

UDC 621-135

534. 11

534. 14

# 航空宇宙技術研究所資料

TM-74

回転振動試験装置の計画，構造および特性

武内澄夫・宮地敏雄・星谷昌二

1966年 2 月

航空宇宙技術研究所

既 刊 資 料

TM- 1	高マッハ数風洞について (I)	1961年11月	平橋 木本 一, 清水 福寿
TM- 2	航空技術研究所計数型電子計算機設備 プログラムライブラリー (I)	1962年 2 月	樋口 登雄, 戸川 隼人 三好 良秀, 高橋 芳雄 能美 三夫, 板垣 保幸 海洲 佐伝, 藤田 幸雄 長洲 三夫, 巖登 政一 細川 本和, 井上 皓三 橋本 内之, 山根 三郎 竹田 為治, 坂元 思無 池田 勉
TM- 4	18cm×20cm 超音速風洞について	1962年 5 月	
TM- 5	遷音速流の線型理論	1962年 8 月	
TM- 6	18cm×18cm 遷音速風洞整備試験	1962年 8 月	
TM- 7	慣性力形疲労試験機	1962年 8 月	
TM- 8	アルミ合金の前歴が疲れ寿命におよぼ す実験的研究	1962年 9 月	
TM- 9	方向性次元解析と相似解に関する覚書	1963年 2 月	甲藤 好郎, 小出 勉
TM-10	DATATRON 205 用 ALGOL 58 使用法について	1963年 2 月	高橋 利之
TM-11	光弾性による高速車盤の縞模様	1963年 2 月	永井 文雄, 小川 鉦一
TM-12	コーティングの断熱効果に関する実験	1963年 3 月	竹林 幸彦, 小原 瑛 中井 洋一
TM-13	遷音速における 45° 後退角翼の予備的 フラッタ実験	1963年 3 月	中井 一, 小原 瑛 島海 良三, 安藤 泰 中井 一, 橋爪 宏 高木 俊忠, 橋本 正昭 島崎 竜夫, 藤井 昭 小野 幸一
TM-14	変断面片持梁固有振動数の一計算方法 について	1963年 3 月	
TM-16	フラッタ試験設備測定部変換ノズルの 予備試験	1963年 4 月	
TM-17	VTOL 機用 Jet Lift Engine に関す る一考察	1963年 6 月	
TM-18	ヘリコプター振動のパワースペクトル 解析	1963年 6 月	
TM-19	吹出式超音速風洞による実験データの 処理方式について (I)	1963年 6 月	新井 忠, 原 亘利
TM-20	1m×1m 吹出式超音速風洞における AGARD 標準模型 B の三分力試験	1963年 7 月	高木 廣治, 谷 喬 斎藤 秀夫, 新井 忠 竹内 和之, 飯田 宗四郎 北谷 慶勇, 中井 治夫 永高 文雄
TM-21	国産中型輸送機 YS-11 主翼疲労試験 (第 I 報)	1963年 9 月	
TM-24	円輪と薄肉円筒の回転強度の関係	1963年11月	
TM-25	DATATRON 205 用 ALGOL 58 の Procedures ライブラリー	1964年 1 月	
TM-26	吹出式風洞の圧力制御 (フラッタ試験 設備の場合)	1964年 1 月	橋爪 宏, 中井 一
TM-28	一段式観測ロケットの超音速風洞試験	1964年 1 月	谷 喬, 原 亘利 柳原 盛三, 外立 政 中井 一, 橋爪 宏 安藤 泰勝, 高木 俊 小橋 安次郎, 宮沢 文
TM-29	遷音速フラッタ試験設備の改造および 整備試験	1964年 2 月	
TM-30	二段式ロケット飛しょう体の揚力およ び圧力中心推定法	1964年 3 月	
TM-31	亜音速ジェット輸送機の遷音速風洞に おける試験	1964年 3 月	河崎 俊夫, 竹内 理
TM-32	遷音速風洞の防音	1964年 4 月	牛田 健二, 高橋 宏 榎並 敬之, 山本 稀義
TM-33	非定常境界層の遷移の研究に使用され た定温型熱線風速計について	1964年 4 月	
TM-34	極超音速風洞ノズルの境界層補正につ いて	1964年 5 月	長洲 秀夫
TM-37	気体の不完全性を考慮した極超音速風 洞ノズルの設計計算法	1964年 5 月	毛利 浩
TM-38	AGARD-A 標準模型の超音速三分力 試験	1964年 6 月	高木 廣治, 斎藤 秀夫 石原 久蔵 石井 孝雄
TM-39	相似極超音速流におかれた半球面上の 境界層の遷移に及ぼす粗さと冷却の 結合影響	1964年 7 月	
TM-40	国産中型輸送機 YS-11 胴体疲労試験 (I)	1964年 9 月	竹内 和之, 川島 矩郎
TM-41	抵抗線歪ゲージのゲージ率測定	1964年10月	田畑 浄治, 大坪 孔治 滝沢 実次, 田寺 木一 古閑 昌次, 日出 夫 泉 貞吉, 鈴木 邦男 大塚 宏, 石井 浅五郎 松本 強, 山根 中 広木 和之, 藤枝 国 幸尾 治朗, 岡 遠一
TM-42	実在着氷条件の測定について	1964年10月	
TM-44	高負荷燃焼器 (アニュラ模型) の実験 結果	1964年12月	
TM-46	翼洞結合金具の疲労特性	1964年12月	
TM-47	ローター後流中のヘリコプター胴体の 抵抗について	1965年 1 月	

# 回転振動試験装置の計画，構造および特性\*

武内 澄夫\*\*・宮地 敏雄\*\*・星谷 昌二\*\*

## 1. 緒 論

ジェットエンジンの翼における振動問題の解明と対策を行なうに際して，まず必要なことは翼振動系の特性，すなわち固有振動数，固有振動型，振動減衰率などをつかむことである。

この振動特性をとらえることを目的として，高速回転中の試験翼を加振し固有振動試験および振動減衰試験を行なうための回転振動試験装置を試作した。

以下に本装置の計画および構造について述べ，次に装置の特性を求める試験および計算を行なって得られた結果ならびにこれに基づいて行った改造について述べる。

## 2. 計 画

### 2.1 概 要

翼振動系の特性を求めるための振動試験は，高速回転中のジェットエンジンの翼におけると同程度の回転速度および回転軸中心線からの距離を試験翼に与え，これを回転速度と独立の周波数で加振し，受振装置によって計測することによって行なうことが必要である。この際，試験翼に加振力以外の外乱が加わることを防止するため試験翼を真空中で振動させるを要し，固有振動特性を求めるためには共振状態を生起させ，また振動減衰特性を求めるためには植込み部すべり減衰と材料減衰以外の減衰が存在せぬようにして自由減衰振動を行なわせなければならない。このため回転振動試験装置は回転装置，加振装置，受振装置などをその主要部分とする。

### 2.2 回 転 装 置

回転装置の駆動方法としては電動機によるもの，各種のタービンによるものなどが考えられるが，当所にはジェットエンジン要素試験設備<sup>1)</sup>の一部として大容量の高圧空気源が備えられているのでタービン駆動用の空気が比較的簡単に得られること，高速回転が容易に得られることなどの理由のため空気タービンによるものを採用した。

---

\* 昭和41年1月12日受付

\*\* 原動機部

### 2.3 加 振 装 置

回転装置に取り付けられ高速回転する試験翼を加振する方法としては回転速度を加振周波数の周期で変動させるもの、噴流によるもの、電磁石によるもの、衝撃によるもの、加振片によるものなどがある。

回転速度を変動させるものは、試験翼を取り付けた回転軸およびこれと同心で別個に回転する軸にそれぞれ適当数の磁極をもつ回転子を取り付けてそれを対向させた構造をもつものである。そして、この二つの回転子の磁極間の吸引反発力によって試験翼を取り付けた軸に周期的に変化するトルクを与え、回転速度をこまかく変動させて翼の加振を行なうものである。この方法で所要の加振周波数を得るためには両軸の速度制御を正確に行なわなければならない空気タービンによる回転装置には不適當である。

噴流によるものにおいては回転速度と独立に任意の加振周波数を得ることができない。またこの方法では高い周波数まで加振するには装置が大型化する。

電磁石によるものにおいては磁極を静置すれば噴流によるものと同様に回転速度と独立に加振周波数を制御することができない。したがって磁極を試験翼とともに回転させればこの欠点は避けられるが構造上の困難が生ずる<sup>2)</sup>。そこでこの難点を避けるため、磁極を試験翼の運動面に沿って連続的にして環状電磁石となし、また、試験翼を中立状態において加振するためこの環状電磁石を試験翼に関して対称に配置した対向型とすることを考えた。しかし対向型環状加振電磁石を採用するとすればこれは初めての試みであり、試験翼に対する電磁的制動力の点において困難が予想された。さらに、一般に電磁石加振においては試験翼の材質、形状に制限が生じ、また、高い周波数までの加振は困難である。

衝撃によるものは回転中の試験翼に小物体を衝突させて加振する装置である<sup>3)</sup>。これは任意の周波数での加振を行なうことはできない。

最後にあげた加振片によるものは翼にはり付けたチタン酸バリウム磁器の小さな細長い薄片の圧電逆効果を利用して加振するものである。これは大きな加振力を得ることはできない。

以上の所論から加振装置として環状電磁石、衝撃装置および加振片によるものが妥当と考え、これらを採用し試験内容に応じて適切なものを用いることにした。

### 2.4 受 振 装 置

回転装置に取り付けられて高速回転する試験翼の振動状態を受振する方法として次のものがある。すなわち抵抗線歪ゲージによるもの、翼にはり付けたチタン酸バリウム磁器の小さな細長い薄片の圧電直接効果を採用した受振片によるもの、電気容量型振動計ヘッドの電極によるもの、翼先端に取り付けた磁石と翼先端の回転運動面に沿って設けられたピックアップによるもの<sup>4)</sup>などである。本装置においては受振装置として初めの三つを採用し試験内容に応じて適切なものを用いる

