

新設した気体ジャーナル軸受実験装置と その二、三の実験結果について

曾田 範宗・丸茂 齊*・齋藤 忍**

A Newly-Equipped Test Rig for Gas-Lubricated Journal Bearings and Some of Its Test Results

By

Norimune SODA, Hitoshi MARUMO, and Shinobu SAITO

Abstract: The use of gas bearings is spreading in various fields of modern industry. Gas bearings have often special merits when used in machine parts where the temperature is very high or low, where the frictional torque must be exceptionally low, where contamination by ordinary oily lubricants is highly objectionable, and where the shaft must be run at very high speed, etc.

In recent years many papers have appeared in the theoretical field of gas bearings, and, on the contrary, not so many in the experimental field, maybe owing to experimental difficulties and complexities of the results; we can find hardly any comprehensive experimental work concerning the performances of a gas-lubricated journal bearing.

We have here designed and manufactured a test rig with the aid of the Central Research Laboratory of the Tokyo-Shibaura Electric Co. for studying the general performance of a gas-lubricated journal bearing, which has the principal dimension of $50\text{mm}\phi \times 100\text{mm}$ and can be run up to 20,000rpm.

By the use of this rig, we can measure the frictional torque, pressure distribution in the gas film, and the static and dynamic changes of eccentricity, both in hydrodynamically and hydrostatically lubricated conditions.

In this paper the details of the rig and some of the problems encountered during the preliminary test are described.

I. ま え が き

軸受が高温度や低温度で使用される場合や、原子炉や計算機などにおいて油を使用することが汚染の観点から好ましくない場合、軸受の摩擦が誤差の原因となるような場合、高速軽荷重の軸受の駆動馬力を節約したい場合などにおいて、摩擦力が小さく、使用可能な温度範囲の大きい気体軸受がふつうの油潤滑の軸受よりも有利な場合が最近ふえつつある。

* 東芝中央研究所

** 東大大学院学生

このような要求に伴って、気体軸受に関する多くの理論的、実験的研究が行なわれているが、その実験に伴う諸困難のため、とくにジャーナル軸受についてはまだ十分な資料が得られていない。また気体軸受の実用化を大きくはばんでいる自励振動の問題については、さらに研究がおこなわれている。

筆者らは、上述の諸問題の実験的研究のため、東芝中央研究所の協力のもとに、気体ジャーナル軸受の実験装置を試作した。本装置は気体軸受の荷重および回転数を変えて、圧力測定、摩擦力測定、偏心率および種々の振動計測ができるように作られている。

本報告では、まずこの実験装置の概要および圧力測定、摩擦力測定の実験方法を説明し、つぎに実験に際して観測された若干の偏心や振動の測定結果を報告する。

2. 装置の概要

本装置はつぎのものから構成されている。

- (1) 気体軸受実験装置本体
- (2) 乾燥圧縮空気発生装置
- (3) 計測装置

以下これらを説明するが、各構成要素の説明は必要最小限に止める。

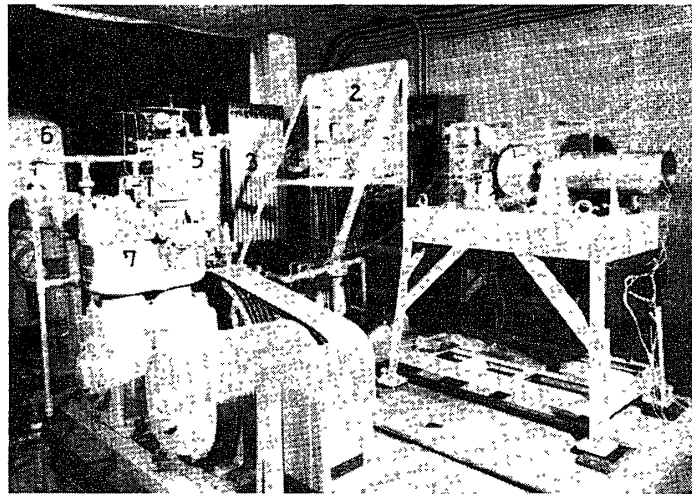


写真1 装置の全体

①気体軸受実験装置本体、②圧力計パネル、③マノメータ、④シンクロスコープ、四要素キャパシトマイクロメータ、デジタルカウンタ、スライダック、⑤半自動脱湿装置、⑥空気タンク、⑦圧縮機

本実験装置の主要目はつぎのとおりである。

1. ジャーナル試験軸受

- 1.1 形 式 …… 360° ジャーナル軸受
- 1.2 寸 法 …… 50φ(内径) × 100φ(外径) × 100
- 1.3 材 質 …… BsBMD2

