリコンオイル中に10分間浸した後における特性を調べた。図14～25, 表9に試験結果を示す。

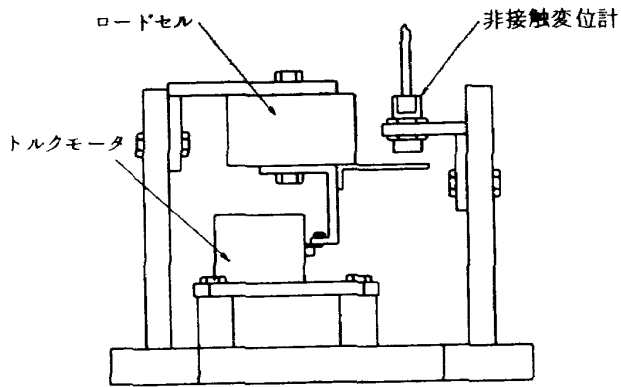


図12 トルクモータ特性試験計測台

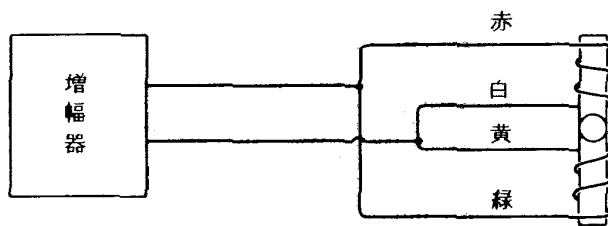


図13 トルクモータ接続図

表8 変位計及びロードセルの特性

(a) 変位計

型 式	エディカレント型非接触変位計
測定範囲	0 ～ 2.54 mm
測定精度	0.01 % フルスケール
繰返し精度	0.01 % フルスケール
周波数応答	0 ～ 50 KHz (－3dB)
直 線 性	0.5 % 以下

(b) ロードセル

型 式	半導体歪ゲージ
測 囲	0 ～ 25 ポンド (引張り, 圧縮)
分 解 能	無 限
ヒステリシス	0.1 % フルスケール
直 線 性	0.5 % フルスケール
繰返し精度	0.1 % フルスケール

表9 試作トルクモータの性能

項 目 \ 型		I	II	III	IIA
出 力 (kg)	定 格	0.67 (1.1)	2.4 (2.2)	2.6 (3.3)	1.0 (2.2)
	35%電流	0.26 (0.4)	1.0 (0.78)	1.2 (1.16)	0.52 (0.78)
変 位 (35%電流) (mm)		— (0.15)	0.20 (0.18)	0.26 (0.20)	0.16 (0.18)
消 費 電 力 (W)	定 格	1.16	3.66	3.96	2.26
	35%電流	0.28	0.88	0.94	0.28
コイル抵抗 (Ω)		19	60	65	18
ヒステリシス (%)		15.5	6.1	7.9	3.0
共振周波数 (Hz)		650 (737)	700 (595)	570 (548)	450 (767)

上段;実測値

下段;設計計算値



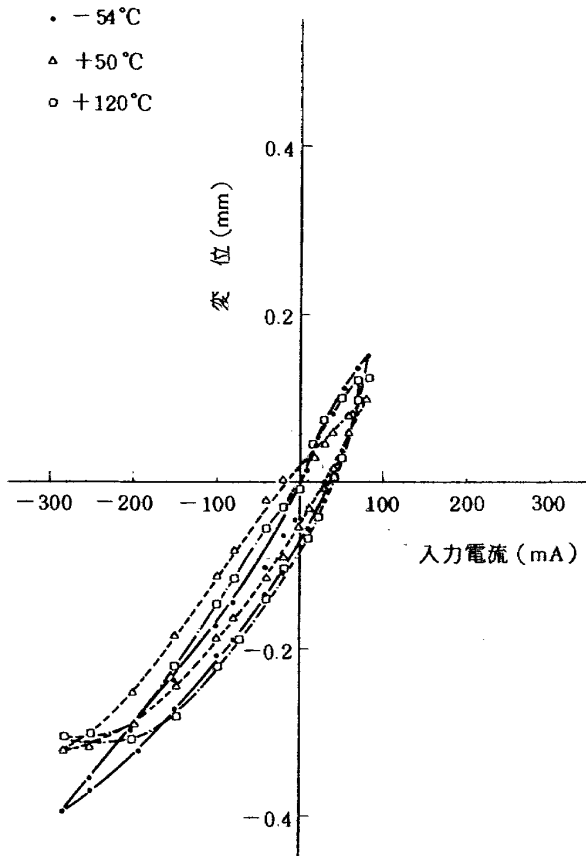


図 14 I 型 入力電流対無負荷変位特性 (両側コイル)

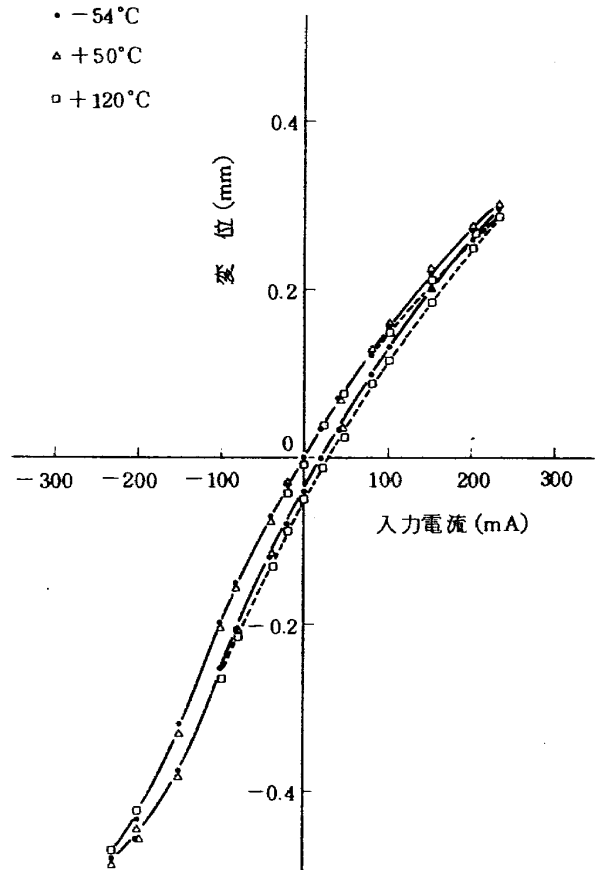


図 16 II 型 入力電流対無負荷変位特性 (両側コイル)

