気 体 軸 受 の

最 近 の 進 歩*

森 美 郎**

1. は し が き

気体軸受は近年その応用方面が広く開発され、したがって基礎および応用の両方面の研究が世界各国において大いに活発に実施されている。すなわち、米国 Franklin 研究所の調査による 1957 年 12 月までの世界各国における研究論文および総説の数は 102 編であったのに対し、1959 年 10 月 第 1 回国際気体軸受シンポジウムの時期には、これが 290 編の多きに達しており、以後筆者の気づいた範囲で、1960 年 7 編、1961 年 16 編、1962 年 30 編、1963 年 26 編と続いている。1964 年においても、米国潤滑学会（創立 20 周年）の講演題目 45 のうち 10 編が気体軸受関係であり、また同年秋のアメリカにおける国際潤滑会議をみても総数 50 編のうち 12 編が気体軸受の論文である。以上の数字を見ても、いかに気体軸受に対する関心が深いかが判るであろう。またそれと同時に、いまだに技術的あるいは理論的な問題を含んでいることも、その研究状況より想像にたたくところである。この点、早くからこの軸受の研究に着手しながら、いまだに应用の実をあげていないわが国にとっては、大いに興味をもってこの軸受に関心を寄せるべきであろう。

2. 気体軸受研究の動向

気体軸受の研究が 1957 年前後を境として大きな進展を示した事実は、この時期における原子炉の開発および米・ソの宇宙競争に深い関連を有している。すなわち、U.K.A.E.A. (Unified Kingdom Atomic Energy Authority) はこの時期に 150°C、100 psig の炭酸ガス循環送風機および溶融放射性ビスマスの循環ポンプの気体軸受について発表しており、またアメリカが初めて人工衛星打ち上げに成功したジュピター ロケットの慣性航行用ジャイロ スコープには気体軸受が使用されていたの

であった。

この 2 つの使用目的は国家的要請に従うものであるから、大いに基礎研究を刺激し、多くの応用研究を進展させることとなった。潤滑用の気体も、その使用目的によって炭酸ガス、ヘリウム、アルゴン、水素、窒素など空気以外のものが使われるようになったから、従来の「空気軸受」の用語は「気体軸受」に改められることになった。

以後、原子炉用送風機およびロケット用ジャイロ スコープのための気体軸受の研究は継続されて現在に至っているのであるが、現在どのような使用目的が重要視されているかを第 1 表で見てみよう。

(第 1 表) 1964 年 気体軸受研究機関数 (用途別)

国 名	ア メ リ カ					イギリス		その他	
	静 圧	複 合	動 圧	不 明	計	動 圧	不 明	静 圧	動 圧
基 礎 研 究	11	1	10	2	24	4	2	3 ⁽¹⁾	0
ジャイロ	7	1	6	2	16	3	0	—	—
スコープ	5	1	4	7	17	0	4	2 ⁽²⁾	1 ⁽³⁾
圧縮機および循環機	1	0	1	0	2	—	—	—	—
遠心分離機	1	0	0	2	3	—	—	0	1 ⁽⁴⁾
ターボ膨張機	0	0	0	2	2	—	—	0	1 ⁽⁵⁾
高周波モータ	1	0	0	0	1	0	1	*	—
内面研削盤	1	0	0	0	1	—	—	—	—
ターボドリル	1	0	0	0	1	—	—	—	—
歯科用ハンドピース	0	0	0	0	0	—	—	1 ⁽⁶⁾	0
高速カメラ	3	0	0	0	3	—	—	2 ⁽⁷⁾	0
各種試験機	1	0	0	0	1	—	—	—	—
宇宙シミュレータ	1	1	3	0	5	—	—	—	—
テープレコーダ	—	—	—	—	—	—	—	—	—

* ソ連に 1 か所ある

- (1) 日本、ドイツ、スコットランド
 (2) フランス (3) スイス (4) スイス
 (5) スイス (6) カナダ
 (7) カナダ、スコットランド

* Recent Developments of Gas Bearings.