2. 試験軸

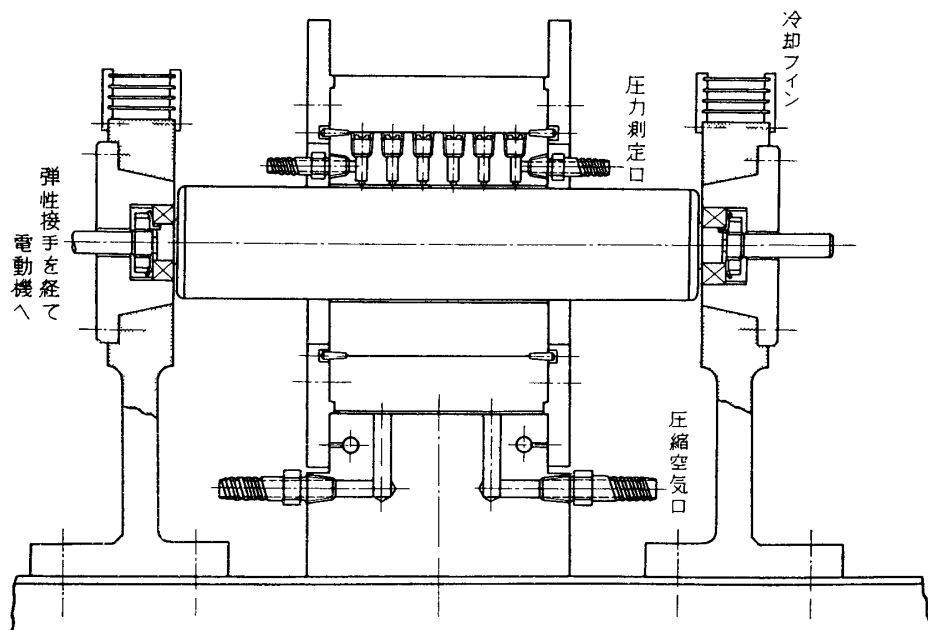
2.1 寸 法 $\cdot 50\phi$ 2.2 材 質 $\cdots S45C$ 硬質クロムメッキ3. 支持主軸受 \cdots 深溝ラジアル玉軸受 SP6202ZZ4. 試験軸回転数 $\cdots 2,000\sim 20,000$ rpm 可変5. 試験軸と駆動電動機の接続 \cdots 弾性接手6. 最大ラジアル荷重 $\cdots 250$ kg7. 荷重方法 \cdots 重錘および油圧8. 試験軸受ケースの浮上 \cdots 空気の静圧

9. 各部の潤滑

9.1 試験軸受 \cdots 清浄乾燥空気の自然給気, および強制給気9.2 支持主軸受 \cdots グリース潤滑10. 偏心および軸と軸受の相対運動の測定 \cdots キャパシトマイクロメータを用い, 静電容量の変化による.11. 圧力分布の測定 \cdots マノメータおよびブルドン管圧力計による.12. 摩擦力の測定 \cdots テンションメータによる.

2.1 気体軸受実験装置本体

十分な剛性を持ったベッドがベッド支持台の上に置かれ, ボルト締めされている. ベッドの上に装置された本体はベッド支持台の最下部に置かれた防振ゴムによって, 外力による強制振動が除かれている. 図1のように電動機によって回転されている軸は, ジャーナル軸受の両側で超精密級玉軸受によって支持されている. またジャーナル軸受の下部にジャーナル軸受浮上用静圧支持台が装置されている. ジャーナル軸受はジャーナル軸受浮上用静圧支持



第1図 気体軸受実験装置本体組立図

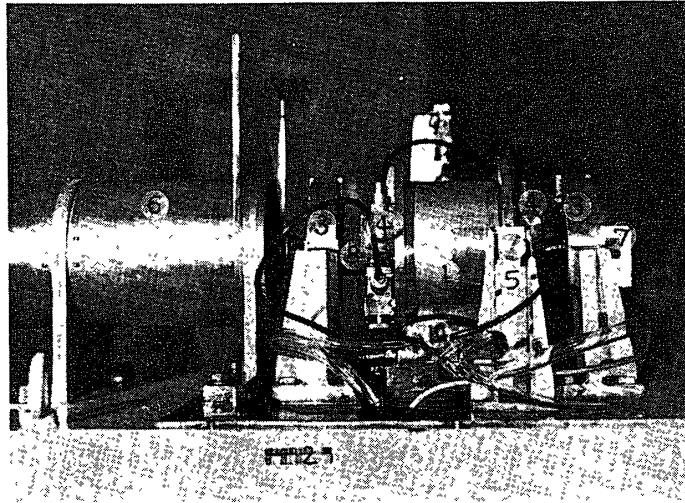


写真 2 気体軸受実験装置本体

①ジャーナル試験軸受, ②ベッド, ③玉軸受, ④偏心測定用容量ピックアップ, ⑤ストッパー, ⑥電動機, ⑦回転数測定用電磁ピックアップ, ⑧試験用主軸, ⑨摩擦力測定装置, ⑩ジャーナル軸受浮上用静圧支持台