ことにした。

### 3. 構 造

#### 3.1 概 要

回転振動試験装置の主要部分は回転装置，加振装置，受振装置などであり，別に潤滑装置，真空ポンプなどが付属している。全体の組立および外観を図1，2に示す。

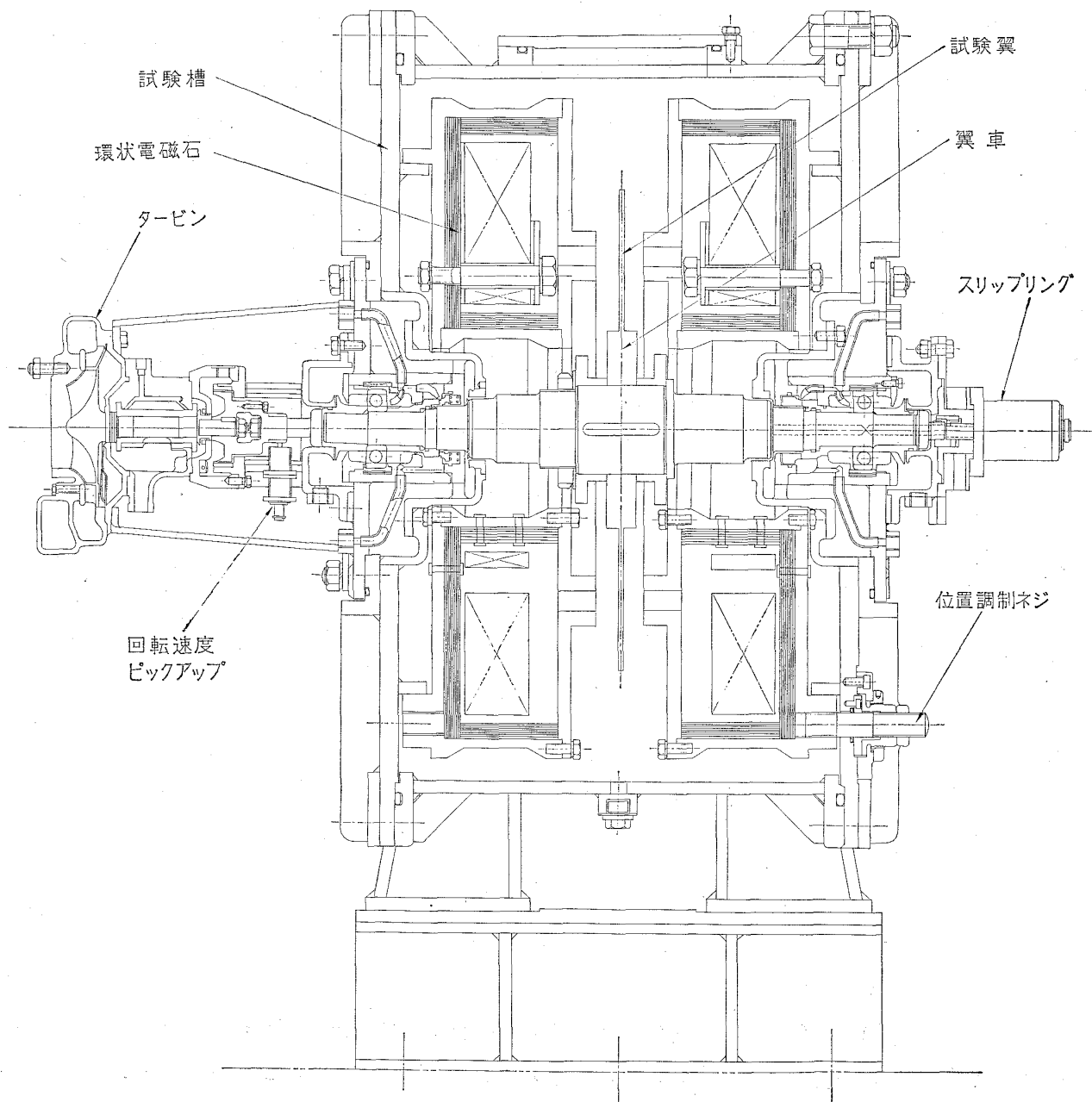


図 1

#### 3.2 回 転 装 置

空気源から供給される高圧空気（圧力約3 ata）によって小型の輻流空気タービン（自動車用ディ

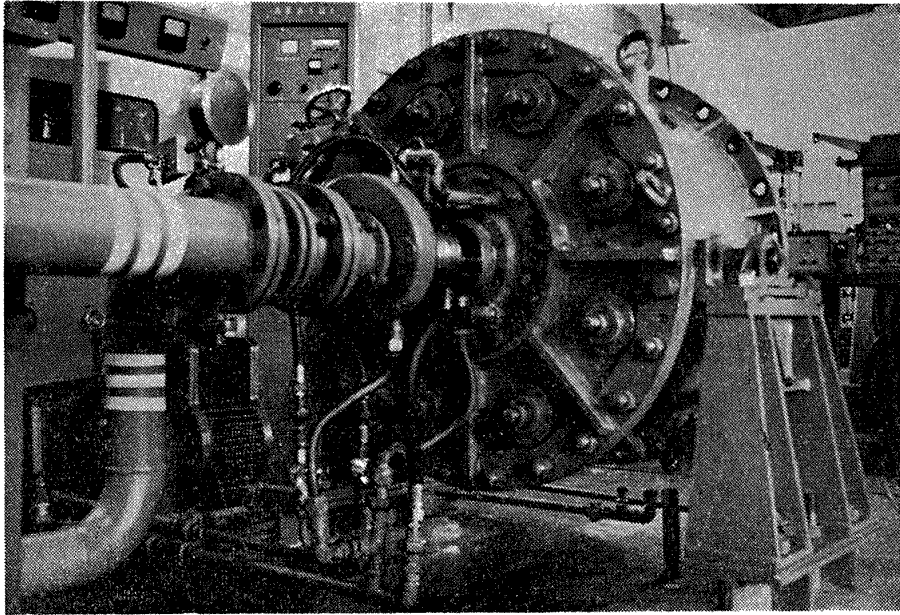


図 2

ーゼルエンジンの排気タービン過給機に使用されているものと同型)を駆動し、これに連結する軸系を回転する。この軸系の中間部分に翼車に取り付けられており、この部分は試験槽内に収容されている。試験槽はジェットエンジンの翼車直径と同程度の直径をもつ翼車を収容できる大きさを持ち、付属の真空ポンプによって内部を真空にされる。内部を真空にすることにより回転中の翼に試験のために与える加振力以外の外乱が加わることを防止するとともに小さい動力で軸系を高速回転することができる。軸系の回転速度は軸に取り付けた6枚歯のパルス発生用歯車とパルスピックアップによって発生したパルスを電子管式自動計数器で1秒間計数することによって測定する。そしてタービン駆動用空気の流量調整弁を手動調整して振動測定中の回転数を一定に保つようにしている。

回転装置の要目は次のとおりである。

回転速度 最大 20,000rpm

試験槽内径 716φ

真空度 最小 1mmHg

### 3.3 加振装置

#### 3.3.1 環状電磁石

環状電磁石は図3に示すように、回転軸系の軸中心線を中心軸とする円環型の電磁石である。この電磁石は、鉄心、磁極板、交流コイル、直流コイルおよび保持器からなり、同型のもの2個が試験翼をはさんで対向し、回転装置の試験槽に取り付けられ2個の間隔は調整可能となっている。鉄心は一般的な変圧器用ケイ素鋼板を積み重ねた構造のものである。磁極板は透磁率が鋳鉄の約2倍であるという理由で鋳鋼製とした。交流コイルは直径3.2mmのエナメル絶縁銅線を100回巻いた

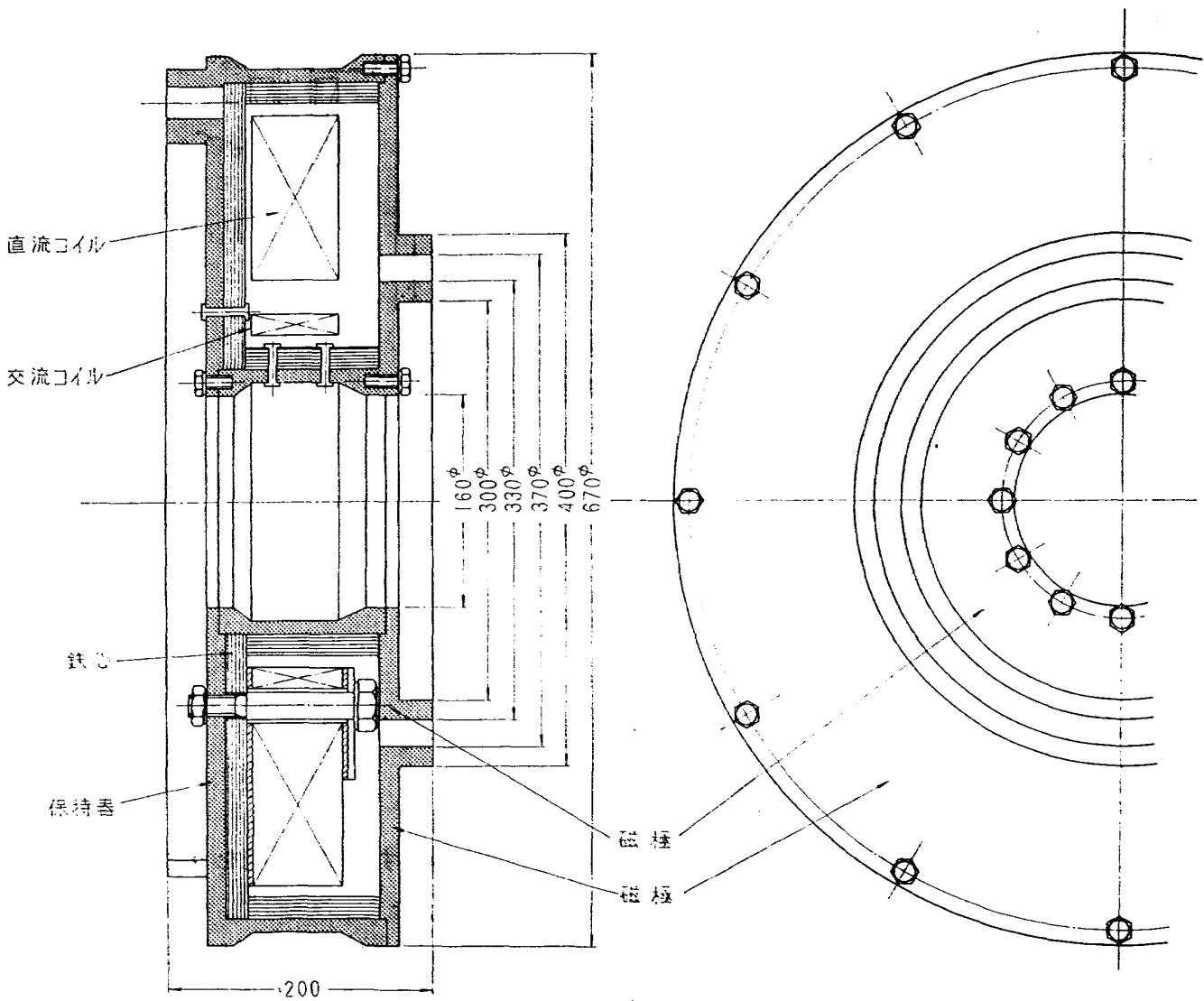


図 3

ものである。直流コイルは直径2.0mmのエナメル絶縁銅線を900回巻いたものである。そして対向する2個の電磁石の交流コイルは並列接続し回転振動試験装置とは別に設置されている動電加振機の電力増幅器によって交流を流される。また直流コイルは直列接続して上記の動電加振機の励磁電源によって直流を流される。

この電磁石による加振の原理は次のとおりである。まず図4(a)において電磁石が試験翼に作用する吸引力を  $F\text{kg}$  とすると

$$F = 2 \times \frac{B^2 A}{8\pi \times 9.81 \times 10^5}$$

ここに、

$B$  ; 空隙の磁束密度 ( $\text{Wb/m}^2$ )

$A$  ; 磁極と試験体の対向面積 ( $\text{m}^2$ )

次に鉄の部分の磁気抵抗は空隙の磁気抵抗と比べてじゅうぶん小さいと仮定し、

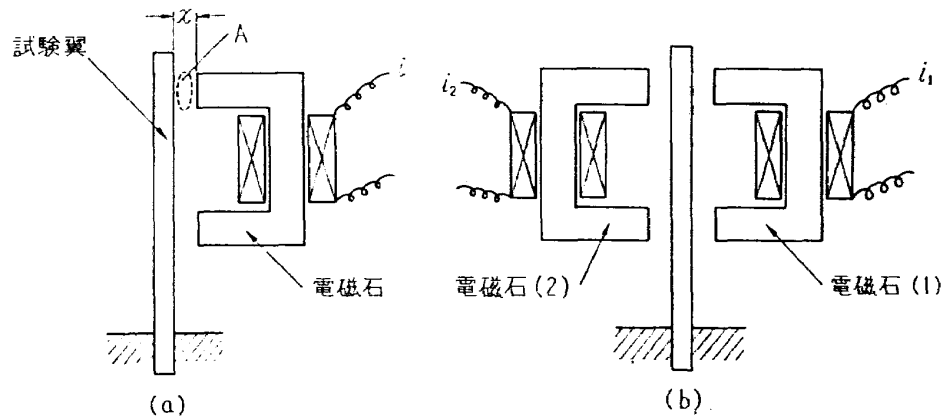


図 4

$i$  ; コイルを流れる電流 ( $A$ )

$N$  ; コイルの巻数

$x$  ; 空隙の長さ ( $m$ )

とすれば,

$$B = \frac{1.25iN}{2x}$$

したがって

$$F = 3.18 \times 10^{-8} \frac{(iN)^2 A}{x^2}$$

次に試験翼の変位は空隙の長さに比べてじゅうぶん小さいものとすれば, 時間を  $t$ , 角周波数を  $\omega$  として, コイルに  $i = i_A \cdot \sin \omega t$  なる電流を流したときの吸引力は

$$F = \frac{3.18 \times 10^{-8}}{2} \frac{(i_A N)^2 A}{x^2} (1 - \cos 2\omega t)$$

となり, 静的な吸引力と電流の2倍の周波数の加振力が作用する。ところが静的な吸引力が存在する場合には試験翼が中立状態, すなわち回転軸系の軸中心線に直交する運動平面から変位した状態において振動することになり不つごうである。そこで, これを避けるために図4(b)のように2個の電磁石を対向させ, その磁極の間に試験翼を置き, 2個の電磁石のコイルにはそれぞれ  $i_1 = i_D + i_A \cdot \sin \omega t$ ,  $i_2 = i_D - i_A \cdot \sin \omega t$  ( $i_D \geq i_A$  とする) なる電流を流している。このとき試験翼に作用する力の正向きは試験翼に関して電磁石(1)の側とすれば

$$\begin{aligned} F &= F_1 - F_2 \\ &= 4 \times 3.18 \times 10^{-8} \frac{i_A i_D N^2 A}{x^2} \sin \omega t \end{aligned}$$

となる。実際の装置では電源として前記の動電加振機用の電力増幅器と励磁電源を使用するためにコイルは直流コイルと交流コイルに分割され, それらを流れる電流の最大値がそれぞれ  $i_D$ ,  $i_A$  である。



