

氏名(本籍)	十 合 晋 一 (東京都)
学位の種類	工 学 博 士
学位記番号	工 第 1 5 0 号
学位授与年月日	昭和 4 7 年 2 月 2 日
学位授与の要件	学位規則第 5 条第 2 項該当
最終学歴	昭和 3 6 年 3 月 東北大学大学院工学研究科精密工学 専攻修士課程修了
学位論文題目	静圧空気軸受に関する研究

(主査)

論文審査委員	教授 佐藤 健児	教授 酒井 高男
	教授 淵沢 定敏	教授 戸部 俊美

## 論 文 内 容 要 旨

本研究は静圧空気軸受の基本的な性質に関して解析，検討を行なったものである。まず，普通の絞りを持つ静圧空気軸受について，ジャーナル軸受を主に，圧力分布，負荷能力，摩擦ならびに安定性の問題をとりあげた。つづいて，多孔質絞りを持つ静圧空気軸受について解析し，実験を行なった。最後に，静圧空気軸受の実用化としてヘリウム膨張タービンへの応用を試みた。以下に本研究で得られた結果を従来の研究と対比させ，上記各項目ごとに概説する。

### (1) 静圧空気軸受の圧力分布と負荷能力

静圧空気軸受の軸受内圧力分布は負荷能力の決定をはじめとし，空気流量，軸受摩擦，安定限界などを解析するための基礎として重要である。したがって，静圧空気軸受の軸受圧力に関してはすでに多くの研究が発表されている。しかし，これらの研究の多くは軸受すきま内の空気の状態変化を等温変化と仮定している。また，軸受すきまの変化する場合，たとえば，ジャーナル軸受の偏心した場合

についても軸受すきま内の空気の流れを軸方向の一次元粘性流とし、軸受内円周方向流れの影響を考慮していない。そのため、計算した軸受圧力はすきまのせまい側は実際より高く、広い側は実際より低くなり、その結果、負荷能力の計算値は実測値よりもかなり大きな値を示した。これらの研究に対し、本研究ではまず、根本の仮定において軸受すきま内の空気の状態変化を断熱変化とした。これは静圧空気軸受が一般に用いられる条件のもとでは、軸受内の空気の流れの状態が断熱変化に近いと考えられるからである。そして断熱変化の温度降下による空気の比重量および粘性係数の変化を考慮して、オリフィスまたは自成絞りを有する静圧ジャーナル空気軸受について同心状態の軸受圧力を与える理論式を導いた。また、偏心したジャーナル軸受については、軸受内円周方向流れに対し仮想流路を仮定することにより、従来無視されていた円周方向流れを考慮に入れて軸受圧力を与える理論式を導いた。さらに、この軸受圧力をもとに静圧ジャーナル空気軸受の負荷能力を与える式を導いた。また、実験によって軸受圧力ならびに負荷能力を測定し計算値との比較を行ないよい一致を得た。

しかし、一般的な形の静圧空気軸受ではその軸受圧力をすべて数学的に解析して求めることはむづかしく、最も単純な形の軸受以外はほとんどが略算によるほかない。液体潤滑の軸受については電解槽（電気槽）を用いた電氣的な類推法によってその圧力分布を求める実験が行なわれている。しかし、静圧空気軸受にあっては空気の圧縮性によりその圧力分布の方程式をラプラス方程式の形にするためには適当な従属変数の変換を必要とする。本研究では、軸受すきま内の空気が断熱変化の粘性流をなすものとしてこの変換を行ない、抵抗が一樣な導電紙を用いた軸受模型から各種形態の静圧空気軸受について圧力分布と負荷能力とを求めた。導電紙を用いたのは、導電紙が従来の電解槽を用いる方法と異なり、軸受模型の作製が容易なこと、分極による誤差を生じないので直流を使うことができ実験装置が簡単になるなどの利点を持つからである。

また、実際の静圧スラスト空気軸受の負荷能力を測定し、導電紙類推法による値との比較を行なった。実験結果は、軸受すきま内の空気の流れの状態が、従来仮定されていた等温変化よりむしろ断熱変化に近いものであることを示した。

## (2) 静圧空気軸受の摩擦

空気軸受の摩擦は通常の油膜潤滑軸受の摩擦の標準をもって考えればきわめて低いものであって、摩擦による発熱の問題なども通常は考慮する必要がない。しかし、超高速の運転やきわめて高い精度の要求される計器においてはこの軸受摩擦の問題をも考慮する必要がある。