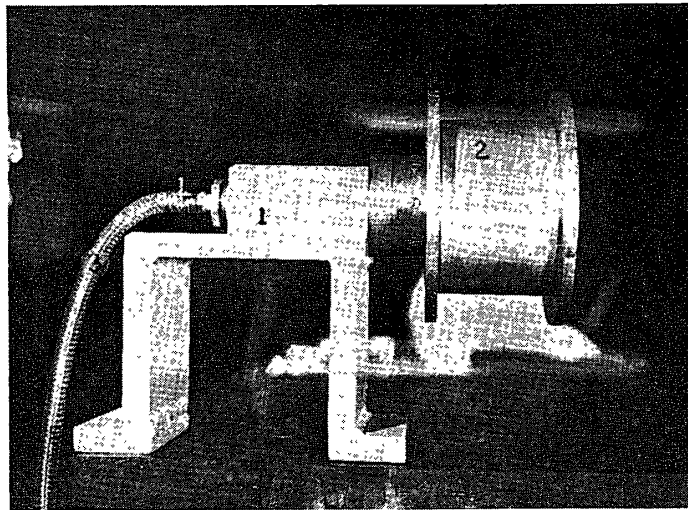


写真 3 摩擦力測定用軸受静つり合検定装置

①検定装置本体, ②摩擦力測定用軸受, ③乾燥圧縮空気供給パイプ

台からの圧縮空気により、水平方向および垂直方向位置が規定される。ジャーナル軸受浮上用静圧支持台はベッド上に十分な精度で組み立てられている。またジャーナル軸受浮上用乾燥圧縮空気は、そこから水平方向に左右2個ずつ、垂直方向にその中心に対して対称な4個の穴から吹きだされ、おのおの圧力は圧力計架台のブルドン管圧力計で計測されている。ジャーナル軸受は、ジャーナル軸受浮上用静圧支持台からの乾燥圧縮空気により、浮上された状態で始動される。軸は2点で玉軸受によって位置が固定されているものと考えて、ジャーナル軸受と軸との相対位置の変化は容量変化として容量ピックアップからとりだす。この容

量変化は振動の観測にも利用される。

軸の回転数の測定のため、電磁ピックアップが用いられ、また圧力測定の際にはジャーナル軸受が回転しようとするのを、ストッパーで固定する。このストッパーの位置はまた圧力測定口の周方向位置を示す。このため、ジャーナルには左右に円形の側板がとりつけられ、その側板の外側に角度目盛が表示されている。軸受の荷重を増加させるためには、写真4のように油圧装置が使用される。

摩擦測定に際しては、鉛の重錘板によってあらかじめ軸受の重量を増加させる。さらに摩擦力は写真2のジャーナル軸受にみられるネジ穴にネジをいれ、そのネジと摩擦力測定装置に装置されるテンションメータとの間に張られた糸の張力をテンションメータで計測する。

さらにこれは本体とともに写真1のように容器のなかに装置され、容器のなかには乾燥圧縮空気が送り込まれ、ほこりの侵入が防止される。これらジャーナル軸受、軸、ジャーナル軸受浮上用静圧支持台は機械的に精密に作られ、これらの分解、組み立ては傷をつけたり、ほこりがついたりしないように注意するとともに、精度に注意しなければならない。ジャーナル軸受は予備実験用、圧力測定用、摩擦測定用等別々に作られ、また半径方向すきまも変えて作る。振動が発生するとジャーナルおよび軸が損傷するので、軸も交換用が用意されている。

ジャーナル軸受浮上用静圧支持台においては、組み立て精度とともに振動の問題が重要である。最初圧縮空気吹出口に凹みつきのものを作ったが、これは空気を吹き出すだけでも振動を生じた。そこで凹みのない圧縮空気吹出口のものを製作使用しているが、さらに形状を変えることも目下考慮している。

2・2 乾燥圧縮空気発生装置*

電動機によりベルト駆動された2気筒の圧縮機は水道水で冷却され、空気タンクとのあいだにアンローダーバルブによってフィードバックされる。その際空気タンクの最大圧力は7kg/cm²、最小圧力は6kg/cm²である。なお圧縮機が処理できる空気流量は1m³/minである。