環状電磁石に関連する電気回路を説明のために簡略化して書いたものを図5に示す。動電加振機用電力増幅器は低周波発振器からの信号を増幅し周波数5～3,000c/sの範囲で最大10kVAの出力

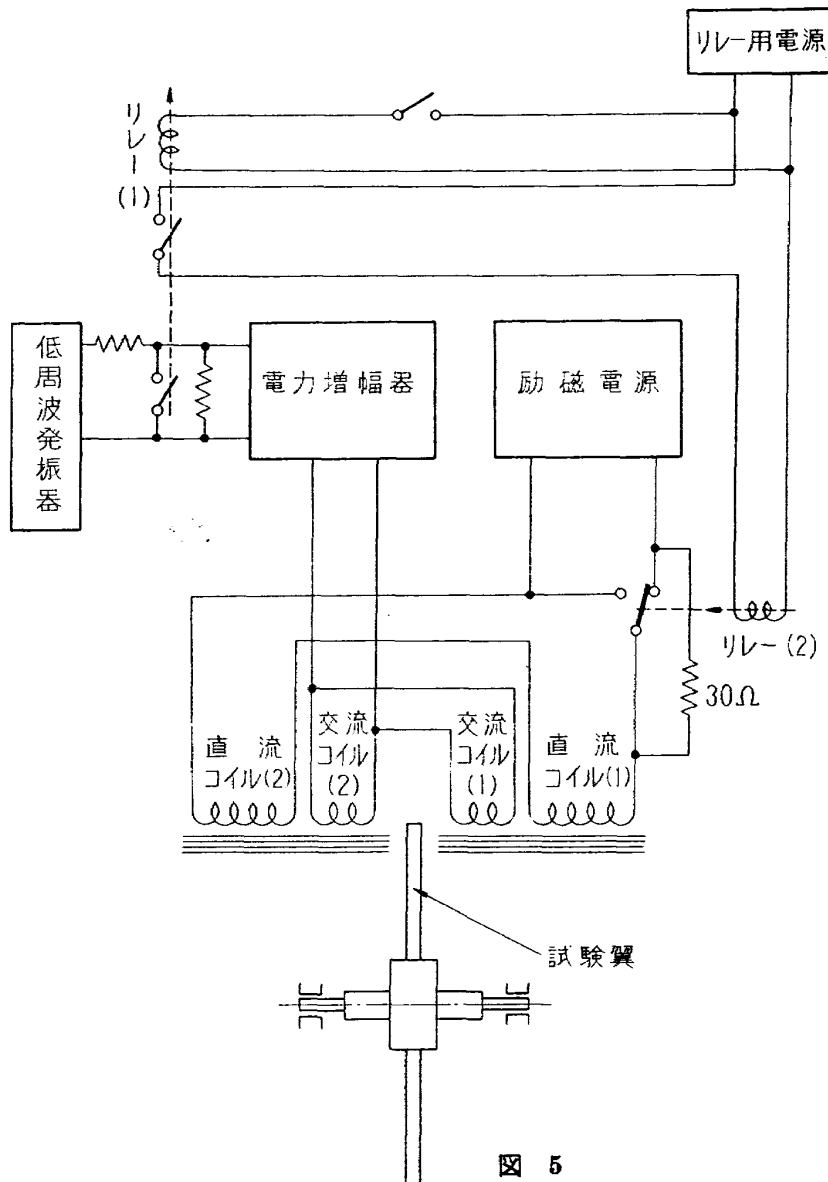


図 5

を動電加振機の可動コイルに供給するものである。また励磁電源は最大 240V, 10Aの直流を動電加振機の励磁コイルに供給するものである。ここでは、これらをそのまま環状電磁石の電源として利用することとした。

なお、環状電磁石の交流コイルと直流コイルの許容最大電流はそれぞれ30A, 5Aであり、直流のみ5A流したときの磁極板表面の磁束密度は約4,500 Gaussである。

### 3.3.2 衝撃装置

衝撃装置は各種の直径の金属製の球を試験槽内に自由落下させ、回転中の試験翼に衝突させてこれを加振するものである。この装置においては図6に示すように数個のアクリル樹脂製の円筒型球容器が試験槽上蓋に取り付けられており、手動で容器の栓を回転させることにより球が容器の下か

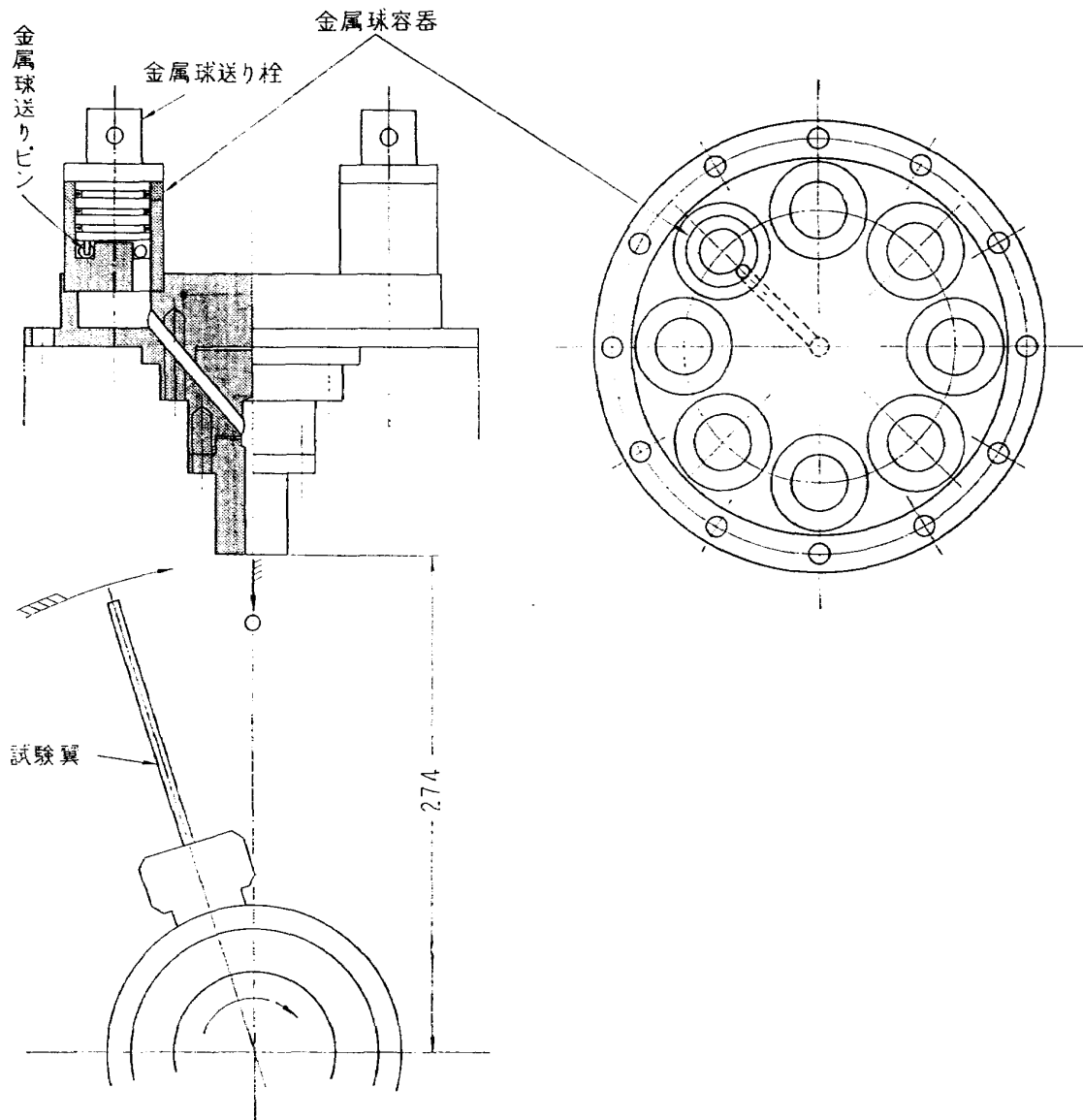


図 6

ら落下筒につながる穴に落ち込むものである。落下した球は回転中の試験翼に衝突してはねとばされるが、その後ふたたび試験翼と衝突したり試験槽内部を損傷したりすることを防止するために、はねとばされたあとの運動径路に球受けを設けてこの中に収容する。

### 3.3.3 加振片によるもの

加振片を用いて翼を加振する場合を考慮して装置が作られている。すなわち加振片に圧電気逆効果を起こさせるために低周波発振器を設け、これから電氣的に回転軸系を経て正弦波電圧を加えるようになっている。この場合に回転部分における電氣的接続のためにスリップリングが取り付けられている。このスリップリングの軸は振れ回り運動の絶縁のためテフロン製軸継手によって回転軸系の空気タービンと反対側の端部に結ばれている。

## 3.4 受振装置

抵抗線歪ゲージ、受振片および電気容量型振動計ヘッドの電極を用いて翼の振動状態を受振する

場合を考慮して装置が作られている。すなわち翼の振動にともなう生ずる抵抗線歪ゲージの電気抵抗変化および受振片の両極に発生する電圧を電氣的に回転軸系を経てそれぞれ抵抗線歪計増幅器および陰極線オシログラフに導く。この場合に回転部分における電氣的接続のために前述したスリップリングを用いるようにしてある。また、振動する翼と電気容量型振動計ヘッドの電極間の電気容量変化を電氣的に回転軸系を経て振動計の電気容量測定回路に導くが、この場合には回転部分における電氣的接続に容量リングを用いている。

## 4. 特 性

### 4.1 概 要

回転振動試験装置の主要な機能は回転軸系の高速回転と加振装置の加振とにある。特に減衰振動試験においては加振装置に環状電磁石を使用すれば、試験翼に対して加振する場合にその制御を行ないやすい利点があるが、その後に加振を急速にやめるとともに植込み部すべり減衰と材料減衰のみによる減衰振動を行なわせるを要する。したがって試験翼に電磁的制動力が影響を与えぬことが必要条件である。

したがって回転振動試験装置の諸特性のうち回転軸系の特性、加振の急速な断絶および電磁的制動力を主とする環状電磁石の特性などが最も重要なものであり、以下にこれらについて述べる。

### 4.2 回転軸系の特性

#### (1) 試験円板

特性試験に用いた試験円板は直径 200mm、厚さ 40mm、材質 SS41 のものであり、これは普通の振動試験翼を取り付けた翼車とだいたい同じ厚さで重量は大であると考えられる。図 7 に示すよ

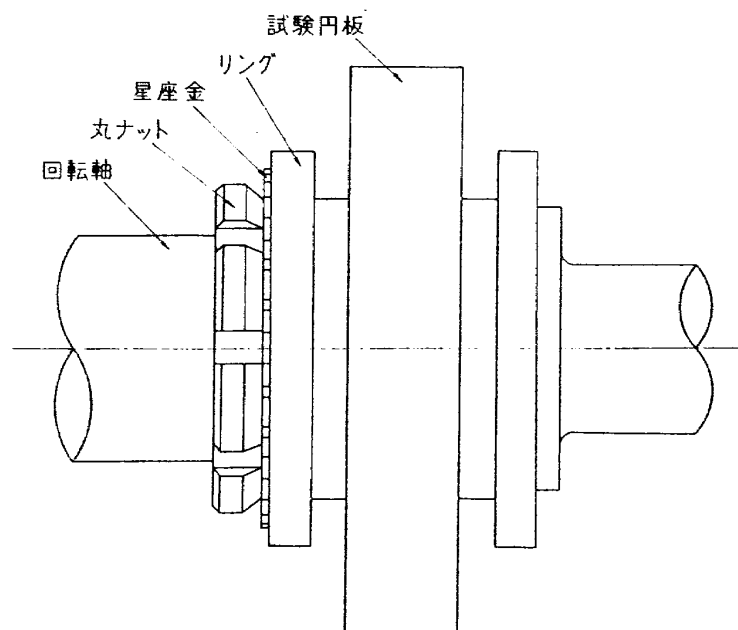


図 7

うに、その両側につり合をとるためのリングを配置してこれらは軸系の回転軸に取り付けられ、さらに丸ナットおよび星座金によって締め付けられている。

## (2) 計測装置

特性試験に用いた計測装置は電気容量型振動計であり、その電極は回転装置の回転軸に対向して取り付けられた。

## (3) 特性試験

回転装置の軸系の危険速度を調べるため、図7に示す回転体を中間部分に取り付けた軸系を回転し、その運動を測定して振れ回り運動試験を行なった。また、この軸系の曲げ振動試験をも行なった。その結果から危険速度は 15,100rpm であることがわかった。また、図7に示す回転体を除いた軸系の場合には曲げ振動試験の結果から危険速度を求めたところ 20,900rpm を得た。したがって、普通の試験翼を取り付けた翼車を固定した軸系の危険速度は 15,100rpm と 20,900rpm の間にあると考えられる。