** Y. Mori, Member. 京都大学工学部 機械工学科

この表は1964年 Franklin 研究所の Fuller 教授が世界各国（共産圏を含まず）の大学，研究所，会社などの研究機関から回答を求めたアンケートによるもので，回答を寄せたのは，アメリカ 50，イギリス 16，フランス 2，西ドイツ 1，スコットランド 1，カナダ 1，日本 1（京大）の 74 機関にのぼっている。（1962 年のアンケートでは 50 個所程度）。このアンケートでは最近行なった研究成果，現在の研究状況，将来計画をそれぞれの研究機関について調べているが，その報告に現われた使用目的を重複をかえりみず第 1 表に数え上げている。表中，静圧とは静圧気体軸受，動圧とは動圧気体軸受，複合とは起動時に静圧をかけ回転すればこれを断って動圧に切りかえるもの，不明とは動圧あるいは静圧とも指定のないものである。

この表をみると，基礎研究（Fundamentals）としてあるもの，すなわち，用途を明らかにせず，専ら基礎研究を実施しているとみられるものが最も多く，ジャイロスコープ，循環送風機がこれについている。（ただし，圧縮機および循環機の項には原子炉用でないものも含まれている）他の用途では，超遠心機，ターボ膨脹機，高周波電動機，内面研削盤，高速ドリル，歯科用ハンドピース，高速度カメラ，各種試験機（工作機械も含む），シミュレータ，磁気テープなどがみられる。（この表ではみられないが，アメリカ・イギリスに繊維機械関係もあるはずであると聞いている。）

アメリカが最も盛んに研究しているのであるが，イギリスがこれにつぎ，特に動圧型に主力をおいているのが注目され，フランスは原子炉用の研究であるが静圧型に主力を注いでいる。またスコットランド（NEL）はむしろ試験機（動力計など）や工作機械に主力をおいており，カナダ（NRC）はやや立遅れて今後の開発を目指している。

3. 気体軸受の型式

これらの研究において採り上げられている軸受型式としては，通常の動圧型のジャーナル軸受，静圧型の多数給気孔を有するジャーナルおよびスラスト軸受を除くと第 2 表のごとくである。

この表における球面軸受，長方型パッド，多孔質軸受は主として静圧型に属する型式で多面軸受（Tilting pad bearing，Stepped land bearing など），スパイラル溝軸受，フォイル軸受は主として原理上動圧型に属するものである。通常の油潤滑の場合に比し，潤滑上の特殊技術

（第 2 表）
1964 年 気体軸受研究機関数（特殊課題別）

国 名	アメリカ		イギリス		その他		計
	静 圧	動 圧	静 圧	動 圧	静 圧	動 圧	
球 面 軸 受	4	1	0	1	0	0	6
長 方 形 パ ッ ド	0	—	0	—	2	—	2
多 孔 質 軸 受	2	—	0	—	1	—	3*
多 面 軸 受	—	7	—	3	—	1	11
ス パ イ ラ ル 溝 軸 受	—	5	—	2	—	1	8
フ ォ イ ル 軸 受	1	3	0	0	0	0	4
安 定 性	3	7	0	0	1	0	11
弾 性 支 持	0	2	0	2	0	1	5

* ソ連に 1 か所あり

あるいは新考案に多くの研究機関が多量の精力を費やしていることが容易に見受けられる。

軸受型式のほかに，実用化にあたって大きな問題となる安定性と弾性支持に対する関心の深いことも表よりわかるであろう。以下，気体軸受の諸種の型式をあげ，その特長を述べ，応用例をあげて問題点を指適し，この種軸受の最近の進歩を概説することとする。

4. 動 圧 気 体 軸 受

4.1 全固ジャーナル軸受

最も簡単な軸受型式は全周ジャーナル軸受である。これは油潤滑の場合と同様に，第 1 図に示すごとく回転軸

（第 1 図） 動圧ジャーナル軸受の模型図

の中心が軸受中心より e だけ偏心し，軸の回転に伴って気体をその粘性によって末狭まりのすきまに誘いこんで圧力分布を発生させる。ここに Sommerfeld 数を S とすると S は次式で定義される。

$$S = \frac{\mu N}{P' r} \left(\frac{r}{c} \right)^2$$

μ ：粘性係数

N ：軸回転数

P' ：軸受平均圧力 ($W/2rl$)

r : 軸半径

C_r : 半径すきま

W : 軸受荷重

l : 軸受長さ

通常、ジャーナル軸受では偏心率 $\varepsilon = (e/C_r)$ が一定の条件では

$$S = \text{const.} \text{ あるいは } W \propto \mu N l r^3 / C_r^2 \quad \dots\dots (1)$$

また、摩擦係数を f とすると

$$f \left(\frac{r}{C_r} \right) \propto S \text{ あるいは } f \propto \frac{r}{C_r} \frac{\mu N}{P} \quad \dots\dots (2)$$