圧縮機をでた空気は、アフタークーラーで水道水によって冷却され、ほぼ一定の温度に保たれる。さらにドレンセパレーターによって空気中の水分、油などが除去され、空気タンクに貯えられる。タンクの容量は470lで、耐圧は8kg/cm²である。タンクをでた空気は10μmのフィルターを通過して半自動脱湿装置で水分が除去される。脱湿装置の処理空気量は0.9m³/minで、出口露点は夏期で約-5°C、冬期で約-20°Cである。

乾燥剤としてはシリカゲルが使われている。脱湿装置をでた空気中のごみは10μm、2μmの二つのフィルターで除かれ、各用途に配管される。これらの配管は図2に示されている。

2・3 計測装置

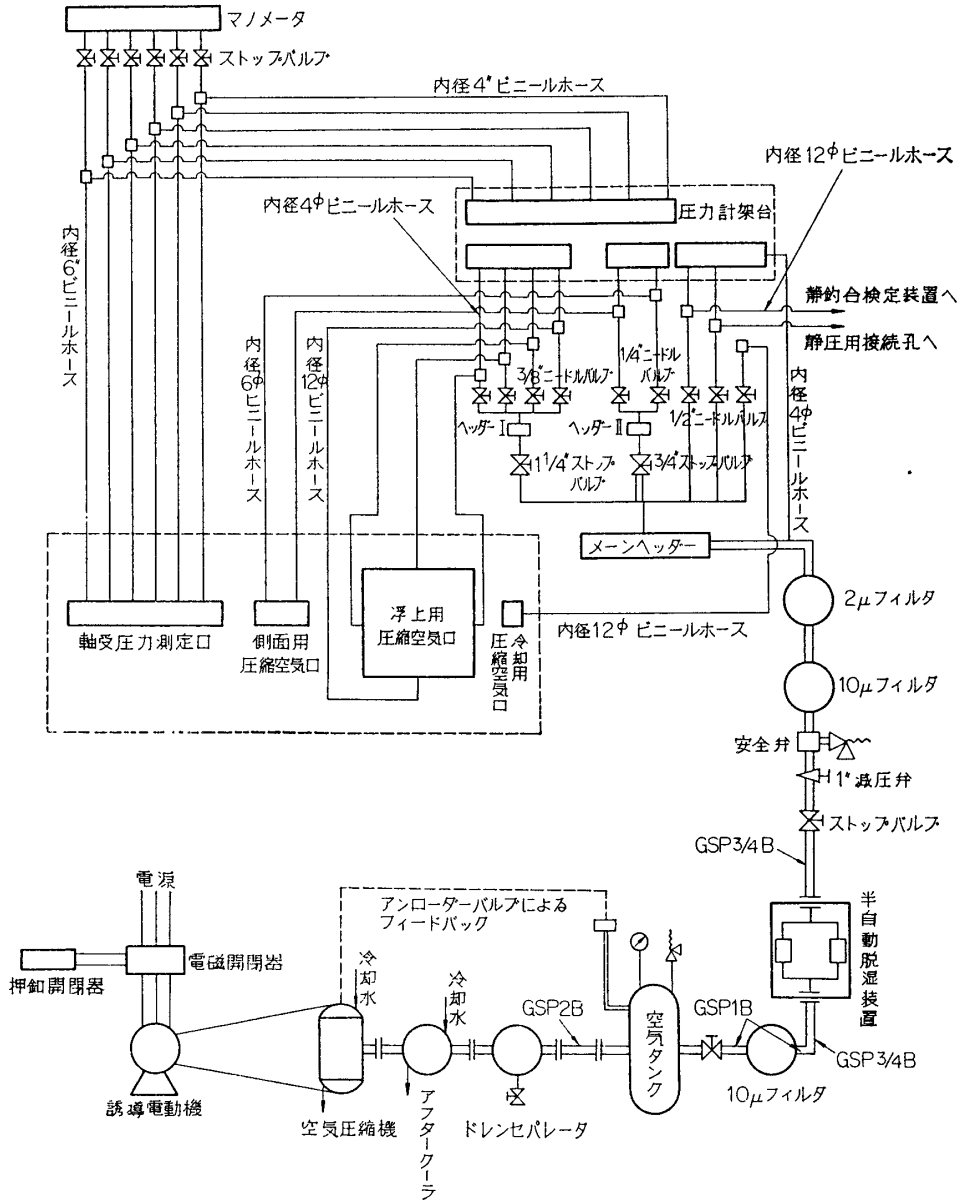
2・3・1 圧力測定装置

a. マノメータ

軸受の圧力測定に用いられ、圧力計架台におけるブルドン管圧力計に連動する。軸受内部の軸方向および周方向圧力分布を測定する配管系統は図2に示されている。

b. ブルドン管圧力計

* 必要に応じ、建物の共通空気源を利用することもできる。



第2図 乾燥圧縮空気発生装置配管系統

圧力計パネルに装置され、軸受内部の空気圧、ジャーナル軸受浮上用支持台に供給される空気の各要素別の空気圧、空気源圧力、静つり合測定装置に供給される空気圧、静圧などを指示する。配管系統は図2に示されている。