### 4.3 環状電磁石の特性

#### 4.3.1 完成直後の環状電磁石

##### (1) 試験翼

特性試験を行なうに際して試験翼を用いる場合には、これをなるべく単純な性質をもつものとするれば試験装置の特性を正確に求めやすい。このため試験翼として図8のようなディスクと一体で削

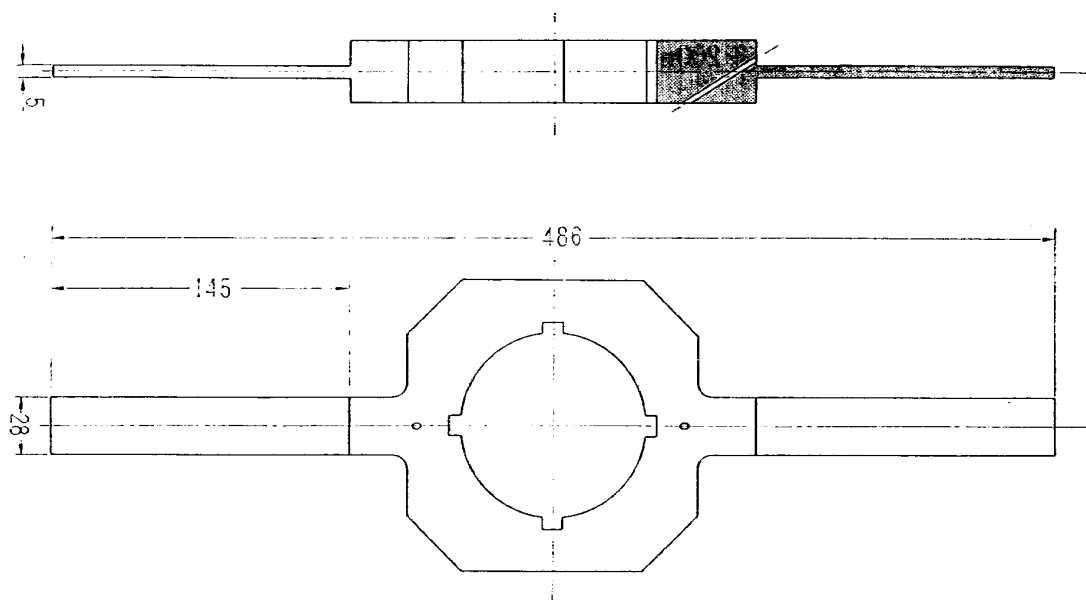


図 8

り出した一定長方形断面の翼を採用した。翼の材質は特殊鋼 (AISI 403) であり、その縦弾性係数は  $21,000\text{kg/mm}^2$ 、比重は 7.80 である。また、一次の曲げ固有振動数は  $208\text{c/s}$  である。翼の受振をするために根元に近い部分に 4 枚の抵抗線歪ゲージと 1 枚の受振片を接着しこれを用いた。

## (2) 計測装置

特性試験に使用した計測装置の系統図は図9に示したとおりである。

磁束計は半導体のホール効果を利用したもので磁束密度を電流計で直読できるようになっている。測定範囲はフルスケールで2,500, 5,000, 10,000, 50,000Gaussの4段階に切替え可能、精度はフルスケールの±1%である。

その他の計測器は一般的なものであるから説明は省略する。

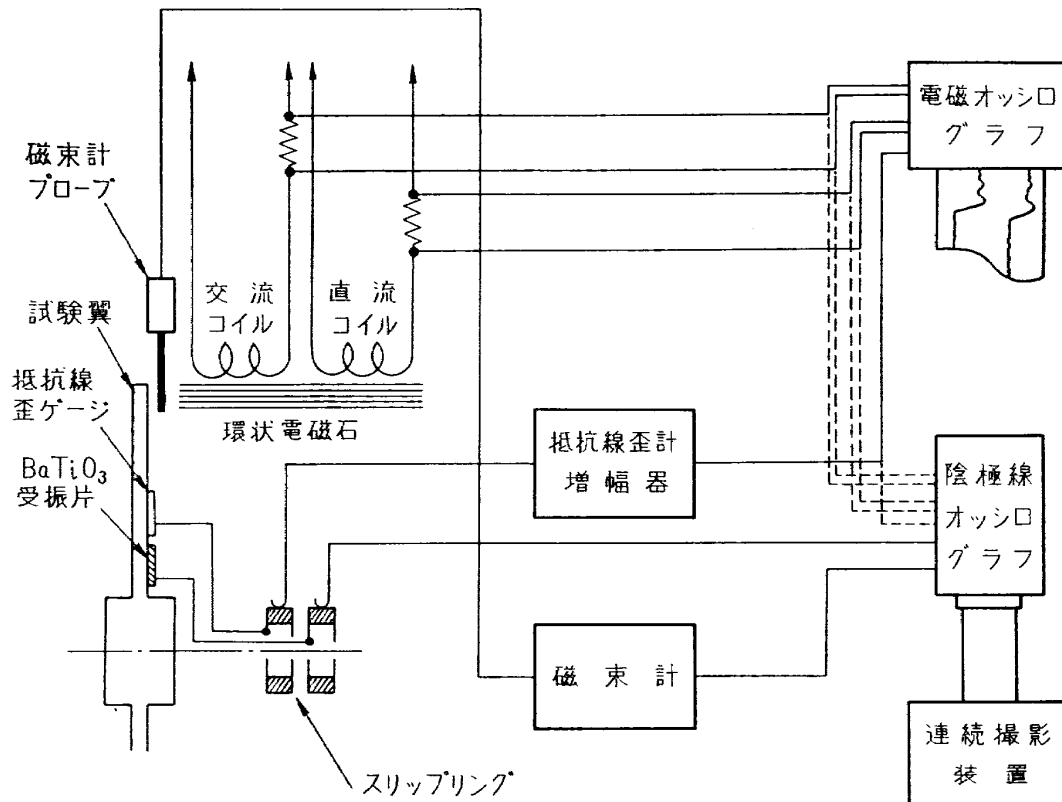


図 9

## (3) 特性試験

本装置の特性を調べるため、最初に前述の試験翼の静止の場合について固有振動試験と振動減衰試験を行なった。試験の方法は次のとおりである。

試験翼の加振には片側の環状電磁石のみを使用する場合と両側の環状電磁石を使用する場合とが考えられる。しかし構造に関する所論で前述したように、試験翼を中立状態において加振するのが望ましいので両側の電磁石を使用することにした。

電磁石に流す電流については、交流コイルに加振周波数と等しい周波数の電流を流し、また直流コイルには交流コイルに流している電流（実効値）の $\frac{1}{6}$ 以上の電流を流す。これによって同じく構造に関する所論で前述した  $i_D \leq i_A$  の条件が満足されることになる。

この際、交流コイルに15A程度の電流を流せば固有振動試験にはもちろん振動減衰試験にもじゅ

うぶんな加振力が得られることを確認した。また、試験翼に関して両側の電磁石が対称の位置をとるようになるべく正確に調整しなければならない。

次に、以上のようにして加振された試験翼の根本近くに接着した歪ゲージまたは受振片からの信号を陰極線オシログラフで観察しながら、電流は一定のままで周波数を連続的に変化させる。そして試験翼の振幅が極大となる周波数を求めればこれが固有振動数となる。また、このようにして加振しておいて交流コイルと直流コイルの電流を同時に切れば、それ以後は試験翼は自由減衰振動を行なう。したがって、このときの振動波形を記録すれば対数減衰率を求めることができる。

以上の試験の結果得られた対数減衰率は空気中で0.019となった。一方同じ試験翼を回転振動試験装置の外で機械的に衝撃を加えて加振し、その後自由減衰振動をさせたときの対数減衰率は0.007となった。したがって、0.019という値は過大であると考えられる。

そこで以下に述べるように、試験翼の振動減衰率を過大にする原因を明らかにし、その対策を講ずるための試験を行なうことにした。

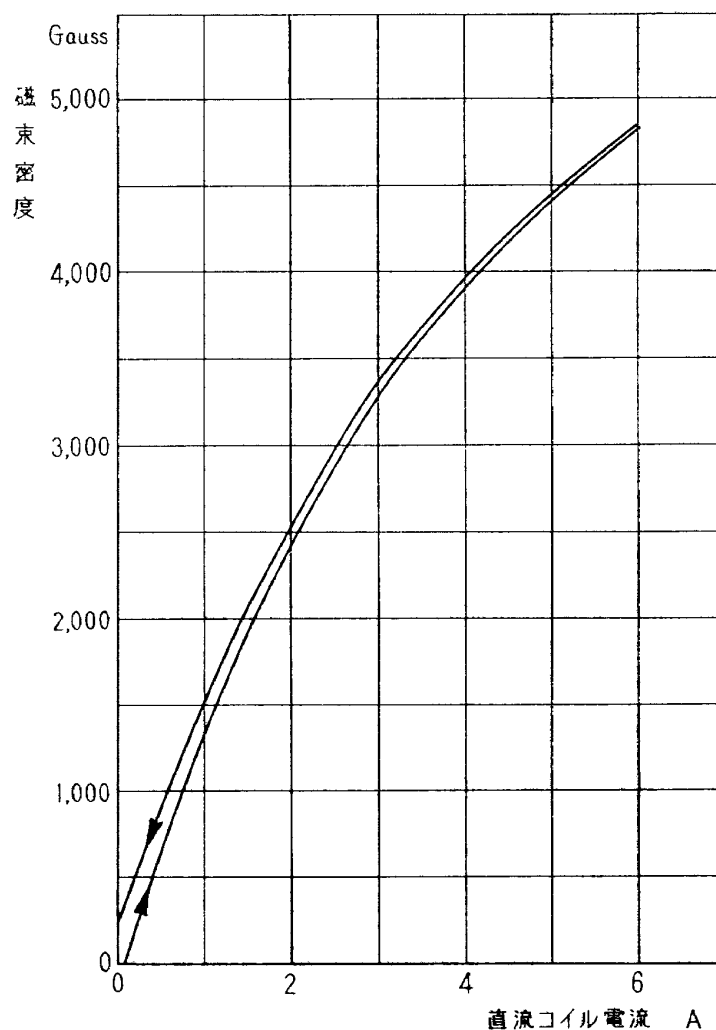


図 10

試験翼の振動減衰率を過大にする原因として第一に考えられることは、環状電磁石の磁極および鉄心に電流を切ったあとも残留磁気があって、これが試験翼の振動に電磁的な制動力を加えるということである。そこでまず磁束計によって磁極表面における磁束密度を測定した。使用した磁束計は変化の周期の短い磁束を測定することができないので、直流による磁束だけを測定することとした。そこで直流コイルだけに電流を流し、この電流と磁束密度との関係を求め、図10に示す結果を得た。

これによると加振時に流す直流と同程度の電流を一たん流してから電流を零としたときの残留磁束密度は 250Gauss である。また加振時の磁束密度は交流コイルに流す電流を15A、直流コイルに流す電流を 5 Aにすると  $4,500 \pm 1,500$  Gauss の程度になると推定される。

次に、この 250Gauss の残留磁束密度が試験翼の振動減衰率に与える影響を調べた。まず、電磁石加振の直後に試験槽内の軸系に取り付けられた翼を機械的に衝撃を加えて加振し、空気中でこれに自由減衰振動をさせてその対数減衰率を求めたところが 0.007 という値が得られた。さらに振動