空気軸受の摩擦の問題に関しては、従来、ベトロフの式で与えられる無偏心状態における値、もしくは、J.S.Ausmanによって与えられたその修正式によって十分近似できるものとされ、そのため、理論値と測定値との間にはかなりの差を生じていた。

本研究では粘性抵抗の考え方から静圧空気軸受に働く摩擦モーメントの理論式を導いた。まず、無限長の軸受について静圧効果だけを考えた場合と、動圧効果もあわせて考えた場合とについて導き、

つづいて、有限長の軸受についてそれぞれの場合の理論式を導いた。さらに、軸受に働く摩擦モーメントを測定し、理論値との比較を行なった。この結果、静圧ジャーナル空気軸受に働く摩擦モーメントは偏心率に大きく影響され、動圧効果を考慮して計算しなければならないことを示した。

### (3) 静圧空気軸受の振動

静圧空気軸受は多くの利点を持つにもかかわらず、設計が不適当だと激しい振動を発生するためその実用化はかなりの制限を受けていた。この振動はきわめて複雑なため、その原因がはっきりせず、したがって振動を防止する方法も単純な形のスラスト軸受を除き具体的に明らかにされていなかった。

本研究では、まず、静圧空気軸受の振動の基本的な性質を知るため、ジャーナル軸受を空気タービンによって高速回転させ、ラジアル・クリアランスおよび元圧をいろいろに変化させて、これらのパラメータの軸受振動に及ぼす影響を実験的に調べた。そしてこの振動が軸受の回転数によらず、軸受によって定まる一定の振動数を持つ振動であることを確かめた。

また、軸受振動の原因を軸受がポケットと共鳴し、共鳴器を構成するものおよび軸受剛性をばね強さにおきかえたばね系の振動によるものとした二つの考え方にしたがってその振動数を求め、測定値との比較を行なった。その結果、振動はポケットとの共鳴現象によるものではなく、軸受が単一のばねと質点とを持つ振動系を構成するため、その振動数は軸受剛性と軸の質量とによって定められることが明らかになった。

静圧空気軸受の振動に対する安定限界の理論解析は、まず、最も単純な単一の同心円状ポケットを持つスラスト軸受についてFullerらが、つづいて、偏心したジャーナル軸受についてLichtが導いた。しかし、これらの理論はとくに、ジャーナル軸受の場合、具体的な軸受について解かれたものでなく、単に、考え方の原理的な説明を行なったにすぎなかった。そこで、本研究では静圧ジャーナル空気軸受について、前述の軸受圧力の理論をもとに軸受振動の特性方程式の各係数を導き、軸受の安定限界を求めた。その結果、静圧ジャーナル空気軸受の安定限界はポケット容積が小さく、元圧も低い方が安定で、ラジアル、クリアランスは中間に不安定な部分のあることが明らかになった。また、実際の静圧ジャーナル空気軸受で軸受荷重ならびに元圧を変化させて軸受の安定限界偏心率に及ぼす元圧などの影響を測定し、理論値との比較を行なった。

### (4) 多孔質気体軸受

静圧気体軸受は負荷能力を増すためにポケット容積を大きくすると振動を起こす。また、元圧を高くして負荷能力を増すことにも限界がある。絞りに多孔質材料を用いた気体軸受は安定性と負荷能力とにすぐれるといわれ最近注目をあびるようになった。しかし、従来の多孔質気体軸受は多孔質材料をそのまま軸受面に用いようとしたため精度上の問題があった。そこで本研究では、気体軸受として所要の精度を得るため多孔質材料表面に機械加工を行ない、加工による目づまりの影響を基本的な円板形スラスト軸受で実験的に調べ、軸受材料として使用の可能性を検討した。その結果、機械加工の

最終行程においてラッピングを行えば、目づまりもある程度回復し、良好な軸受性能を持つ多孔質気体軸受の得られることが明らかになった。

静圧多孔質気体軸受の理論的研究は、従来、多孔質素材について浸透率一定の均質な組成を持つものとして圧力分布、負荷能力を与える式が導かれていた。しかし、多孔質材料の表面を機械加工するということがこれまで考えられなかったため、機械加工した多孔質材料を持つ静圧気体軸受についてはまったく理論的な研究は行なわれなかった。そこで本研究では静圧多孔質スラスト気体軸受に関し、機械加工した多孔質材料を表面に多数のノズルを持つ抵抗体と考えてその圧力分布と負荷能力とを与える理論式を導いた。この理論による計算値は測定値ときわめてよい一致を示した。