2.3.2 荷重装置

a. 基準分銅式圧力計、油圧荷重装置

圧力測定に際して、軸受にかかる荷重を増加するのに油圧装置が使用され、その場合の油圧は基準分銅式圧力計で測定される。その最高圧力は 50 kg/cm² で、最小分銅は 0.5 kg/cm² である。

b. 重錘板

摩擦測定に際しては、軸受に荷重をかけるのに油圧装置は使用できないので、重錘板をジャーナル軸受の両端に取付け、軸受の重量を変化させる。1.25 kg の重錘板が 8 枚準備されている。

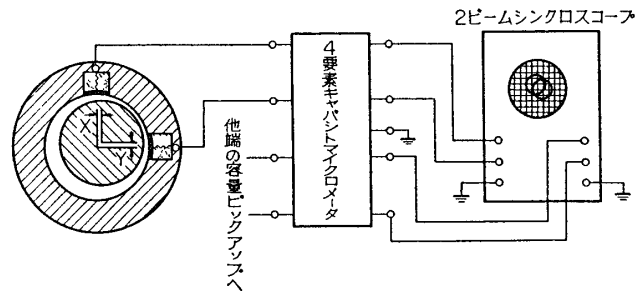
c. ジャーナル軸受浮上用静圧支持台

ジャーナル軸受の始動の際、軸受と軸とが金属接触した状態のまま始動すると、双方ともに損傷しやすいので好ましくない。そこで静圧支持台からの圧縮空気で、軸受を浮かせて始動する。また軸受の軸方向位置を規定するために、軸受両端に取付けた側板に同様に圧縮空気を吹きだしている。

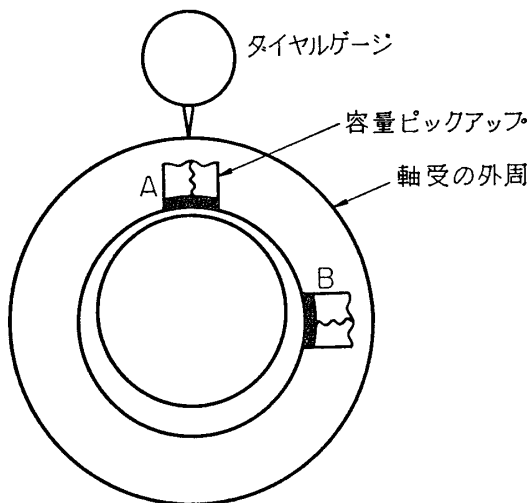
2.3.3 ジャーナル軸受と軸との相対変位検出装置

静電容量ピックアップ、キャパシトマイクロメータ、キャパシトマイクロメータ用電源部、2ビームシンクロスコープからなり、容量ピックアップが検出した容量変化、すなわち軸受と軸との相対位置変化をキャパシトマイクロメータで共振を利用して電圧に変換し、さらにシンクロスコープで増幅し、そのブラウン管で測定する。この容量ピックアップは写真 2 で明らかかなように、ジャーナル軸受の両端ともに X, Y の二方向に装置されている。

この装置は気体軸受が振動状態にあるときはその周波数および軌跡を測定し、振動していないときは偏心を測定するのに使用される。またこの装置は実験に使用するまえに検定しない



第3図 ジャーナル軸受と軸の相対変位検出装置結線図



第4図 キャパシトマイクロメータの検定

なければならない (図3参照)。

キャパシトマイクロメータの検定は軸にとりつけられたキャパシトマイクロメータ校正装置にダイヤルゲージを装置し (図4参照)、いまAの容量ピックアップについて検定するものとするれば、Aのピックアップを図のように軸受の真上に固定する。そしてダイヤルゲージの先端が軸受の真上の位置で軸受の外側表面と接触し、軸受が最も低い状態にあるときに指針が零を示すよう調節する。ついで静圧支持台からの圧縮空気で軸受を浮上させ、各位置におけるダイヤルゲージの指針とブラウン管上のビームの位置とを記録する。