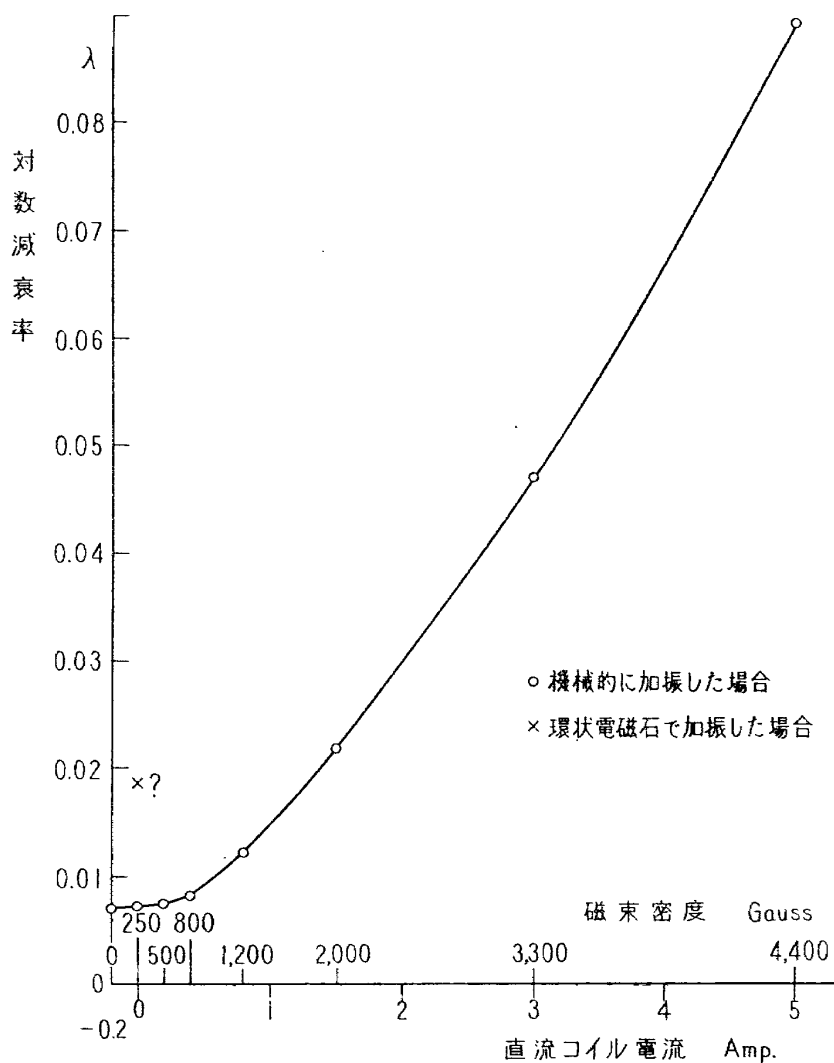


図 11

表 1

加 振 法	自由減衰振動時に直流コイルに流す電流 A	磁 極 表 面 の 磁 束 密 度 Guass	対 数 減 衰 率 %
環 状 電 磁 石 による加振			1.9
機 械 的 な 加 振	-0.17~-0.16	0	0.7
"	0	250	0.7
"	0.2	500	0.7
"	0.4	800	0.8
"	0.8	1,200	1.2
"	1.5	2,000	2.2
"	3	3,300	4.7
"	5	4,400	8.9

減衰率に対する磁場の強さの影響を調べるために、直流コイルにだけ電流を流した状態において上記と同様にして対数減衰率を測定した。

ここで、これまでに得られた結果をまとめると表1および図11のようになる。これらによると振動減衰率は磁場の強さによっては非常に大きな影響を受けることは確かであるが、250 Gauss 程度の残留磁束密度によってほとんど影響されぬことがわかる。つまり残留磁気は電磁石加振の場合に振動減衰率を過大にする原因の一部とはなるがそのおもなものではないことがわかった。

残留磁気以外の原因としては、加振電流を切った後の交流コイルおよび直流コイルの過渡電流およびこれに対応する過渡磁束がかなりの時間存続し、この過渡磁束が翼の振動に電磁的制動力を加えることが考えられる。これを確かめるためには過渡磁束密度を求めるを要する。しかし、これに対応する交流コイルおよび直流コイルの過渡電流を測定するほうが容易であるので、これらを測定することにした。測定方法は交流コイルおよび直流コイルにそれぞれ直列に電流測定用分流抵抗を接続し、その分流抵抗と並列に電磁オッシログラフのガルバノメータまたは陰極線オッシログラフを接続して記録をとる普通の方法である。その結果として、交流コイルの電流は瞬間的に零となるが、直流コイルの電流は約0.5秒の時定数をもって減少し、この直流コイルの過渡電流のために誘導された電流が交流コイルに流れることが明らかになった。したがって直流コイルの過渡電流による過渡磁束が振動減衰率を過大にするおもな原因の一つであることが確かめられた。

次に直流コイルおよび交流コイルのインダクタンスと直流抵抗を測定したところ次の値が得られた。

直流コイル	タービン測	スリップリング測
インダクタンス	2.1H	2.0H
直流抵抗	4.60Ω	4.60Ω



交流コイル	タービン側	スリップリング測
インダクタンス	28mH	25mH
直流抵抗	0.22Ω	0.20Ω

ただしこの値はそれぞれのコイル1個の値であって、直流コイルは2個直列に、交流コイルは2個並列に接続されている。

#### (4) 特性計算

図5に示す完成直後の環状電磁石の電気回路において、加振状態の電流が流れている場合にリレーが働いて電流を切ったときの過渡電流の時定数を計算した。その結果直流コイルにおいては0.46秒、交流コイルにおいては0.125秒となり、直流コイルに関しては上記の実測値とほぼ一致している。

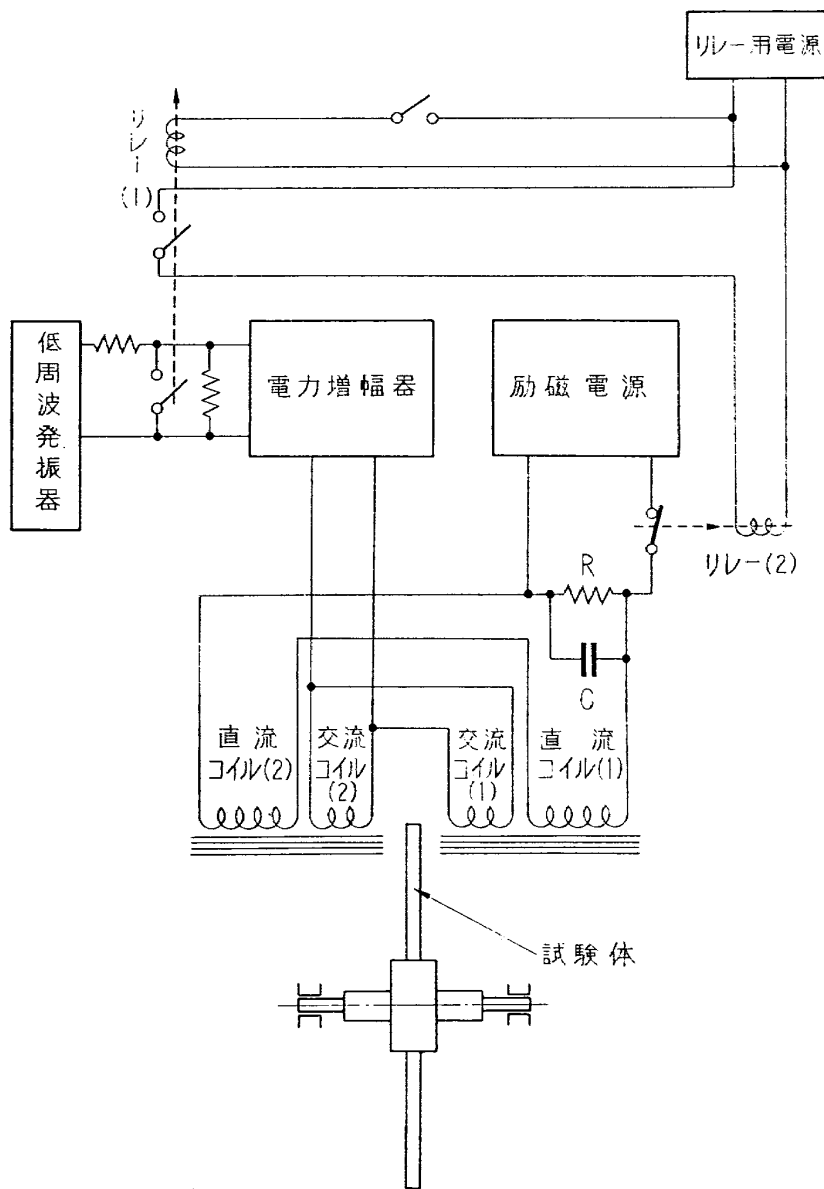


図 12

### 4.3.2 改造後の環状電磁石

#### (1) 改造

振動減衰率を過大にするおもな原因の一つは前述のように直流コイルの過渡電流の時定数が大なることである。そこで、直流コイルの電源を切った瞬間にコイルの両端に発生する高電圧がコイルなどの絶縁を破壊しない範囲においてできるだけ急速に直流コイルの電流を減少させるように回路を改造することにした。

改造後の回路を簡略化して書いたものを図12に示す。この改造においては、電源切りはなし直後に直流コイルを短絡することをやめ、直流コイルと並列に抵抗と容量を接続し、これによって過渡電流を図13(a)のような形で振動的に減衰させようとしたのである。抵抗のみでなく容量を並列に接

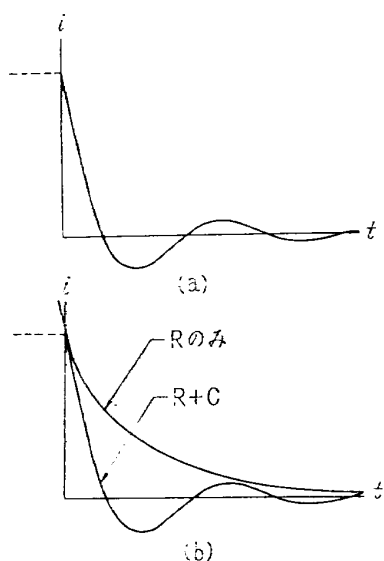


図 13

続した理由は次のとおりである。電源の切りはなしの際に発生する高電圧を一定におさえた場合の過渡電流の変化は抵抗のみの場合と抵抗と容量とを並列とした場合とでそれぞれ図13(b)に示すようになる。したがって、抵抗のみの場合より抵抗と容量とを並列とした場合において過渡電流値が振動減衰率を過大とする影響がない程度にまで減少する時間を一層小となしうる。さらにまた、抵抗と容量とを並列とした場合には電流が一たん負となる値を適当にすれば、過渡電流が流れなくなったあとの残留磁束密度をほとんど零となしうると考えられたからである。

#### (2) 特性試験

改造において接続した抵抗  $R=500\Omega$ 、容量  $C=64\mu\text{F}$  の場合に直流コイルの過渡電流は図14のように測定され、かなり急速に減少するようになった。

この場合に電流は一たん逆方向に約  $0.6\text{A}$  流れているので前述のように残留磁気はほとんどなく

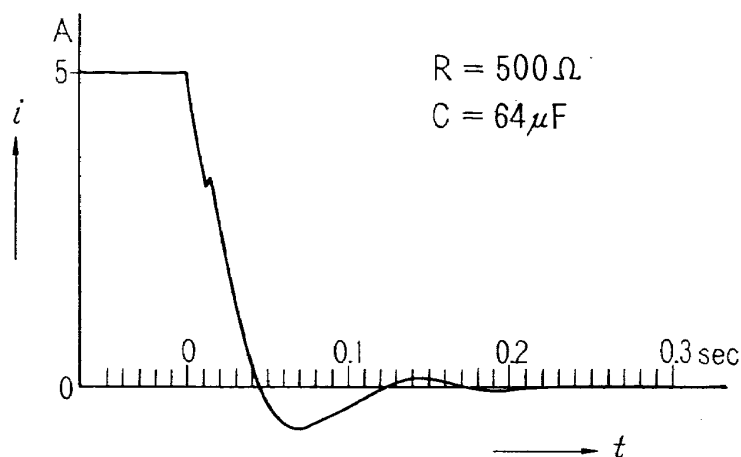


図 14

なるはずである。そこでこれを測定したところ逆方向の電流を流さない場合におけると同程度の約 250 Gauss という値が求められた。また、この場合の振動減衰試験によると対数減衰率は空気中で 0.04 と測定された。この値は改造前に求められた 0.019 と比較するとかえって大きくなっている。つまり改造前に比べて直流コイルの過渡電流が急速に減少しているにもかかわらず残留磁気はほとんど同じであり、対数減衰率はかえって増加したことになる。この原因として次のことが考えられる。第一は直流コイルの電流が急激に減少する場合にこの電流と磁極表面の磁束密度の関係が図10に示されるものとは異なり磁束が急激に減少していないことである。第二は改造後の試験では磁極と試験翼との距離を近づけたこと（改造前は約 5 mm, 改造後は 3.0mm とした）である。

そこで磁極表面の過渡磁束密度を測定することにした。測定は前述の磁束計を改造し変化の早い磁束も測定できるようにしたものと陰極線オシログラフを用いて行なった。改造後の磁束計の周波数特性は直流～1,000c/s の範囲で平坦であり、それ以上もほとんど平坦である。

測定の結果として、直流コイルと並列に接続する抵抗と容量を変えて直流コイルの過渡電流の時間的变化を変えても、磁束密度はほとんどそれとは無関係で図15のようになった。すなわち磁束密度が振動減衰率を過大とせぬ 200 Gauss 程度まで減少するには約 1 秒を要する。これで直流コイルの電流が急激に減少しても磁束密度はゆっくりと減少することが明らかとなった。