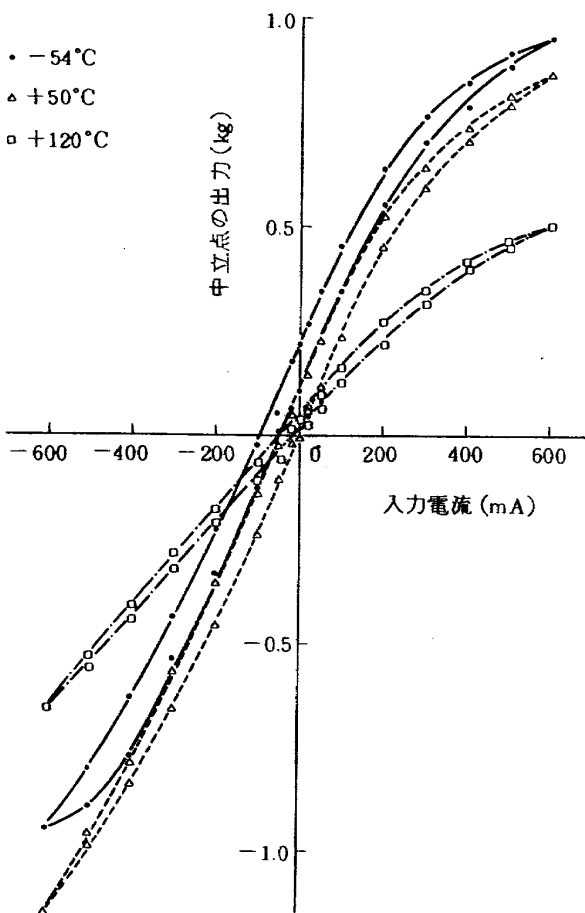


図 15 I 型 入力電流対中立点における出力特性

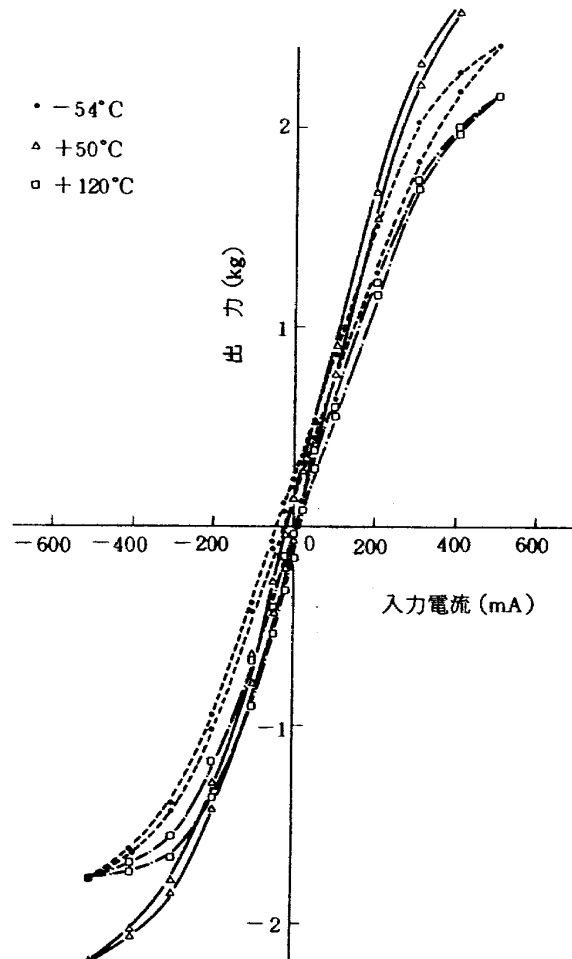


図 17 II 型 入力電流対中立点における出力特性

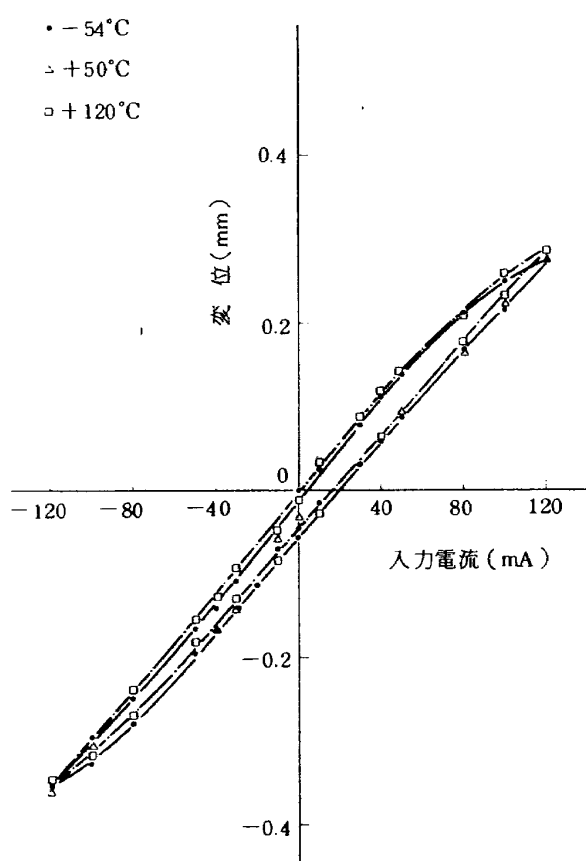


図18 III型 入力電流対無負荷変位特性 (両側コイル)

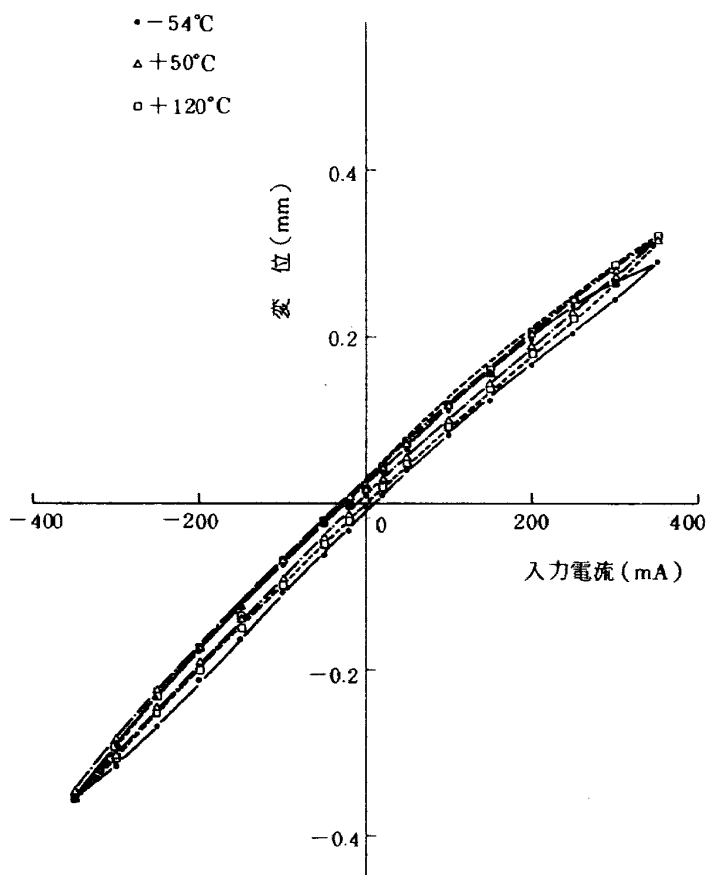


図20 II A型 入力電流対無負荷変位特性 (両側コイル)