他のピックアップも同様にして検定する。

この検定を行なうときは、すでにキャパシトマイクロメータ、シンクロスコープは定常状態にあるとともに、キャパシトマイクロメータについては、さらに零点調整、100%調整が正しく行なわれていなければならない。

この検定曲線は偏心の測定に使用される。

2.3.4 回転数測定装置

電磁ピックアップ、デジタルカウンタからなり、軸の回転数を測定する。回転数の測定可能範囲は 200~20,000rpm である。

2.3.5 軸駆動電動機入力制御装置

この電動機は直巻電動機であるが、交流電動機として使用するときには、スライダックで電圧が変化される。しかし電動機の特徴が、直流電動機として使用される方が適している場合には、シリコン整流器とスライダックとを併用する。

2.3.6 摩擦力測定装置

ジャーナル軸受の摩擦力は、テンションメータとジャーナル軸受の外側表面とを結んだ糸の張力を測定することによって測定する。テンションメータはその最大値が 5g, 15g, 50g の三種類作られている。いま軸受の内径を D_1 、外径を D_2 、糸の張力を F_2 、軸受の摩擦力を F_1 とすれば、 F_1 は次式で示される。

$$F_1 = F_2 \frac{D_2}{D_1} \quad (1)$$

2.3.7 静つり合検定装置

ガス軸受の摩擦力は本来非常に小さいので、摩擦力測定用軸受にわずかでも不つり合が存在すると、それが誤差の原因となる。この不つり合を無視できる程度まで小さく修正できるように、写真3のような静つり合検定装置が用意されている。この装置においては、軸受と軸とのすきまは乾燥圧縮空気によって、きわめて摩擦の小さい状態に保たれている。したがって軸受に不つり合が存在すれば、軸受は自然に回転を始める。ある点に関する不つり合は、適当な位置に適当な修正重量を加えることによって修正される。この検定に際して軸受は多くの不つり合点を持つことが考えられるので、修正は軸受が任意の点に関して、静止できるようになるまで行なわなければならない。

3. 実験方法

ガス軸受の実験に際して、half speed whirl といわれる自励振動が発生すると、その振幅は急速に成長し、そのために軸受および軸が損傷するので、この自励振動に対して最も注意が払われなければならない。とくに摩擦力測定については振動検出装置がないので、その振動制御に十分習熟してから行なう必要がある。

実験はまず予備実験用の軸受と軸とを用いて、half speed whirl を発生させないで回転数を増加させることに努力が払われるわけであるが、ここではそのような操作に習熟したものとして、圧力測定および摩擦力測定の実験方法を略記する。

3.1 圧力測定

実験に際して、軸受および軸を本体に組み立てるときは、ベンゼンでふき、さらにアセトンでふいて汚れを十分におとし、傷をつけないよう、さらに精度にも十分注意しなければならない。各電気配線および各空気配管が正しく行なわれたならば、キャパシトマイクロメータ、シンクロスコープの電源を入れ、定常状態になるまで放置する。キャパシトマイクロメータについては約3時間を要する。

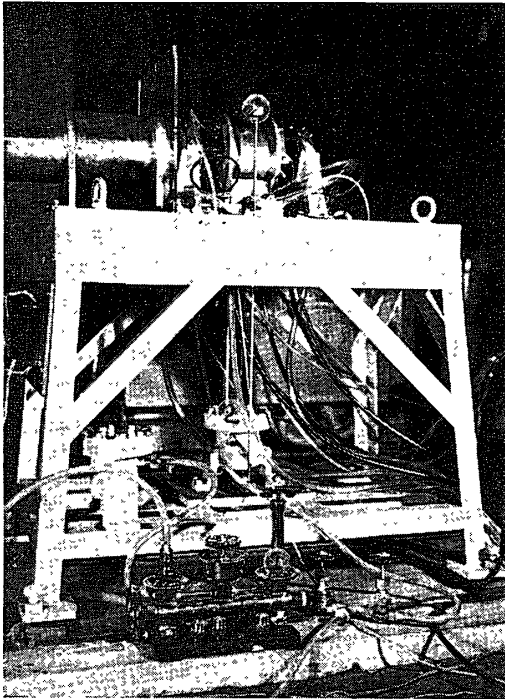


写真 4 油圧式荷重装置による圧力測定

- ①基準分銅式圧力計, ②油圧式荷重装置,
③油圧式荷重装置配管, ④防振ゴム

は一定量以下に調整されなければならない。軸を回転させるときには、軸受を圧縮空気で浮かせて、軸が回転することを確認してから、スライダックで電動機入力電圧を上昇させて起動する。スライダックで電圧をわずかに上げて、かなり回転数は増加し、また電圧上昇と回転数の増加とのあいだには時間的なずれがあるので、あまり電圧を上げすぎて、そのために half speed whirl が発生することがないように注意する。