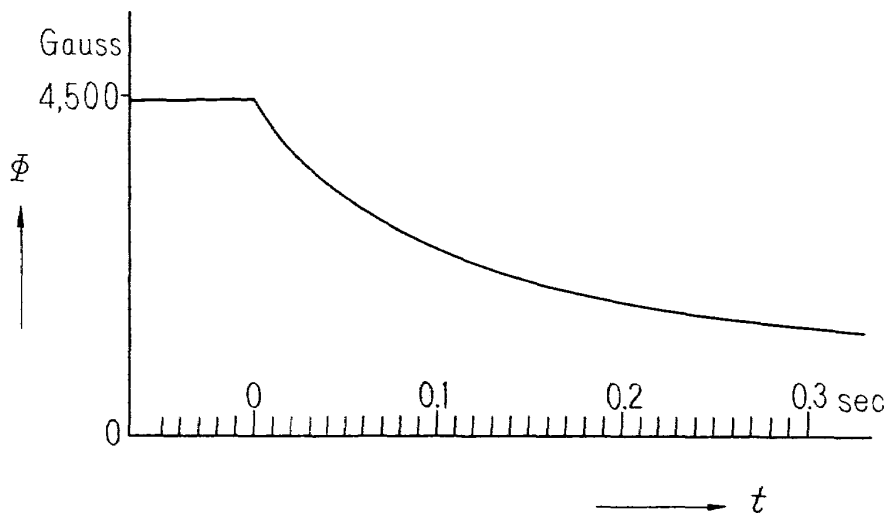


図 15

この磁束に対応して、直流コイルの過渡電流によって生ずる誘導電流が必ずどこかに存在しなければならない。そのような誘導電流が流れる部分として交流コイル、電磁石の鉄心、磁極、保持器および試験槽などが考えられる。まず交流コイルおよび試験槽について調べることにした。このため直流コイルにおいては従来の試験状態であったように 2 個のコイルの生ずる磁界の向きが同じである場合および片側のみを逆にした場合をとった。また、交流コイルにおいては従来の試験状態であったようにコイルを加振電源に接続した場合および両端を開放した場合をとった。そして磁極表

面の磁束密度の測定を行なった。直流コイルの生ずる磁界の向きを互に逆にした場合の測定を行なった理由は次のとおりである。この場合にはそれぞれの直流コイルの過渡電流によって試験槽に生ずる誘導起電力の向きが互に逆になるため試験槽にはほとんど誘導電流が流れないと考えられる。したがって、この場合と従来の場合の結果を比較すれば、試験槽を流れる誘導電流によって生ずる磁束の状態を推定できると考えたからである。測定は直流コイルに並列に接続した抵抗  $R=500\ \Omega$ 、容量  $C=64\ \mu F$  の場合について行なわれ図16に示す結果を得た。ここに  $\Phi_0$ 、 $\Phi$  は直流コイルの電源を切った前後の磁束密度を表わすものとする。ここで磁束の減衰のおそい順序に並べると次の

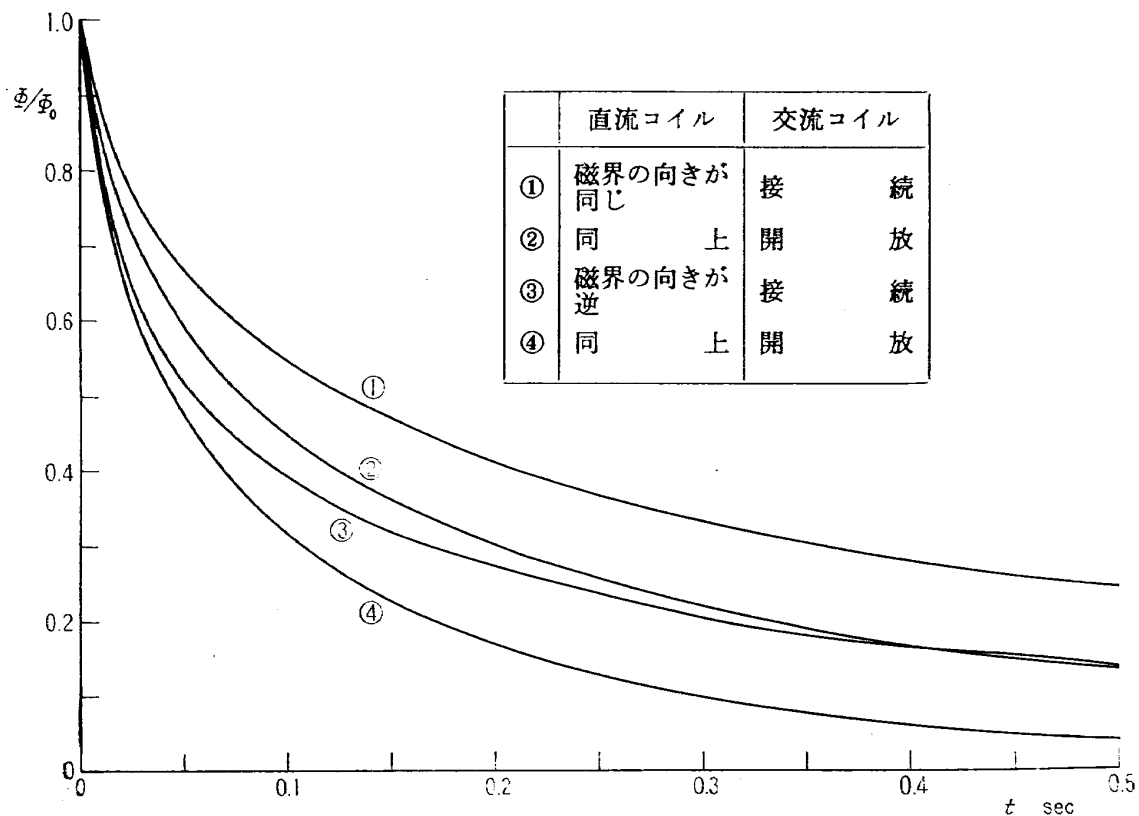


図 16

とおりである。

①直流コイル2個の磁界の向きが同じで、交流コイルは加振電源に接続された場合、②直流コイル2個の磁界の向きが同じで、交流コイルの両端が開放された場合、③直流コイル2個の磁界の向きが互に逆で、交流コイルは加振電源に接続された場合、④直流コイル2個の磁界の向きが互に逆で、交流コイルの両端が開放された場合である。これらの結果には交流コイルおよび試験槽の磁束に対する影響の大小が現われている。したがって、交流コイルおよび試験槽には直流コイルの過渡電流によって生ずる誘導電流が流れ、これに対応する磁束が存在することが確認されたことになる。

なお、2個の直流コイル間の電磁的結合はきわめて弱いため（結合係数0.01の程度）、2個の磁界の方向が同じときおよび互に逆のときにおいてコイルのインダクタンスはほとんど変化しない。

### (3) 特性計算

直流コイルの過渡電流によって生ずる誘導電流に対応する磁束を示す図16④の場合の値は、この場合に交流コイルおよび試験槽に起因する磁束が最小であるから、だいたいにおいて残りの部分である電磁石の鉄心、磁極および保持器に起因する磁束を示すものと考えられる。これを調べるために電磁石の鉄心、磁極および保持器に流れる誘導電流とそれに対応する磁束を計算することにした。そこで、1個の電磁石について考えることとし、その鉄心と磁極は1回巻きのコイルであり直流コイルと電磁的に結合し、簡略化されて図17の回路によって表わされるものとして計算を行なった。ここで、直流コイル側の回路のインダクタンスおよび抵抗、鉄心および磁極のインダクタンスおよび抵抗、直流コイルと鉄心および磁極との結合係数が必要である。

直流コイル側の回路のインダクタンス  $L_1$  には直流コイルについての測定値 2.1H を用い、抵抗  $R_1$  には直流コイルについての測定値  $4.60\Omega$  に並列に接続する

抵抗の図16の場合における値の半分の  $250\Omega$  を加えた値を用いた。

次に鉄心および磁極についてはこのままでは測定の方法がないので計算によって推定することにした。まずインダクタンス  $L_2$  については単層コイルのインダクタンスを求める式

$$L = \frac{\pi r^2 k \mu N^2}{l}$$

ここに  $r$  ; コイルの半径 (m)

$k$  ; 長岡定数

$\mu$  ; 透磁率 (真空の場合  $4\pi \times 10^{-7}$ )

$N$  ; コイルの巻数

$l$  ; コイルの長さ (m)

を使って求めることにした。ところがこのようなそれ自体が透磁率の大きい材料でできており、形も複雑なコイルでは  $k$  と  $\mu$  の値をどのようにとるべきかは簡単にわからない。そこで直流コイルの要目とインダクタンスから  $k\mu$  の値を逆算してみたところ  $k\mu = 10 \times 10^{-6}$  という値が得られた。この値と  $r = 0.2\text{m}$ ,  $N = 1$ ,  $l = 0.068\text{m}$  の数値を上式に代入すると、 $L = 1.85\mu\text{H}$  という値が得られた。しかしながらこの値には相当大きい誤差が含まれることを予想しなければならないので、計算には 1, 2,  $4\mu\text{H}$  の3種類の値を試みに用いることにした。また、抵抗  $R_2$  には、鉄心および磁極をいくつかの部分に分けて考え、鉄心のケイ素鋼の比抵抗を  $45\mu\Omega \cdot \text{cm}$ 、磁極の鋳鋼の比抵抗を  $15\mu\Omega \cdot \text{cm}$  として計算したところ、約  $20\mu\Omega$  という値が得られた。

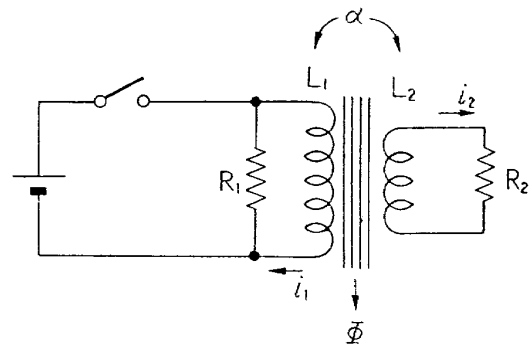


図 17

結合係数  $\alpha$  については簡単に推定する方法がないので 0.5, 0.75, 0.875 の 3 種類の値を試みに用いて計算することにした。

これらのインダクタンス, 抵抗および結合係数の値を用いて誘導電流に対応する磁束を計算した結果を図18および表2に示す。なお, 表2には図16に示した測定結果が記入されているが, これと計算結果を比較すると,  $L = 4\mu\text{H}$ ,  $\alpha = 0.875$  の場合の計算値と④の場合の実測値との一致はかなり良好である。したがって電磁石の鉄心, 磁極および保持器に予想どおりの誘導電流が流れ, これに対応する磁束を生ずることが確認されたことになる。

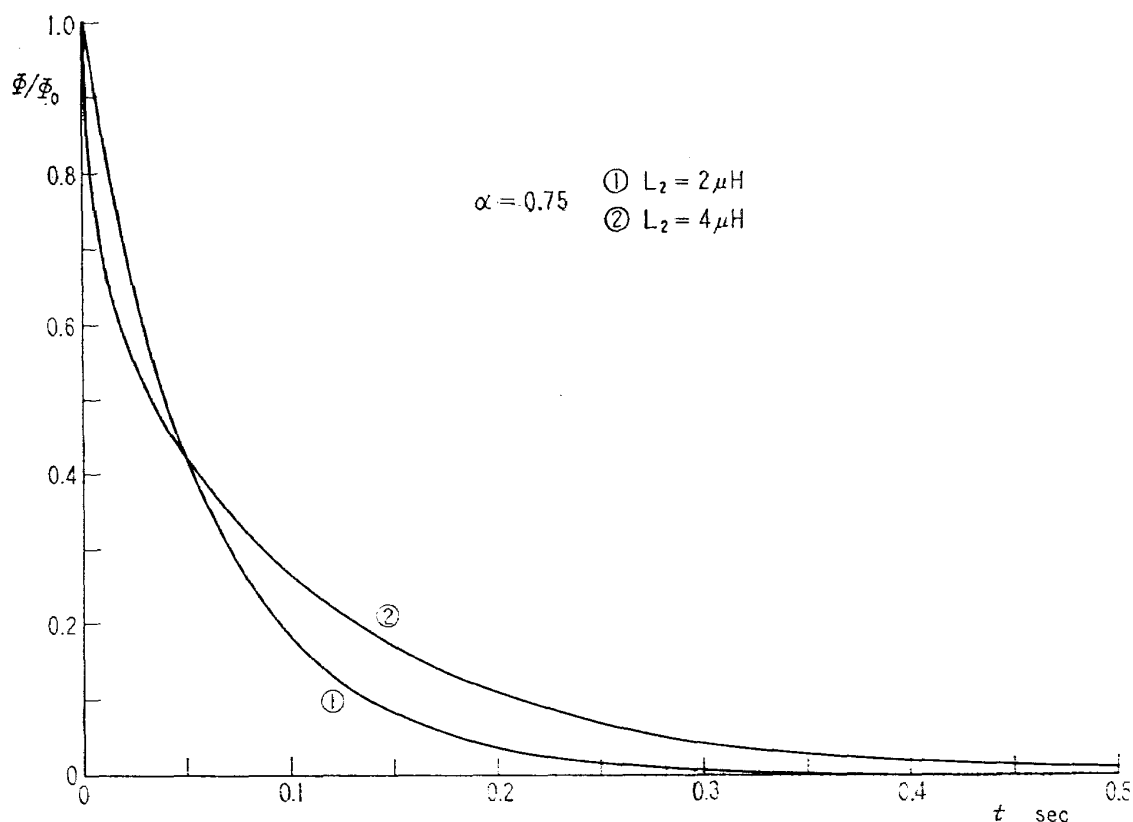


図 18(a)