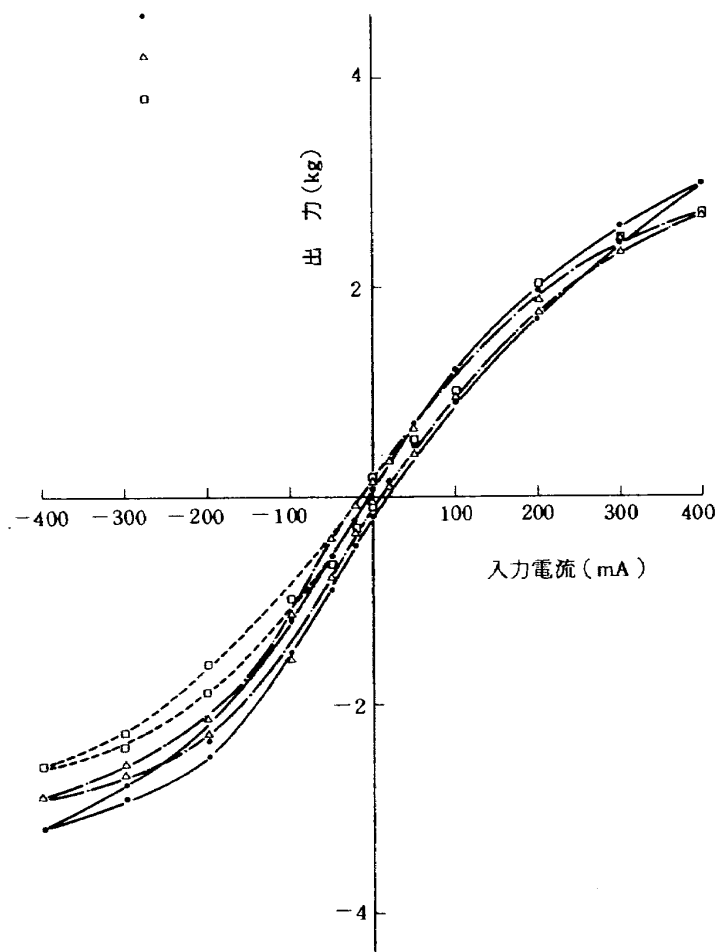


図19 III型 入力電流対中立点に於ける出力特性 (両側コイル)

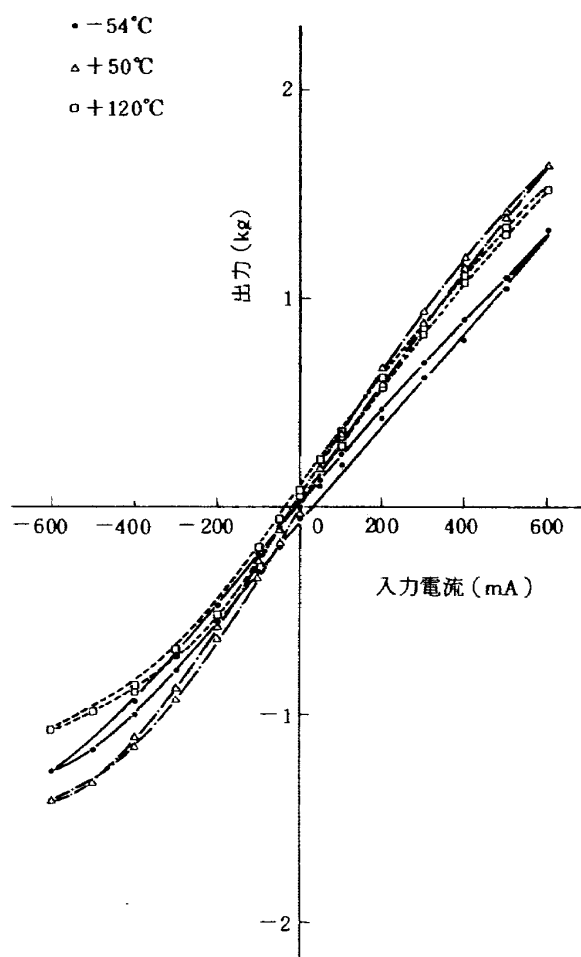


図21 II A型 入力電流対中立点に於ける出力特性 (両側コイル)

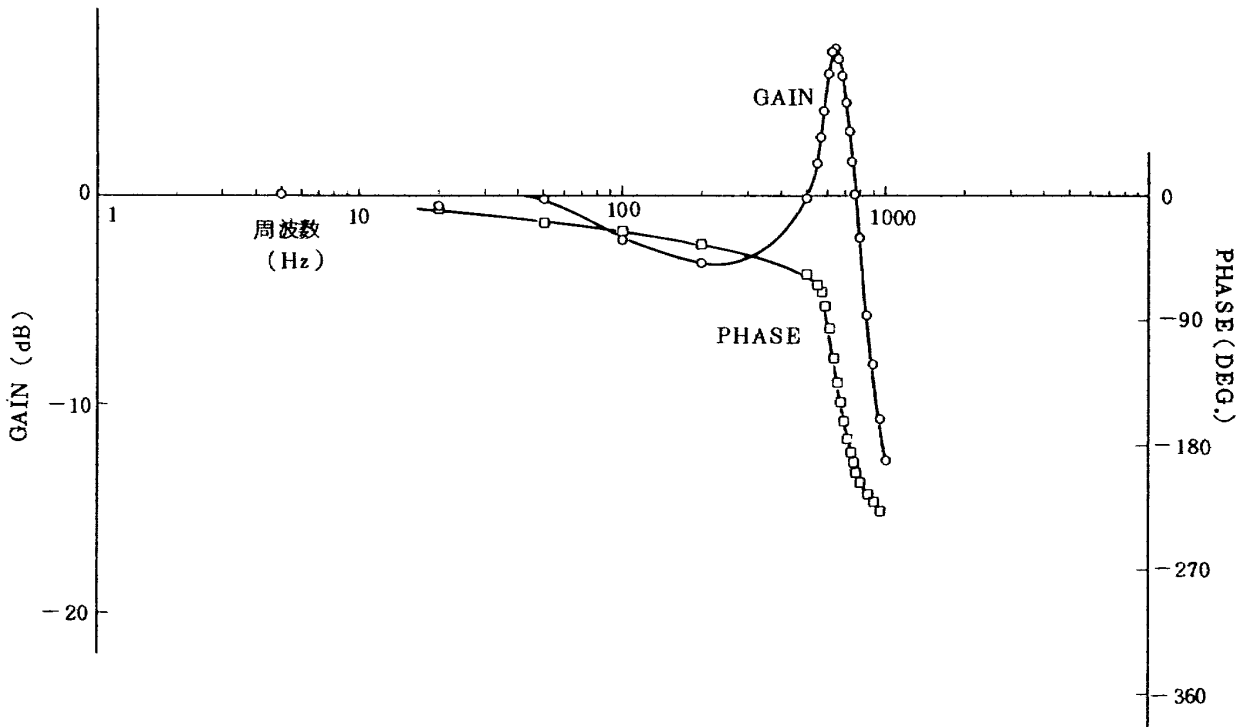


図 22 周波数応答試験 (I 型)