さらに電動機の特性が不適當であると、回転数があるところから急速に増大し、電圧を少々下げても増大傾向がとまらず、また下げすぎると急速に減少し、軸の回転が停止して、一様に回転数を増加させることが困難になる。このような場合には電動機の特性を適当なものに変化させることが必要である。回転はスライダックの電圧、圧力計の指針または基準分銅式圧力計の圧力、デジタルカウンタの回転数の三者をてらしあわせて上昇させる。まず振動が発生しそうな程度まで回転数が増加したならば、圧力計の指針をみながら、バルブを絞って圧力を下げる。圧力を下げるとともに電圧を上げて回転数を増加させる。以上の操作を数回行えば、圧縮空気のバルブは完全に閉じられる。これ以上に回転数を増加させるためには、油圧装置により荷重をかけなければならない。油圧による荷重は、軸受の中央にかけ

圧縮機を作動させるまえに、冷却水を適当な量だけ循環させ、ドレンセパレーターおよび各フィルターから油や水分を除き、各バルブを点検する。圧縮機、脱湿装置を作動させ、脱湿装置冷却用空気を少量流す。つぎにキャパシトマイクロメータの零点調整、100% 調整を行なう。調整終了後はキャパシトマイクロメータに接続されている電気配線を動かさないようにする。ついですでに述べたようなキャパシトマイクロメータの検定を行なう。これらの操作を終了したあとで、キャパシトマイクロメータの電気配線を大きく動かしてしまったならば、キャパシトマイクロメータの性能上容量変化が線形的に電圧に変換されないおそれがあるので、調整および検定は再びはじめから行なわなければならない。

シンクロスコープは外乱を拾いやすく、その場合、ブラウン管上に軸受と軸との相對運動およびその振動数が正確に現われないので、外乱

たベルトを、基準分銅式圧力計で発生させた油圧により引張力を作用させると同時に圧力を測定して行なわれる(写真4参照)。このように油圧装置を使用すれば、非常な高速回転が得られる。

half speed whirl が発生しそうになると、ブラウン管上のビームが小さな円状の軌跡を描きはじめる。そのときには荷重を増すか、電圧を下げて回転数を下げる必要がある。しかしこの自励振動は発生すると急速に振幅を増大し、たちまち軸受と軸とが金属接触するようになるので、回転数増加操作にはなんらかの自動制御を利用することも考えられている。各荷重および回転数ごとに圧力と偏心を測定する。圧力測定口は軸受の軸方向に6か所作られており、おのおのの圧力はブルドン管圧力計およびマノメータで測定される。周方向の圧力分布測定は軸受をまわして、ストッパーでその角度を読んで行なう。軸が正しい水平状態にないと、かなり敏感にその影響が軸方向の圧力分布に現われる。そのようなときは水平度を十分にだしなおさなければならない。

必要な圧力測定を終了したら、スライダックで電圧を下げ、それとともに軸受荷重をへらして、できる限り低回転で回転を停止する。

3・2 摩擦力測定

摩擦力測定が圧力測定と異なる点は、摩擦力測定という要求から、振動検出装置がいっさい使用できない点である。また、荷重装置として油圧装置も使用できないので、重錘板を使用する。摩擦力は前記のようにテンションメータで測定し、また摩擦力測定用軸受は静つり合検定装置で不つり合を修正したものをを用いる。

4. 予備実験結果

予備実験としてクロムメッキを施した軸と、二硫化モリブデンを塗布し、さらに表面仕上げを行なったアルミニウム軸受を使用して、回転数を上昇させる実験を行なった。この軸受では圧力測定は行なわず、軸受と軸との相対運動と偏心とを検出した。軸受の材質がアルミニウムなので、油圧装置による荷重増加は行なわず、圧縮空気により重力に逆向きに荷重を