といえる。

(2) 式より明らかなように f は μ に比例するから、油の 1/1000 order の粘性係数である気体を潤滑剤にすると、摩擦係数をきわめて微小にすることができ、これが気体軸受の最大の特長であるが、その反面 (1) 式よりわかるように負荷容量 W もまた μ に比例するから、 f が小さくなるだけ W もまた小さくなってしまふ。したがって、気体軸受の実用にあたっては、できる限り負荷能力を大きくし流体潤滑状態を実現させることが重要になってくる。一般に (1) 式における μ が小さくなった分を他の項で補うことは不可能に近く、そのため気体軸受の負荷容量は基本的に小さいものであるといわねばならない。しかしながら (1) 式よりもわかるように l と r を大きく C_r を小さく選べば W が極端に小さくなることを避け得る。このことは軸受すきま比 C_r/r を小さくすること、軸半径 r をできるだけ大きくすること、および軸受寸法比 $l/2r$ を大きく選ぶことを意味し、通常の油潤滑軸受の大体の目安が $C_r/r = 1/1000$, $l/2r = 0.5 \sim 1.2$ であるのに対し、動圧気体軸受では $C_r/r < 1/2000$, $l/2r > 2$ が標準となってくる。また軸受直径も油潤滑の設計では考えられないほど、なみはずれた大きなものになるのが普通である。

C_r/r の小さいことは、面の仕上げを入念にし、表面のあらさおよび寸法精度を極度に向上させなければならぬ要求につながり、軸受長さが長いことと相まって、2 軸受間の心合わせに細心の注意を払う必要を生ずる。

第 2, 3 図はイギリスで開発された原子炉用の炭酸ガス循環機と熔融ビスマス循環ポンプで、いずれも 2 個の全周ジャーナル軸受を用いている。駆動は高周波電動機によるもので、回転遠心荷重以外には大きな荷重はかからないようになっており、軸受径は比較的大きくかつ軸受長さも $l/2r$ で 2 を越えている。第 2 図の軸受 4 はダイアフラム 5 で装着され心合わせを容易にすると同時に

(第 2 図) 原子炉用 CO_2 循環機 (U.K.A.E.A.)

(第 3 図) 原子炉用熔融ビスマス循環ポンプ (U.K.A.E.A.)

弾性支持を与えている。6 はスラスト軸受である。第 3 図は縦型である以外第 2 図の場合と大差がない。

このダイアフラムによる弾性支持は高速回転において起る Whirl の防止にも役立つものである。このようなダイアフラムによる軸受装着法のほかに第 4 図のような球面支持

(第 4 図) 高周波モータ (球面支持)

の装着による運転時の心合わせの調整も考えられているが、球面の摩擦を考えれば円滑な調心作用は期待できないと考えられ、ダイアフラムの装着法の方がすぐれている。

上述の Whirl 防止は高速気体軸受の実用化の成否を握る鍵ということがいえ、全周軸受では軸受装着法でこれに解決を与えているのであるが、軸受型式を換えることによって良好な運転性能が期待できる。その代表的なものが多面軸受である。

4.2 多 面 軸 受

軸受面を分割し、それぞれの分割面に潤滑作用を付与させる軸受で、気体軸受では通常段付き軸受 (Stepped-land bearing) あるいはピボット軸受 (Pivoted shoe bearing あるいは Tilting pad bearing) が用いられる。段付き軸受の例は第5図に示すごとくで、ただしこれは軸受が回転するジャーナル軸受の場合である。第6図は Drescher の高周波電動機で 280φ で示すジャーナル軸受部は段付き軸受になっており、かつ右に示すように2つのスラスト軸受部も6個の段付き軸受に分割された多面軸受の設計を採用している。この図よりも軸受径をきわめて大きくとっていることがわかるが、多面軸受では $l/2r$ は大きくとる必要があまりない。それは軸受の分割によって個々の軸受の幅と長さの比が相当大きく

(第5図) 多面ステップ軸受の模型図

(第6図) 多面ステップ軸受を用いた高周波モータ (Drescher による)

(第7図) ティルティングパッド軸受の分解図 (U.K.A.E.A. の原子炉用循環機)

なっているからである。

ピボット軸受の例は第7図に示される。これは英国原子力研究所 (U.K.A.E.A.) がドラゴン計画に基づきフランスの Société Rateau に製作させたヘリウム循環機の主軸および軸受部の分解写真で、ジャーナル軸受およびスラスト軸受ともピボット軸受を使用している。現在までの研究では Whirl 防止にはピボット軸受が最もすぐれているとされているが、構造が複雑で製作がむずかしいのが欠点である。

(第8図) 複合軸受の一例 (U.K.A.E.A.)