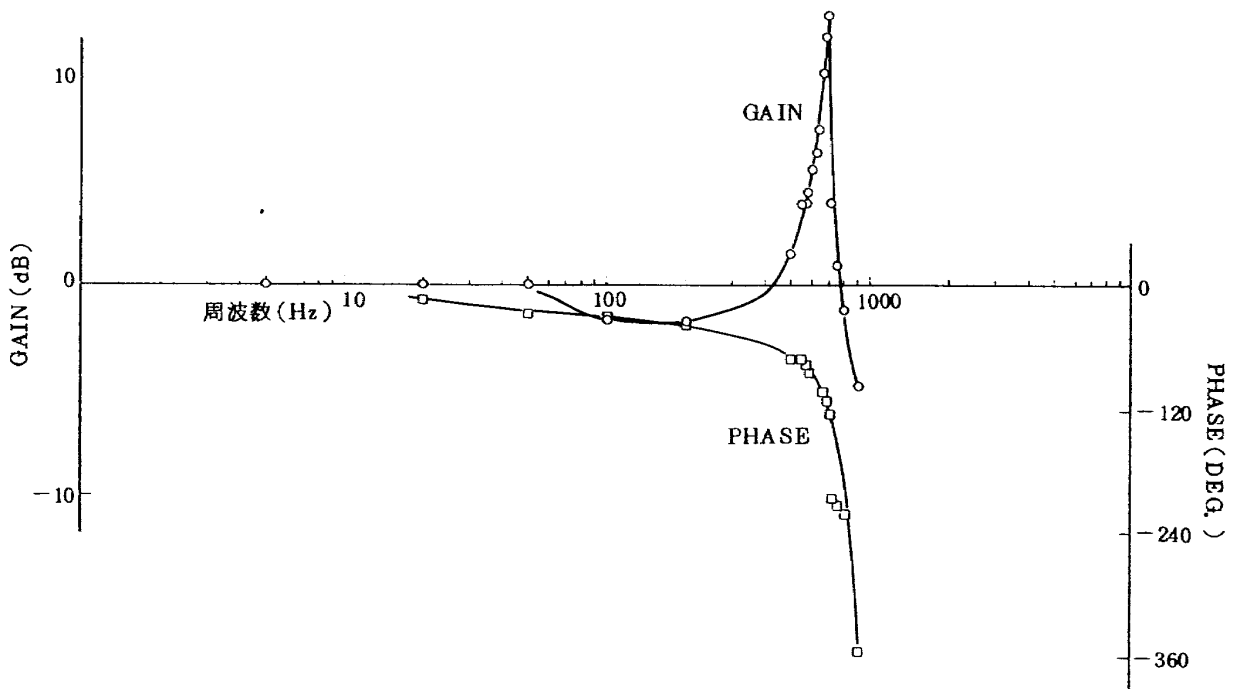


図 23 周波数応答試験 (II 型)

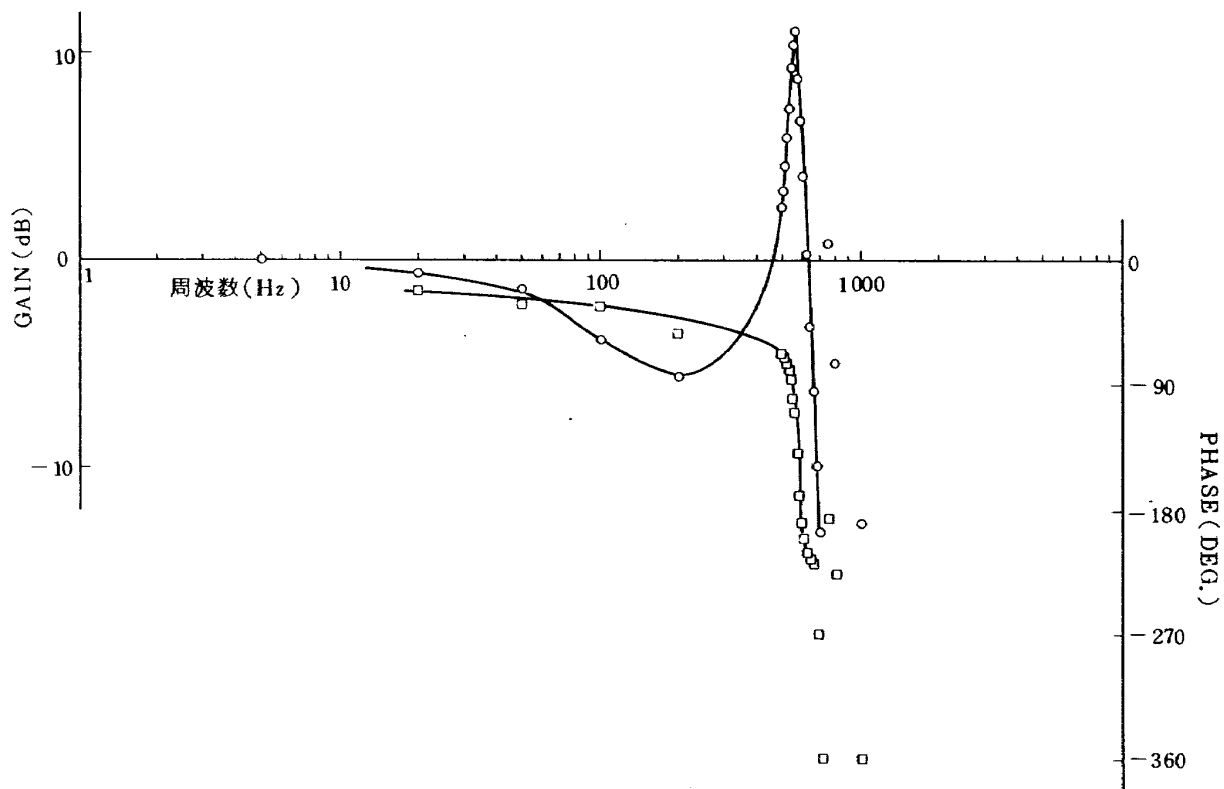


図24 周波数応答試験(Ⅲ型)

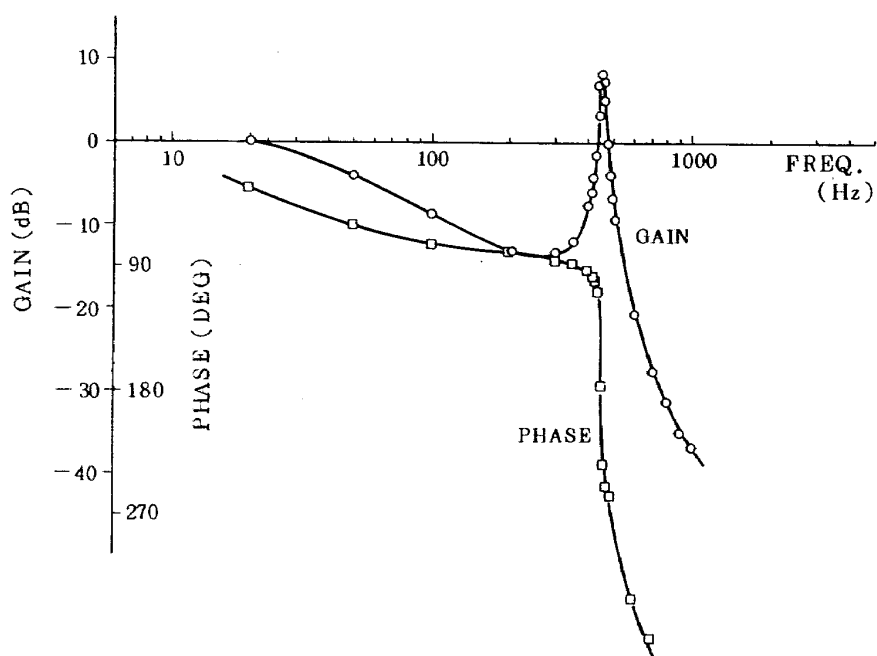


図25 周波数応答特性(ⅡA型)