表 2

		電源を切ってから $\Phi/\Phi_0 = 1/e$ となる までの時間 秒	電源を切ってから $\Phi < 200\text{Gauss}$ となる までの時間 秒
計 算 値	$\alpha = 0.75, L_2 = 2\mu\text{H}$	0.06	0.2
	$\alpha = 0.75, L_2 = 4\mu\text{H}$	0.065	0.3
	$\alpha = 0.875, L_2 = 2\mu\text{H}$	0.065	0.2
	$\alpha = 0.875, L_2 = 4\mu\text{H}$	0.08	0.3
実 測 値	④	0.08	0.4

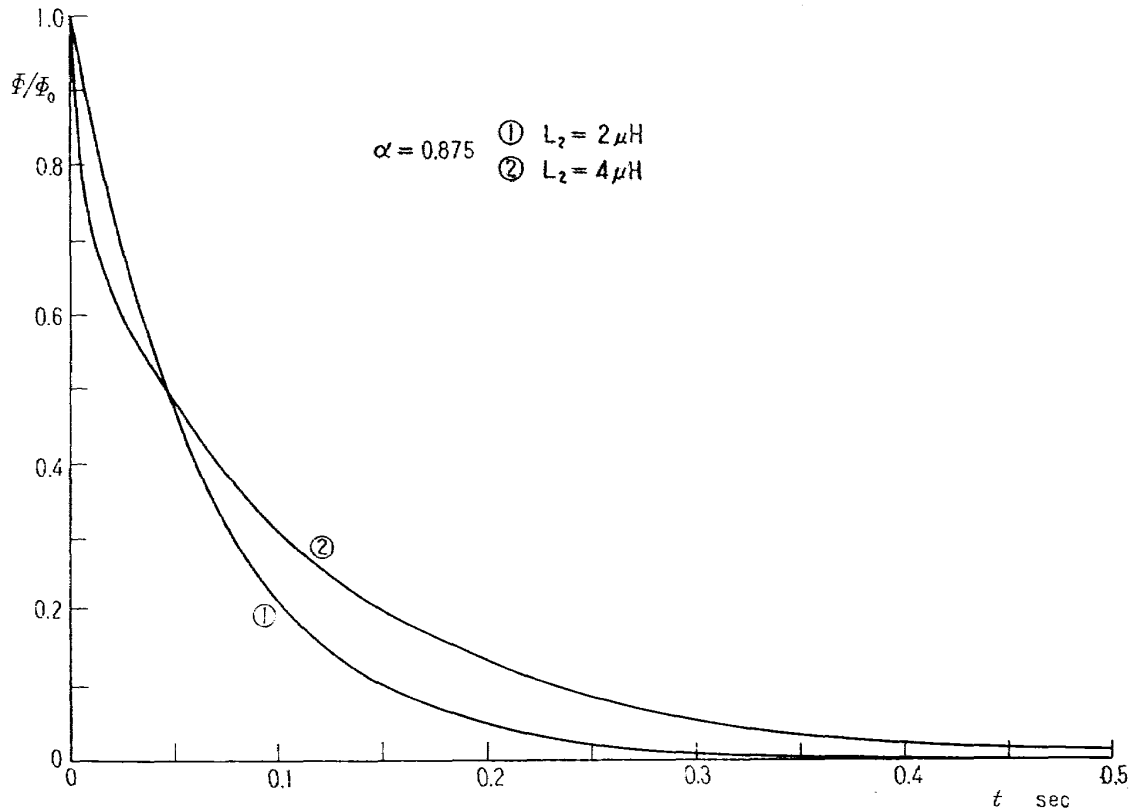


図 18(b)

#### 4.3.3 再改造後の環状電磁石

##### (1) 改造

改造後の環状電磁石を用いて翼の振動減衰率を求めるに際し、これが過大となる原因は直流コイルの過渡電流によって電磁石の鉄心、磁極、保持器、交流コイルおよび試験槽に生ずる誘導電流に対応する磁束が急速に減衰しないためであることが判明した。そこで、この対策を講ずる再改造を行なうことにした。まず、鉄心、磁極および保持器を回転装置の軸系中心線を含む平面によって二つに切断し、この中心線まわりに誘導電流が流るのを防止した。この際、切断面に沿って幅約5 mmの部分が失われ、ここで磁極面上において一様な磁束密度が不均一となり、回転振動試験時に加振力以外の周期的外力が試験翼に加わることになる。そこで、これを防ぐため空隙にケイ素鋼板を入れるとともにガラス繊維入プラスチックの絶縁板を入れてある。このような改造を行なったあとの環状電磁石を図19に示す。

次に、交流コイルについては従来は加振断絶の際に低周波発振器の出力を零とするだけで加振電力増幅器はそのまま接続されていたが、低周波発振器の出力を零とした直後に交流コイル1個ずつが両端開放となるようにリレーを追加し、誘導電流の流れるのを防止した。

また、試験槽については前述のように2個の直流コイルの内一方の接続法を変え、その生ずる磁界の方向を逆にして、試験槽に流れる誘導電流をできるだけ少なくした。

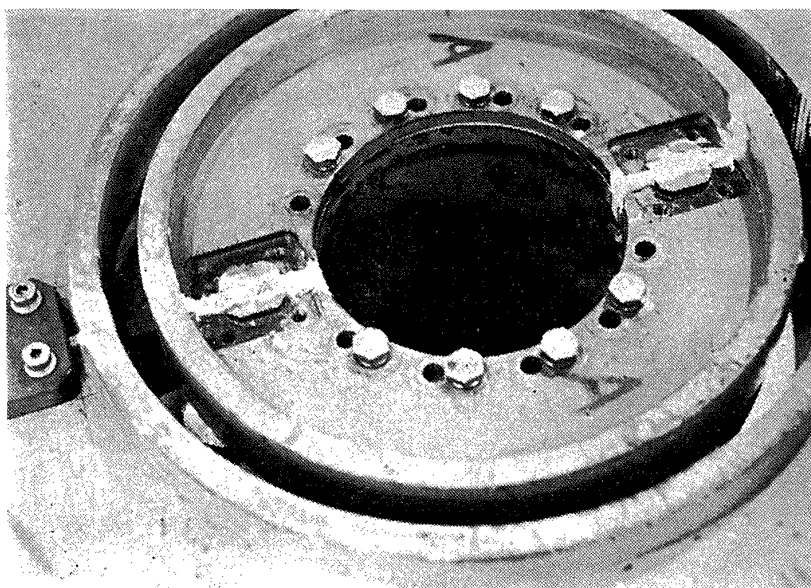
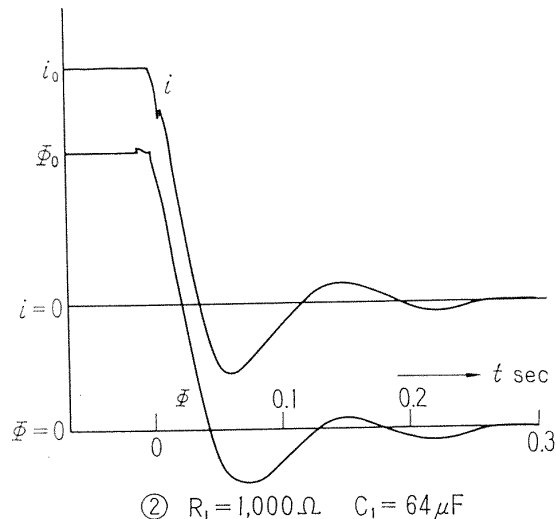
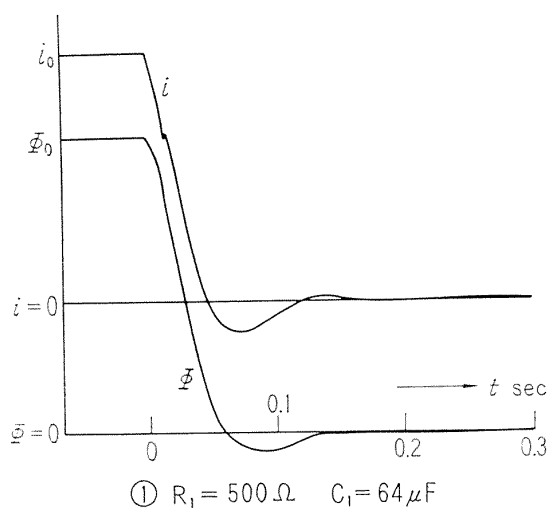


図 19

## (2) 特性試験

再改造後に直流コイルの過渡電流ならびに磁極表面の磁束および残留磁気の測定を行なった。その結果は図20①～⑧に示すとおりである。これを再改造前の測定結果を示す図14, 15と比較すると再改造の効果が著しいことがわかる。すなわち磁束の時間的变化は過渡電流の時間的变化とほとんど同じとなり、残留磁束密度は50～75 Gauss となった。過渡電流の時間的变化としては図21に示す形のものが最良で、この形に近いものは図20⑤, ⑦などである。これらの場合には加振断絶後約0.03秒において磁束は翼の振動減衰率を過大とせぬ値にまで減少している。したがって加振断絶後0.03秒以後に減衰率を測定すればよいわけで、この程度ならば一般の翼の振動減衰試験を支障なく行なえると考えられる。そこでふたたび前述の試験翼について空气中で電磁石加振によって振動減衰試験を行なったところ対数減衰率0.007を得た。これは試験槽内の軸系に取り付けられた翼を機械的に衝撃を加えて加振し空气中でこれに自由減衰振動をさせて求めた対数減衰率0.007と同じである。





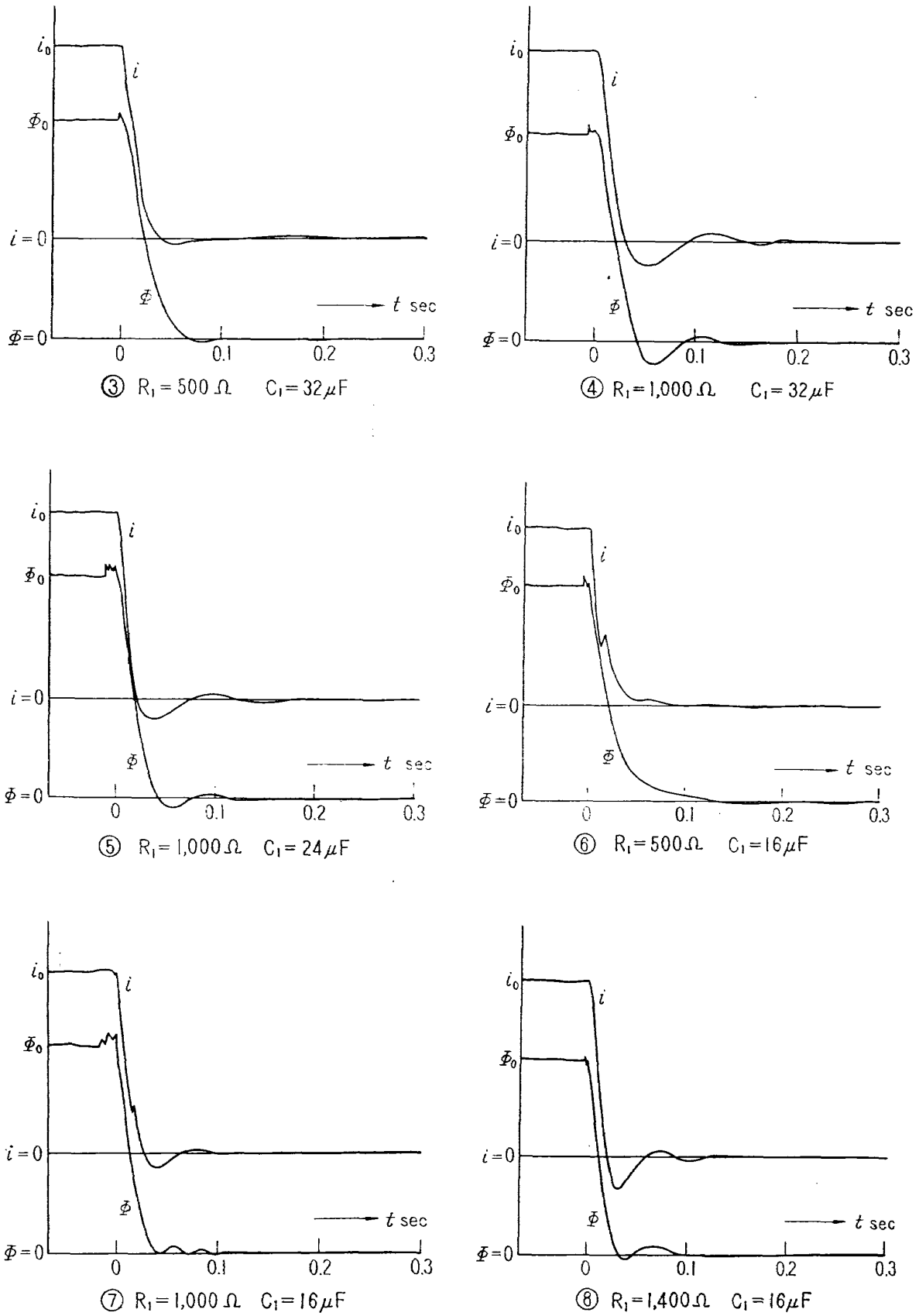


図 20

電流をa, b, cのように減少させれば正の, a, f, gのようにすれば負の残留磁気が残るから, なるべくa, d, eのような形に近い過度電流が流れるようにする。