英国原子力研究所では第8図のような軸受も考えている。これは全周軸受と段付き軸受の組合わせで、中央の面積の大きい全周ジャーナル軸受で荷重の大半を支持し、端部に近いそれぞれ2列の段付き軸受部で Whirl 防止作用、軸のこじれ防止作用および側面洩れの減少をはかる趣旨のものである。

4.3 スパイラル溝軸受

第9図に示すようなスパイラル状の多数の溝をつけた軸受で、図示のように外周より溝を切るもの内周よりのもの、両方よりのものがある。両方より溝を切るのは中央部で溝同志を連結させる場合もあり、Herring Bone (にしの骨) Grooved Bearing と呼ばれる。これらはスパイラル溝をたどって考えると、回転によって誘い込まれる気体が溝にそって流入し段に突き当って圧力を発生するのであり、段付き軸受と同じ機構を有すると考えてよく、多数の溝が互いに溝に直角方向の流動を制して側面洩れを減少させることから負荷能力にすぐれている。特にスパイラル状の溝とし軸受に積極的にポンプ作用を付与させた点は、潤滑を流体力学の問題として明確に把握したものといえ、画期的な軸受型式である。

(第9図)
スパイラル溝軸受
およびヘリング
ボーン溝軸受上面
図

(第11図) ジャイロ スコープ用スパイラル
溝軸受とカーボン スラスト軸受面

(第12図) ヘリング ボーン溝ジャーナル
軸受の模型図

この種の軸受はイギリスで開発が進み、第2図および第3図のスラスト軸受には第9図の一番上の型式が用いられている。また第10図に示すジャイロ スコープにあってもスラスト軸受に用いられており、そのスラスト軸受面は第11図に示される。

また最近では第12図に示すようなヘリング ボーン溝軸受をジャーナル軸受に用いる考案もなされ、理論および実験的な基礎研究が始められている。

(第10図) ジャイロ スコープ (イギリス)

4.4 フォイル軸受

曲げ変形に対して抵抗のない薄膜によって回転軸を支持する軸受であるが、これは微小すきまを自動調節によって保持することができ、したがって焼付きの心配が少ない利点を有している。現在ではむしろ軸受と呼ばれるより、電子計算機の磁気テープ記憶装置において、テープと磁気ヘッドの間に定常な微小すきまを得るために研究され、実用されている。

4.5 複合軸受

油が存在しないため、起動および停止時の固体接触によって表面に損傷を与えないように注意する必要がある。英国原子力研究所では、平均軸受圧力 2 psi までは動圧気体軸受、6 psi 以上はつぎに述べる静圧気体軸受を用い、2~6 psi の範囲では、起動および停止時には外部より圧縮気体を供給して静圧気体軸受の作用をさせ、回転時には静圧の供給を断つ複合軸受を使用することをすすめている。

5. 静圧気体軸受

5.1 多数給気孔を有する軸受

静圧気体軸受では供給気体圧力を大きくとることによ

って比較的負荷能力を増し得るが、圧縮機を別に備えなければならないのが欠点となる。また、この軸受では自動振動の防止のため油の静圧軸受のような大きなポケットを設けることができない。したがって、ジャーナル軸受、スラスト軸受とも多数の給気孔を配置する設計が多い。第13図はジャーナル軸受の場合で、円周方向に等

(第13図) 多数給気孔静圧ジャーナル軸受 (Laub による)

間隔で給気孔を設け、さらに軸方向に4列配置している。各給気孔には図示のようにオリフィスを設置し、給気孔前にて絞り作用をなさしめる。この絞りは毛細管によって行なう場合もあるが、これは軸の偏心に伴い上下の軸受すきまが変化した際のすきま内圧力を差動的に変化させ、その差圧によって負荷能力を発生させるためである。負荷容量、軸受剛性の点よりオリフィス絞りの方が毛細管絞りよりすぐれている。

第14図は Graneek と Kerr の設計の高周波電動機

(第14図) 高周波モータ (NEL)

で、ジャーナル軸受は3個1列の給気孔を持ち、スラスト軸受は円錐にしているが、60 000 rpm で 1 000 hr の運転後も摩耗が見られなかったとされている。第15図は米軍弾道ミサイルのジャイロ スコープ用空気軸受で、その目的上軸受の製作の精度はきわめて高く、加工工程にも細心の注意が払われている。第16図は研削盤主軸 (NEL)

(第15図) ジャイロ スコープ (NASA)

(第16図) 研削盤主軸 (NEL)

への応用例で、この場合にもラジアル軸受部を極端に大きくとった設計を採用している。これは負荷能力を高めるためであるが、軸直径を大きくとるほかに給気孔数を極端に増すことも考えられる。第17図はその例で、48個×4列(計192個)の給気孔が設けられ、それぞれにオリフィスが設置されているラジアル軸受 (C. I. T., Jet Propulsion Lab.) である。これはさらに左右のスラスト軸受部に12個×2(計24個)のオリフィス付きの給気孔を有しており、給気圧力 40 psi (2.8 kg/cm²) で最大負荷容量 115 lb (52 kg)、軸受剛性度 91 000 lb/in (1 630