## (2) 追加試験

特性試験の結果、後に述べるように、特にⅠ、Ⅱ、Ⅲ型のヒステリシス特性が悪いことと、全体にコイルのターン数の割には出力が小さいことが判明した。この原因を探るために、永久磁石及びコイルによる空隙部の磁束密度と、トーションスプリング単体のヒステリシス特性の測定を行った。

## (i) 永久磁石による空隙部磁束密度の測定

永久磁石のN極から発した磁束は、継鉄部では直角に曲がり、空隙、アーマチャー、空隙と通り、継鉄を経て再び永久磁石のS極にもどる。この経路において磁束の相当な部分が漏洩磁束として外部に洩れるため、空隙部の磁束密度はそのぶんだけ減り、出力も低下する。また、磁気回路中の接合部等において起磁力の損失が生じる。磁束の洩れ（リーケージ）は、(5)式のリーケージ係数 $r$ で、起磁力の損失はリラクタンス係数 $r'$ で表わされる。設計段階では、 $r$ 、 $r'$ の正確な値が知られていなかったために、 $r=2$ 、 $r'=1.3$ と仮定した。そこで、 $r$ の正確な値を得るために、Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ型と同じ起磁力の永久磁石を用いて、図26中に示す形状の模型を3個製作し、ガウスメータを用いてA、B、C点における空隙部の磁束密度を計測した。図26～29にその結果を示す。この結果と(5)、(6)式から $r$ 、 $r'$ を求め、表10に示した。これより、通常の精密磁気回路に用いられている $r=2$ の値に比べ、約1.4～1.9倍大きく、 $r'=1.33$ に比べ1.9～2.4倍大きいことが判明した。

表10 リーク係数及びリラクタンス係数

係数 \ 型	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ
$r$	3.65 (2.0)	3.85 (2.0)	2.78 (2.0)
$r'$	3.09 (1.3)	2.46 (1.3)	2.58 (1.3)
$\beta$	0.90 (0.77)	0.88 (0.77)	0.67 (0.77)

上段；実測値

下段；設計使用値

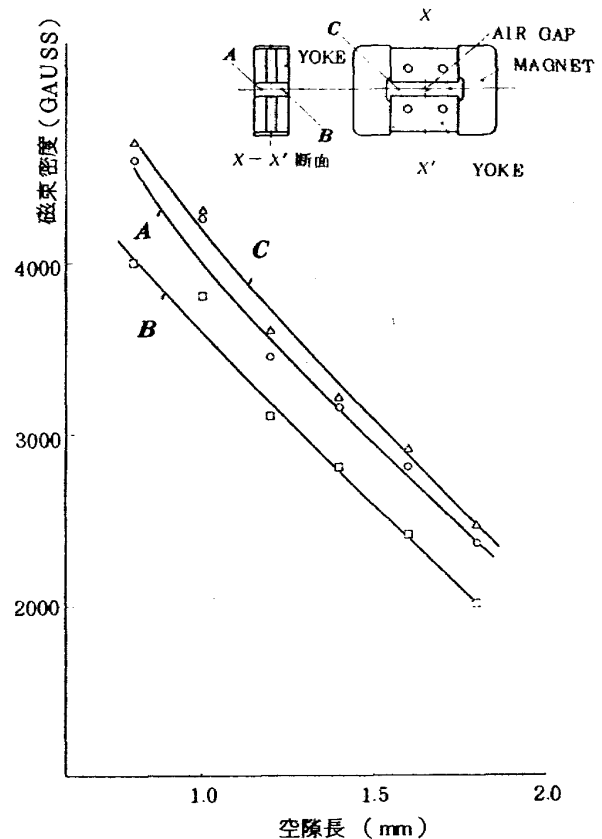


図26 永久磁石による空隙部の磁束密度（Ⅰ型）

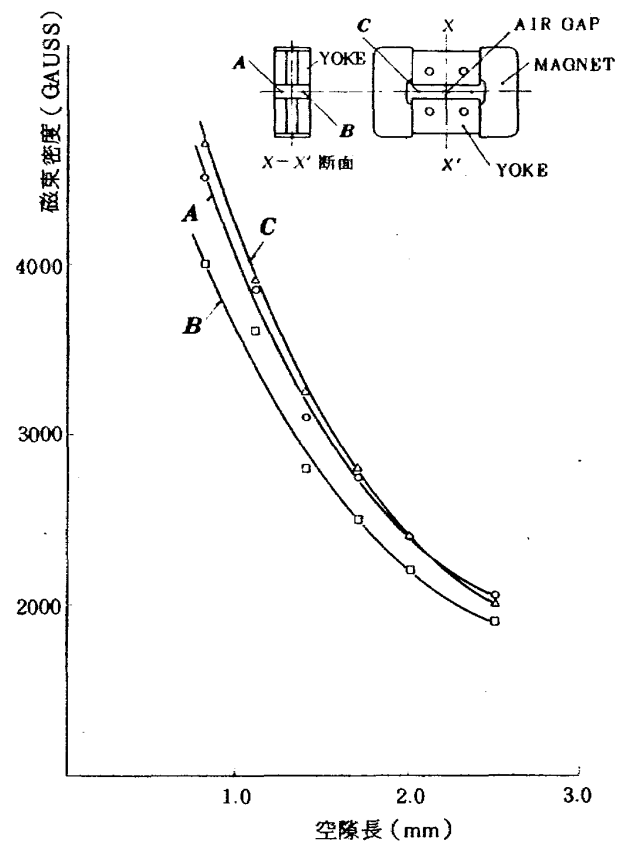


図27 永久磁石による空隙部の磁束密度（Ⅱ型）

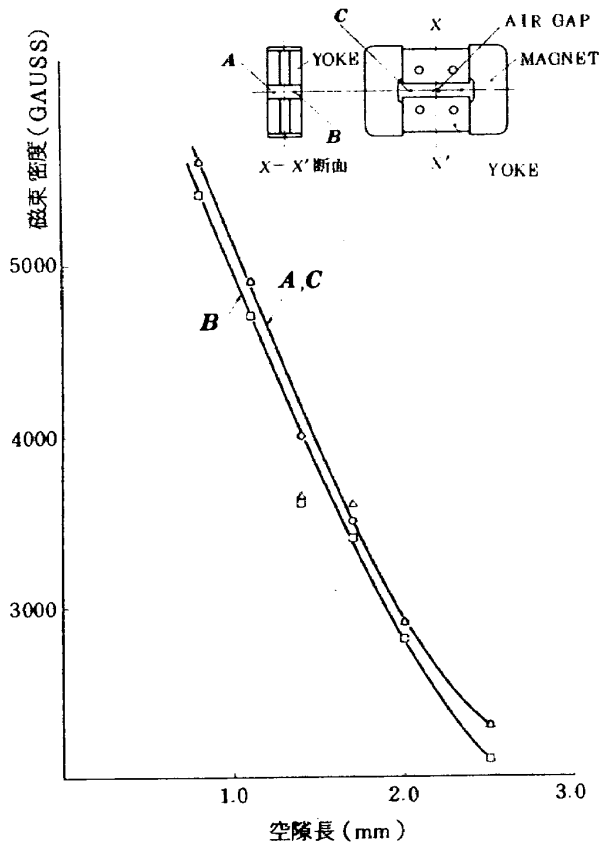


図28 永久磁石による空隙部の磁束密度 (Ⅲ型)