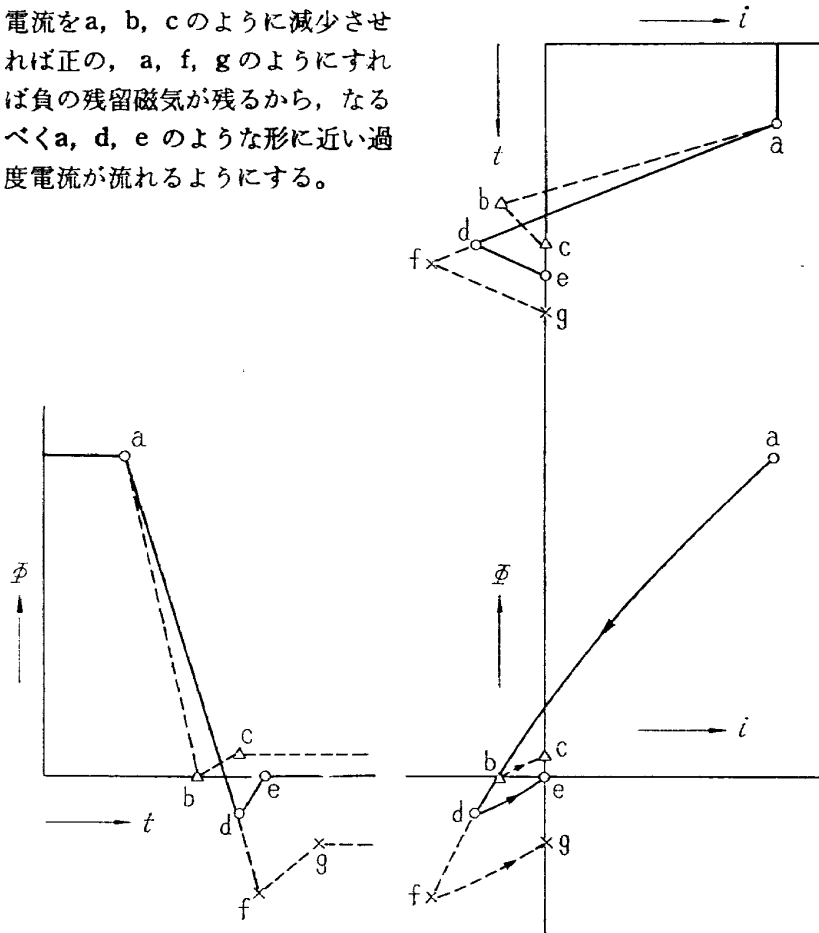


図 21

## 5. 結 論

回転振動試験装置を試作し, その特性を求める試験および計算ならびにこれに基づく改造が行なわれた。その結果, 回転装置の軸系の試験状態における危険速度はだいたい 15,000rpm 以上にあることが確認された。また, 加振装置の環状電磁石は試験翼を加振し, 次いで, 加振電流切断後 0.03秒以後において試験翼にその振動減衰率に影響するような磁束の電磁的制動力を与えることなく自由減衰振動を行なわせうようになった。したがってこの装置を用いて試験翼の振動減衰試験および固有振動試験を行なうことができる見通しが得られた。

終わりにのぞみ, 環状電磁石の特性を求める試験および計算ならびに改造を行なうに際し教示いただいた電気試験所野田制御部長に謝意を表します。また本装置の計画につき助言いただいた当所原動機部山内部長, 松木, 鳥崎両室長ならびに試験に協力にされた内野, 荒井, 祖父江の三研究員に謝意を表わします。

## 文 献

- 1) 航空技術研究所原動機部；航空技術研究所のターボジェットエンジン要素試験設備，航技研報告 TR-24 (昭和37)
- 2) 小堀与一，大森基次；回転翼の振動，日立評論，42巻5号（昭和35）pp. 527—533.
- 3) M. P. Hanson, A. J. Meyer, JR., and S. S. Manson ; A Method of Evaluating Loose-Blade Mounting as a Means of Suppressing Turbine and Compressor Blade Vibration, Experimental Stress Analysis, X, 2 (1953) pp. 103—116.
- 4) Bristol Siddeley ; A New Technique for Investigating Blade Vibrations, Bristol Siddeley Journal, 3, 2 (1961—62) pp. 52—56.

<p>NAL TM-74 航空宇宙技術研究所 回転振動試験装置の計画、構造および特性</p> <p>1966年2月 25ページ</p>	<p>回転振動試験装置は高速回転中のジェットエンジンの翼におけると同程度の回転速度と回転軸中心線からの距離を試験翼にもたせ、これを環状電磁石、衝撃装置などによって加振し、振動減衰試験および固有振動試験を行なう装置である。</p> <p>本装置の試験状態における危険速度はだいたい15,000rpm以上にあり、また、環状電磁石は加振電流切断後0.03秒以後において翼に電磁的制動力を与えることなく自由減衰振動を行なわせうる。</p>	<p>I. 武内澄夫 宮地敏雄 星谷昌二 NAL TM-74</p> <p>II. 621-135 534. 11 534. 14</p>
<p>NAL TM-74 航空宇宙技術研究所 回転振動試験装置の計画、構造および特性</p> <p>1966年2月 25ページ</p>	<p>回転振動試験装置は高速回転中のジェットエンジンの翼におけると同程度の回転速度と回転軸中心線からの距離を試験翼にもたせ、これを環状電磁石、衝撃装置などによって加振し、振動減衰試験および固有振動試験を行なう装置である。</p> <p>本装置の試験状態における危険速度はだいたい15,000rpm以上にあり、また、環状電磁石は加振電流切断後0.03秒以後において翼に電磁的制動力を与えることなく自由減衰振動を行なわせうる。</p>	<p>I. 武内澄夫 宮地敏雄 星谷昌二 NAL TM-74</p> <p>II. 621-135 534. 11 534. 14</p>
<p>NAL TM-74 航空宇宙技術研究所 回転振動試験装置の計画、構造および特性</p> <p>1966年2月 25ページ</p>	<p>回転振動試験装置は高速回転中のジェットエンジンの翼におけると同程度の回転速度と回転軸中心線からの距離を試験翼にもたせ、これを環状電磁石、衝撃装置などによって加振し、振動減衰試験および固有振動試験を行なう装置である。</p> <p>本装置の試験状態における危険速度はだいたい15,000rpm以上にあり、また、環状電磁石は加振電流切断後0.03秒以後において翼に電磁的制動力を与えることなく自由減衰振動を行なわせうる。</p>	<p>I. 武内澄夫 宮地敏雄 星谷昌二 NAL TM-74</p> <p>II. 621-135 534. 11 534. 14</p>
<p>NAL TM-74 航空宇宙技術研究所 回転振動試験装置の計画、構造および特性</p> <p>1966年2月 25ページ</p>	<p>回転振動試験装置は高速回転中のジェットエンジンの翼におけると同程度の回転速度と回転軸中心線からの距離を試験翼にもたせ、これを環状電磁石、衝撃装置などによって加振し、振動減衰試験および固有振動試験を行なう装置である。</p> <p>本装置の試験状態における危険速度はだいたい15,000rpm以上にあり、また、環状電磁石は加振電流切断後0.03秒以後において翼に電磁的制動力を与えることなく自由減衰振動を行なわせうる。</p>	<p>I. 武内澄夫 宮地敏雄 星谷昌二 NAL TM-74</p> <p>II. 621-135 534. 11 534. 14</p>
<p>NAL TM-74 航空宇宙技術研究所 回転振動試験装置の計画、構造および特性</p> <p>1966年2月 25ページ</p>	<p>回転振動試験装置は高速回転中のジェットエンジンの翼におけると同程度の回転速度と回転軸中心線からの距離を試験翼にもたせ、これを環状電磁石、衝撃装置などによって加振し、振動減衰試験および固有振動試験を行なう装置である。</p> <p>本装置の試験状態における危険速度はだいたい15,000rpm以上にあり、また、環状電磁石は加振電流切断後0.03秒以後において翼に電磁的制動力を与えることなく自由減衰振動を行なわせうる。</p>	<p>I. 武内澄夫 宮地敏雄 星谷昌二 NAL TM-74</p> <p>II. 621-135 534. 11 534. 14</p>

TM-48	極超音速風洞用ペブル加熱器の予備実験	1965年2月	平林山幸照, 木口井中, 泉谷原板, 一識, 二富治, 朗之, 夫, 橋吉永, 登崇
TM-49	Queen-Air 機の失速特性について	1965年2月	岡鎌田, 遠幸武, 一男敏
TM-50	LS-A 型ロケットの曲げ剛性および振動試験について	1965年5月	中井日出夫, 高島一明, 史
TM-51	超音速風洞空力データ表示記録装置	1965年5月	泉谷原板, 亘芳雄
TM-53	ベクトルのノルムと行列のノルム	1965年5月	武藤洋治郎, 池田為治, 雄
TM-54	熱衝撃試験用風洞整備試験	1965年5月	坂元思無邪, 光山敏
TM-55	ロケット模型風洞試験における超音速相似則の応用	1965年5月	河崎俊夫, 谷
TM-56	2024-T4 アルミニウム合金平滑丸棒の常温回転曲げ疲労試験	1965年7月	石田誠, 河野哲雄
TM-57	極超音速における軸対称物体の前面抵抗	1965年7月	曾我 男
TM-58	試験用飛しょう体の超音速風洞試験	1965年8月	斎藤秀夫, 木村友昭, 平
TM-59	ジェットリフトエンジン空気取り入口の実験 (I)	1965年9月	近藤博, 増田惣
TM-60	吹出式超音速風洞における実験データの処理方式について (II)	1965年9月	原根利, 高島一明, 夫
TM-61	クインエア機の風洞試験	1965年9月	関川保子, 中矢沢健司, 一実
			戸末健一, 吉田能村
			塚野雄四郎, 別府信宏
TM-62	高温歪ゲージの温度特性試験	1965年10月	江川幸一
TM-63	2024-T3アルミニウム合金の有孔補強平板の軸荷重による疲労特性	1965年10月	飯田宗四郎
TM-64	応力集中による材料の疲れ強さに関する一実験 (I)	1965年10月	池田為治, 坂元思無邪
TM-65	ジェットエンジンの翼の固有振動に関する実験	1965年11月	光山敏雄, 宮地敏雄
TM-69	質量分析計による水蒸気を含む試料のガス分析	1965年12月	武内澄夫, 二隆, 堀内正司
TM-71	可動アイアンバードの構造および機能	1965年12月	星谷昌隆, 斎藤浩子, 計測部
TM-72	地上付近の風の影響による小型ロケットの姿勢角変化	1965年12月	機体第一部, 原動機部, 戸川隼人, 石黒登美子
TM-73	固定端を有する薄肉円筒殻の自由振動について	1966年1月	田寺木一, 泉日出夫

注：欠番は配布先を限定したもの

## 航空宇宙技術研究所資料74号

昭和41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)44-9171(代表)

印刷所 奥村印刷株式会社  
東京都千代田区西神田1-10