(第17図) 多数給気孔軸受 (Laub による)

kg/mm) を得ている。

スラスト軸受としては、上述の例のように円板型、円形つば型を用いることが多い。第18図は、第19図に示すIBMの電子計算機のディスク型磁気記憶装置に用い

(第18図) 磁気記憶ヘッド模型図 (IBM)

(第19図) IBMディスク型磁気記憶装置

られた磁気ヘッドの模型図で、6個の空気孔を有している。これはホルダアームからの突起をヘッド内圧で押し、内的に負荷を発生してヘッドをディスクに押すことによって一定すきまを保持するように考慮されている。この一定すきまは大体 25μ 程度で、最近では数 μ 以下をねらうため、静圧気体軸受型からビボット型動圧軸受の使用に移行しているようである。

スラスト軸受としてつぎによく用いられるのは球面軸受である。第20図の球面軸受は、第21図のスペースシュミレータに用いられるもので、空気の供給は円形溝よりなされる。この種のシュミレータ用球面軸受は宇宙

(第20図) 静圧球面軸受 (Wilcock による)

空間の無重力状態の挙動を地上で再現するため、あらゆる運動方向に摩擦0で支持する目的で使用される。

(第21図) 宇宙シュミレータ (G.E.)

5.2 スリット絞りを有する軸受

第17図の例のように給気孔の数が極端に増してくると、孔の加工とその個々へのオリフィスの設置はきわめて繁雑で製作費が莫大なものになる。孔数を円周にそって無限個にするとこれはスリットを形成するから、これに絞り作用を付加するため、そのスリット幅を小さく選べばスリット絞りの軸受になる。第22図はそのような設計例を示す。宜理、平山の空気タービン式精紡スピンドルの軸受はこのスリットを1本にした場合である。

(第22図) 空気タービン高速軸

5.3 多孔質軸受面を有する軸受

さらに、負荷能力の増大を計るには、列数をも無限に増した極限として多孔質軸受を考え、その背面から気体を供給することが考えられる。そのような軸受の例が第23図である。この場合、多孔質軸受の透過率を軸受すきまとの関連で適当に選べば、絞り作用を軸受全面にもった軸受が得られる。第24図は Scheinberg と Schuster

(第23図) 多孔質軸受模型図

(第24図) 多孔質軸受使用内面研削盤
(Scheinberg と Schuster による)

(ソ連)によって設計された多孔質軸受を用いた内面研削盤である。

5.4 Whirl 防止を考慮した軸受

静圧気体軸受は動圧型と異なり、一般に Whirl を起こしにくい軸受であるが、超高速になるとやはり Whirl が実用の障害となる。したがって Whirl 防止の対策を考慮した軸受が必要になってくる。第25図は Sixsmith のターボ膨脹機で 9/16[in (14.3]mm) のロータ軸径が

(第25図) ターボ膨脹機
(Sixsmith による)

240 000 rpm の高速回転をしている。このラジアル軸受は第26図に示すような断面、第25図右上に示す展開図の構造を持ち、給気孔の中間に圧力だめの空どうとこれを大気につなぐ絞りを有している。この中間におかれた

(第26図) Sixsmith の安定化軸受

圧力だめは、荷重方向と偏心方向の 90° の位相差をなくすのに役立ち、Whirl 発生の原因をなくするので作動安定化に役立つ。この膨脹機は 2 000 hr 運転後も、なんらの支障がなかったと報告されている。最近では横型にした改良型も製作されている。

6. む す び

以上、現在気体軸受の実用化にあたって考えられている各種の軸受型式とその実際設計例をあげ、簡単に問題点を指摘したのであるが、このような実用例からこの種の気体軸受の最近の進歩を推察していただければ幸いである。事実、数年前まではこのような実用例に接することは皆無に近かったわけで、各方面の注目をあび、特殊な用途であるが有効に実用されだしたことが最も大きい気体軸受の進歩であると断言できる。

繊維機械用軸受としては、いまだ 100 % 成功した例に接しないのであるが、国際気体軸受会議 (1959) においても有力な応用目的に数えられており、その後研究されているものもあるように聞いている。具体的な設計に対しては本稿では全く役に立たないものと考えているが、これを機会に気体 (空気) 軸受への関心が高まり、繊維機械への応用の機運がわが国においても促進されるとしたならば、筆者の望外の喜びである。