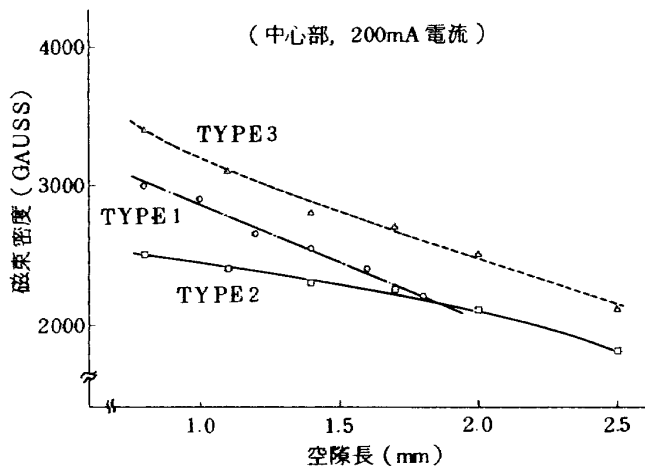


図29 永久磁石による空隙部の磁束密度

## (ii) コイルによる空隙部磁束密度の変化

コイルより発生した磁束は、アーマチャーから流出して空隙を経て上下の継鉄に流入し、ケーシングの内側に張った磁気案内路を通してトルクモータの反対側の継鉄に達して空隙に放出され、再びアーマチャーにもどる。その過程で一部の磁束が洩れる。磁束の洩れは、(3)式中の $\beta$ で表わされる。設計段階では $\beta = 0.77$ と仮定した。 $\beta$ の正確な値を求めるために、図30に示すような形状寸法がそれぞれⅠ, Ⅱ, Ⅲ型と同じコイルとアーマチャー、空隙部を製作した。空隙部と電流を変えて空隙部の磁束

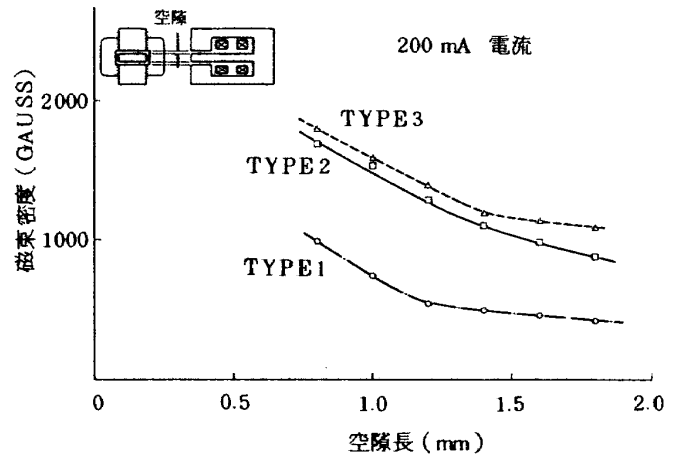


図30 コイルによる空隙部の磁束密度 (GAPを変化させた場合)

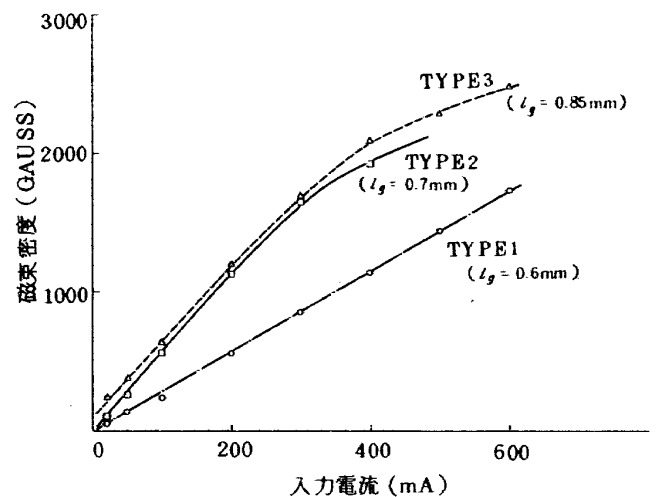


図31 コイルによる空隙部の磁束密度 (入力電流を変化させた場合)

密度を測定した。測定結果を図30, 31に示す。この結果と(3)式を用いて $\beta$ の値を求め、表10に示す。この結果、 $\beta = 0.77$ にくらべて各型によって、約0.9～1.2倍と変わっていることが判明した。

## (iii) トーションスプリングのヒステリシス特性

図12のロードセルを取り外し、トルクモータの出力部をバネ試験機で変位させることができるように、バネ試験機に設置した。変位は非接触変位計により計測する。Ⅱ, Ⅲ型では定格電流時の設計出力の約80%の外力を加え、ⅡA型では約27%, 45%, 68%の外力を加えた。図32～34にⅡ, Ⅲ, ⅡA型のトーションスプリング試験結果を示す。これより、どの型においても定格出力に達しないうちに材料の耐力を越えた応力が生じており、その結果、ヒステリシスが生じていることがわかる。ⅡA型の27%外力においてはヒステリシスが生じていない。なお、図34においてゼロ点におけるヒステリシスが無い結果が得