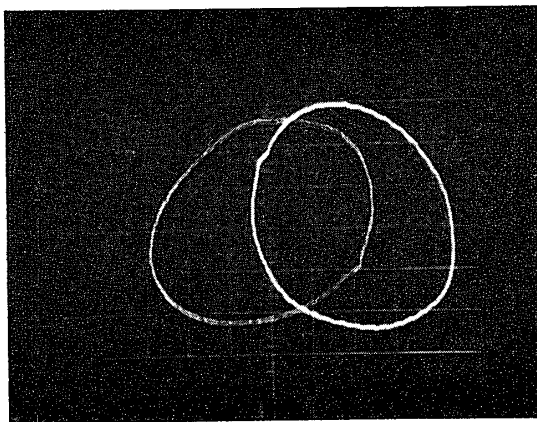


写真5 half speed whirl による軌跡 (1)
1,130rpm, 空気圧 0.175 kg/cm²

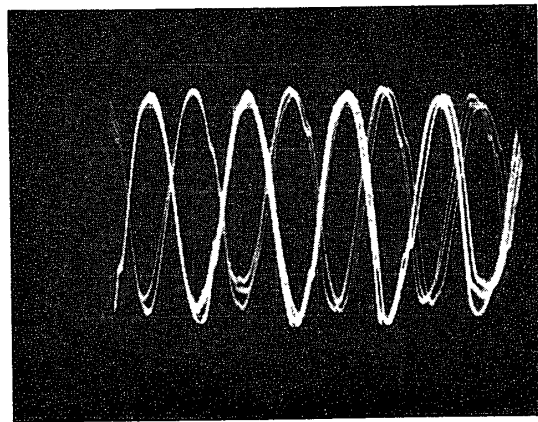


写真6 half speed whirl の振動数 (2)
1,100rpm, 50ms/1目盛, 空気圧 0.175 kg/cm²

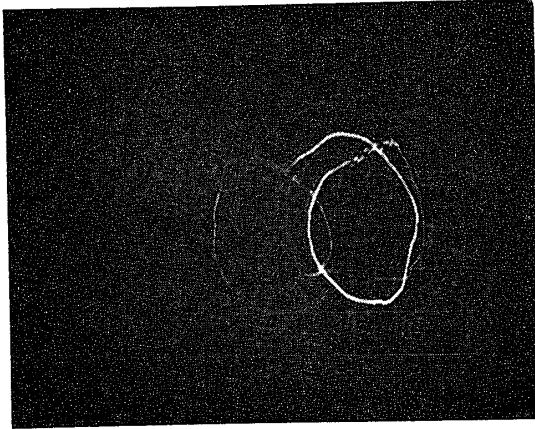


写真 7 half speed whirl による軌跡 (3)
4,610rpm, 空気圧 0kg/cm²

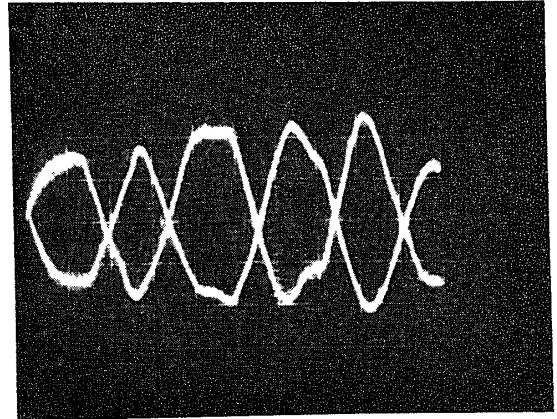


写真 8 half speed whirl の振動数 (4)
4,400rpm, 10ms/1目盛, 空気圧 0kg/cm²

加えて回転数を増加させた。二硫化モリブデンを塗布したのは、half speed whirl による金属接触の被害をできるだけ防止するためである。回転数は 10,000rpm 程度まで増大させた。half speed whirl が発生していない状態では、軸の回転数と同じ速度の振動が存在し、その状態で回転数をわずかに増加させると、軸の回転数のほぼ半分の速度の振動 (half speed whirl) が発生した (写真 5, 6, 7, 8 参照)。実験後軸受および軸にかなりの金属接触の跡がみられた。実験はまた圧力測定可能な軸受を使用しても行なわれた。しかしこの軸受は二硫化モリブデンを塗布した後の表面仕上げを行なわなかったため、half speed whirl を発生させることなく回転数を増加させることはほとんど不可能であった。表面仕上げ状態が half speed whirl に与える影響は重大であると思われる。その場合二硫化モリブデンを塗布することは、表面仕上げの点およびその粉末の影響などにおいて、高速回転に対して好ましくない影響を与えるものと考えられる。したがって half speed whirl による金属接触のために軸受や軸が損傷することを防止するためには、軸の加速に際し、なんらかの自動制御による振動防止策も必要であろうと目下考えている。

5. む す び

以上東京大学宇宙航空研究所の筆者の研究室に最近設置された気体軸受実験装置の概略を説明し、予備実験における問題点を述べた。本装置は設計の目標をほぼ満足していることが分かったので、今後この装置を用いて各種の本実験を進める予定である。

末筆ながら本装置の設計および製作に協力された東芝中央研究所の田原久祺氏をはじめ、関係各位に深く感謝の意を表す。