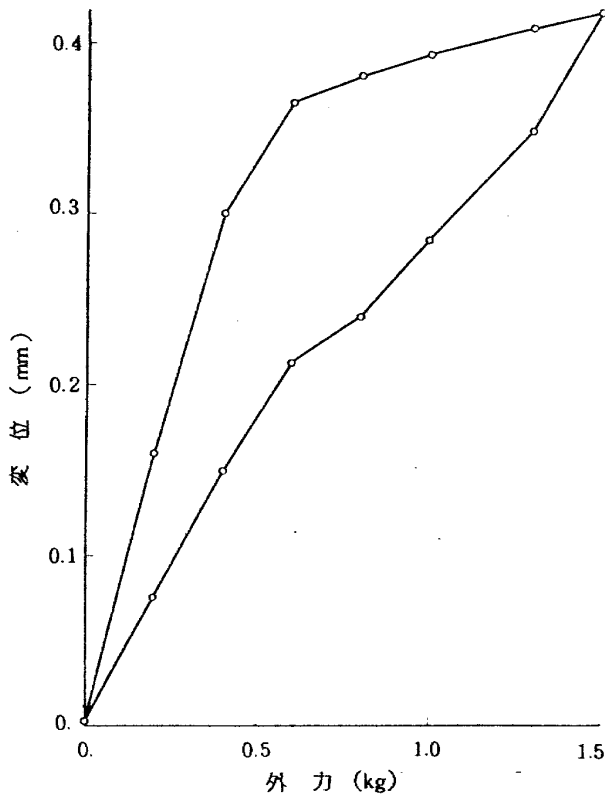


図32 II型 外力対トーションスプリング  
変位特性試験

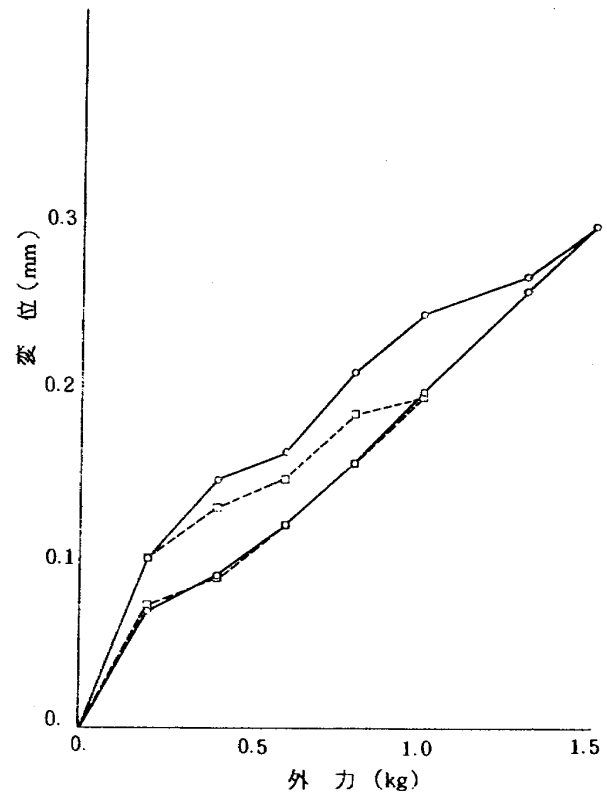


図34 IIA型 外力対トーションスプリング  
変位特性試験

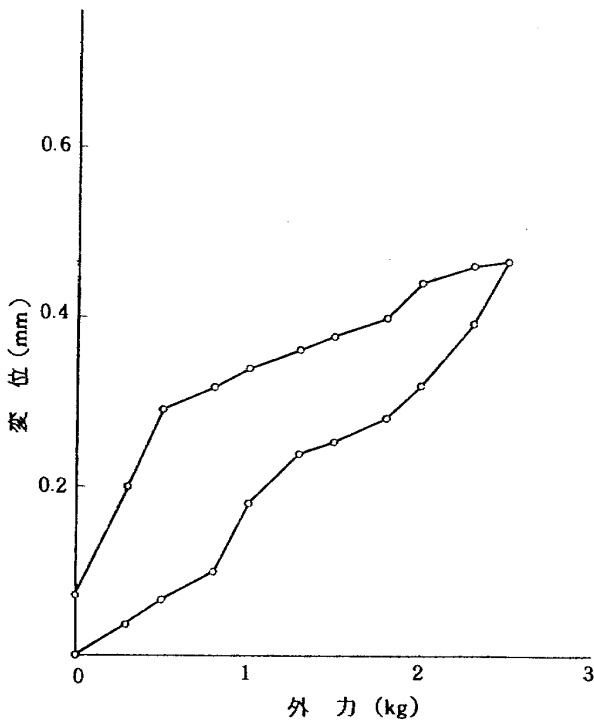


図33 III型 外力対トーションスプリング試験

られているが、これは試験材自体のヒステリシスにより、相殺されたものと推測している。

### (3) 試験結果の検討

性能試験及び追加試験の結果、試作トルクモータの性能について次の事項が明らかとなった。

#### (i) 出力特性

先に述べたように、IIA型を除き実際に試作したトルクモータのコイルの起磁力は、目標出力を得るために設計計算で求めた起磁力よりかなり大きい(表3)。それにもかかわらず、表9に示すように、性能試験の結果得られた出力は、定格電流時において、設計値より小さな値となっており、35%電流時にもそれほど大きくない。出力に影響する要因としては、永久磁石の磁束のリーケージ係数 $\gamma$ 、コイルの磁束のリーケージ係数 $\beta$ 、コイルの起磁力がある。今、設計時における35%電流時出力を $F_d$ 追加試験で判明した実際の永久磁石リーケージ係数と設計時に使用した永久磁石リーケージ係数との比を $C_r$ 、実際に製作したコイルの起磁力と設計計算時のコイル起磁力との比を $C_c$ 、追加試験で得たコイルの実際のリーケージ係数と設計時に用いたコイルのリーケージ係数との比を $C_\beta$ とすると実際に製作したトルクモータの出力 $F_{mg}$ は、

$$F_{mg} = \frac{1}{C_r} \times C_\beta \times C_c \times F_d \quad (12)$$

で与えられる。表11に35%電流時に性能試験で得られた出力  $F_{act}$  と(12)式から求めた  $F_{mg}$  とを比較して示す。これをみると、 $F_{act}$  と  $F_{mg}$  はよく一致していることから、出力が設計値と異なった第一の理由は、 $r$ 、 $\beta$ の設計時の見積り違いによることがわかった。

一方、100%電流時における出力不足の原因は、コイルの巻数が大きいために、磁性材料が飽和したためと考えられる。このことは図31からターン数の多いⅡ、Ⅲ型

の空隙部の磁束密度が、ターン数の小さいⅠ型よりもはやく飽和し始めていることからわかる。従って、出力の増大を図るためには、磁束の洩れを防ぐとともに、飽和磁束密度の高い磁性材料を使用することが必要である。

### (ii) ヒステリシス特性

表12にヒステリシス特性をまとめて示す。これから、ⅡA型の場合、目標の2%にかなり近づいてはいるものの、目標には達せず、他の型の場合、かなり大きな値となっている。Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ型からⅡA型への改良は、磁性材料の保磁力を小さくしたこと、トーションスプリングの

表11 試作トルクモータの出力検討

型	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	ⅡA
$C_r$	1.83	1.93	1.39	(1.50)
$C_\beta$	1.17	1.14	0.87	(1.14)
$C_c$	1.00	2.50	2.13	0.85
35% $F_d$ (kg)	0.40	0.78	1.16	0.78
35% $F_{mg}$ (kg)	0.26	1.15	1.55	0.50
35% $F_{act}$ (kg)	0.26	1.00	1.20	0.52

( ) 内は推測値

$$F_{mg} = \frac{1}{C_r} \times C_\beta \times C_c \times F_d$$

表12 ヒステリシス特性の比較

型	接 続	振 幅 (mm)	- 54 °C		0 °C		50 °C		120 °C	
			mm	%	mm	%	mm	%	mm	%
ⅡA	両側コイル	0.664	0.03	4.7	0.02	3.0	0.02	3.0	0.025	3.7
	片側コイル	0.461	0.023	5.1	0.015	3.2	0.015	3.2	0.013	2.7
Ⅲ	両側コイル	0.629	0.05	8.0	0.05	8.0	0.05	7.9	0.05	7.9
	片側コイル	0.621	0.06	9.9	0.055	8.9	0.045	7.2	0.045	7.1
Ⅱ	両側コイル	0.768	0.055	7.1	0.045	5.9	0.048	6.1	0.055	7.3
	片側コイル	0.500	0.033	6.4	0.03	6.0	0.025	5.0	0.035	7.1
Ⅰ	両側コイル	0.489	0.06	11.0	0.06	11.9	0.065	15.5	0.065	13.4
	片側コイル	0.379	0.055	13.4	0.07	18.2	0.045	13.9	0.063	15.4



表 13 トーションスプリング材の比較

材料	特性	耐力 (kg/mm <sup>2</sup> )	引張強さ (kg/mm <sup>2</sup> )	横断性係数 (kg/mm <sup>2</sup> )	備考
SUS		A ; 21 1/2 H ; 52	A ; 53 1/2 H ; 95	7500	250 ~ 450°Cで ストレスレリーフ
INCONEL "X"		63	91	8000	
17-7 PH		1/2 H ; 90	1/2 H ; 125	8000	

形状を単純にして機械加工時の残留歪みを少なくしたこと、磁性材料の機械加工後の歪とりの熱処理に改良を加えたことによる。

ヒステリシスの原因として、トーションスプリングの耐力不足がある。このことは、図32~34に示すトーションスプリングの追加試験結果から明らかである。図35は、II A 型について、変位が比較的小さな値のときのヒステリシス特性を示す。このように、トーションスプリングの耐力を越えない弾性限界の範囲内では、ヒステリシスが極めて小さいから、表13に示すような、耐力が大きく、ロウ付け等による特性の変化のない高温用バネ材 INCONEL "X" あるいは 17-7 PH をトーションスプリング材

として使用することによって、ヒステリシス特性をかなり向上できることがわかった。これ等の材料は、横弾性係数が SUS 材とほぼ同じなので、同じトーションスプリング形状でよい。

#### (iii) 周波数応答特性

図22~25及び表5を見ると、II A 型を除いて、共振周波数は設計値とほぼ一致している。II A 型の共振周波数の低下は、ロウ付けによるバネ定数の低下によるものと考えられる。応答の速さについては、エンジン制御装置の油圧系の遅れ(約20~30 msec)に比較して充分速い。

## 6. ま と め

電気油圧式エンジン制御装置用の小型トルクモータの国産化を目的として、出力の異なる4種類を試作し、その性能試験を行うとともに、その特性の解明に必要な追加試験を行い、次のような結論を得た。

(1) 形状としてはII型の大きさまでは小形化が可能であり、性能的に実用可能なものが製作可能である。I型の大きさのものは、現在の加工精度では製作がむずかしく、出力、ヒステリシス特性共に良い結果が得られなかった。

(2) 永久磁石として ALNICO 5、磁性材料として3%珪素鉄を使用し、トーションスプリングに丸棒を用いることによって、ヒステリシス特性を大幅に改善できたが(約3%)、目標の2%以下とするためには、トーションスプリング材として INCONEL "X" 又は 17-7 PH 等の材料を用いることが必要である。

(3) 追加試験の結果、II A 型については永久磁石及びコイルの磁束の洩れ係数  $r$ 、 $\beta$  はそれぞれ、 $r \div 3.0$ 、 $\beta = 0.88$ 、リラクタンス係数  $r'$  は、 $r' \div 2.5$ 、程度であることが判明した。またこの値を用いると設計計算値と試験値がよく一致する。

(4) トーションスプリングとケーシングのロウ付け加工によって、加工部の横弾性係数が低下する傾向が見られたので、材料の選択を含めて検討を加える必要がある。

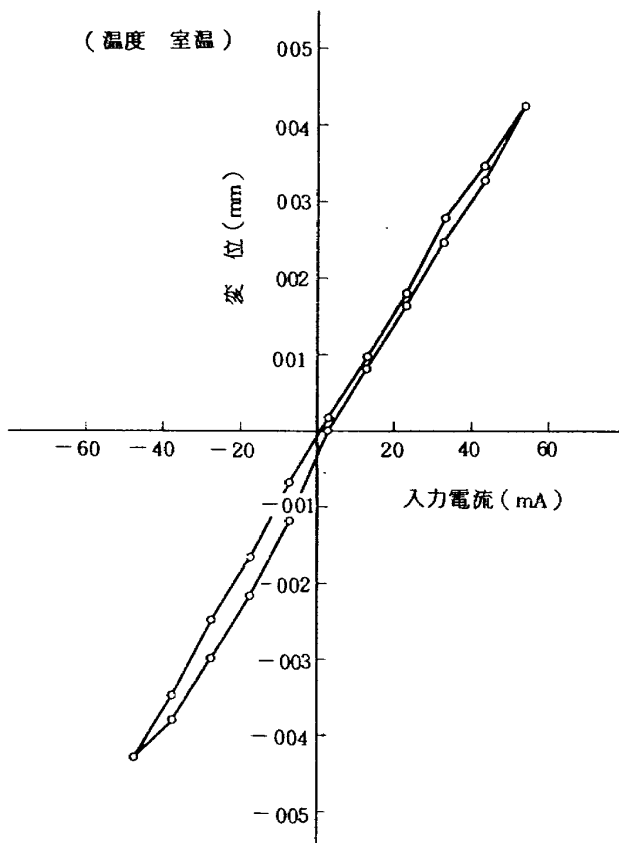


図35 入力電流対無負荷変位特性  
(両側コイル, 中立点近傍)

(5) トルクモータの温度特性は、Ⅰ型を除き良好であり、ⅡA型で出力にして最大20%である。トルクモータの出力は、図36に示す使い方をした場合にループゲインに影響を与えるが、20%程度のゲインの変化であればそれほど問題にはならない。

なお、本試作研究に当っては、石川島播磨重工業株式会社の御協力をいただいた。末尾ながら、関係者に感謝致します。

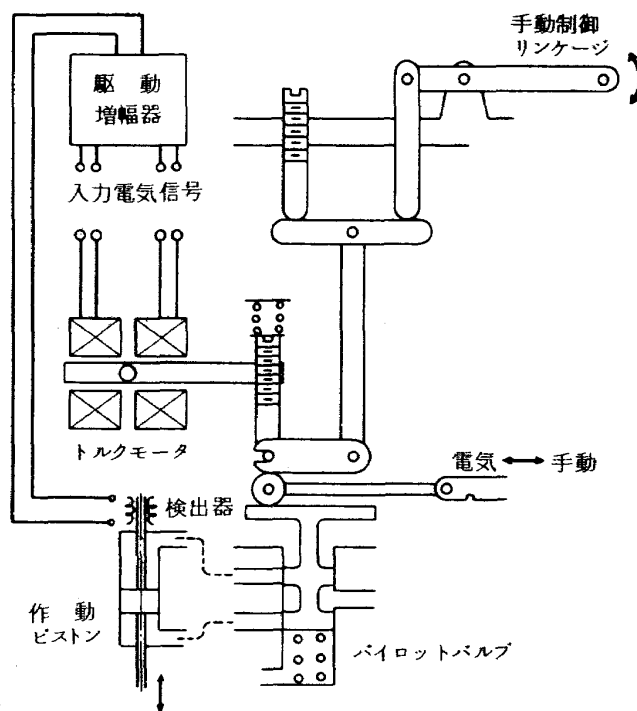


図36 電気油圧式エンジン制御装置  
電気-油圧変換機構

---

## 航空宇宙技術研究所資料405号

昭和55年2月発行

発行所 航空宇宙技術研究所  
東京都調布市深大寺町1880  
電話武蔵野三鷹(0422)47-5911(大代表) ㊦182  
印刷所 株式会社 共 進  
東京都杉並区久我山5-6-17

---