さらに、スラスト軸受での経験をもとに同様の加工法によってジャーナル軸受を作製し、軸受性能を測定した。その結果、多孔質軸受はふれまわりが生じてもその発達がおさえられ、一般のノズル式気体軸受のような焼付きを生じにくいことがわかった。

#### (5) ヘリウム膨張タービン用高速気体軸受

最近、大容量の実用的なタービン式ヘリウム液化機の要求が高まっている。この液化機の完成には、まず、タービンと動力吸収装置とを持つ軸を支持して高速で安定な運転のできる高速軸受を得ることが必要である。

静圧空気軸受の応用としてヘリウム用タービン膨張機に用いる高速気体軸受の開発と極低温での気体軸受の運転とを行なった。まず、常温窒素潤滑により軸受の回転性能に関する予備実験を行ない、直径40mmのタービンと38mmのスラスト受板とをそれぞれ軸の両端に持つ直径16mmの軸を毎分18万回転まで安定に支持することに成功した。また、軸受圧力および負荷能力の理論をもとに、軸受の共振回転数の計算を行ない測定値との比較を行なった。計算値は測定値ときわめてよい一致を示し、軸受の共振点は静圧効果だけを考えた計算でも十分な精度で予測できることが明らかになった。

従来、タービン膨張機の軸受部は常温かそれに近い温度に保たれ、極低温のタービン部との間に大きな温度差があり、熱の漏れこみなどの問題があった。膨張機の回転軸を低温ヘリウム潤滑の気体軸受で支持すれば、膨張機全体を低温に保つことができ膨張機の効率を高くすることができる。本研究では上述の常温試験の結果をもとに低温ヘリウム潤滑の気体軸受を設計した。低温用軸受の設計にあたっては、材料の熱収縮や潤滑気体の温度による性質変化などを考慮した。その結果、中央に動力吸収用の発電機を組み込んだ直径25mmの膨張機用回転軸を液体窒素温度のヘリウム潤滑により、毎分15万回転まで安定に回転させることに成功した。

## 審査結果の要旨

空気軸受は油を使用する軸受にくらべいくつかの利点を持っているので、原子炉やヘリウム冷却器などにおいて近年次第に実用化の気運にある。本論文は外部より加圧空気を供給するいわゆる静圧空気軸受に関し設計の基礎式を導きその応用につき論じたもので全文8章よりなる。

第1章は緒論であって、空気軸受の重要性と本論文の目的について述べている。

第2章では、静圧空気軸受の軸受圧力と負荷能力につき論じている。まず、静圧ジャーナル空気軸受が同心状態にあるときのポケット圧力を、軸受内の空気の状態変化をポリトロブ変化と仮定して、また空気の比重量および粘性係数の温度による変化を考慮して導いている。さらにそれをもとにして軸受内円周方向流れをも考慮して、偏心状態におけるポケット圧力を与える式を導き、またこのポケット圧力をもとにして負荷能力を与える式を導いている。4個2列の給気口をもつ静圧ジャーナル空気軸受によるポケット圧力ならびに負荷能力の実測によれば、上述の式はかなりよい近似を与えている。

第3章では、静圧空気軸受の圧力分布を導電紙による軸受モデル上の電位分布から求めている。これは従来の電解槽実験にくらべ、実験をかなり容易なものにしている。

第4章では、静圧空気軸受の摩擦モーメントを与える式を、粘性抵抗の考えをもとにして軸受内の円周方向圧力分布をAusmanの考えに従って与えることより導いている。さらに実際に軸受に働らく摩擦モーメントを測定し前述の式と比較しているが、それらは実用上かなりよく一致している。

第5章では、空気軸受の振動について論じている。振動の周波数は質量-バネ系でシミュレートして計算できることを示し、ついで静圧ジャーナル空気軸受の安定判別の式からラジャルクリヤランス、元圧、ポケット容積などの影響を調べている。さらに、実際に安定限界の実験を行ない前述の安定判別式による結果との比較を行なっている。

第6章は、近年静圧空気軸受として実用されるようになってきた多孔質軸受に関するものである。著者は機械加工した多孔質物体を、中心が空洞で軸受面に無数の微小ノズルが均一に分布するモデルでおきかえ、これをもとにして軸受圧力を与える式を導いた。元圧の低いスラスト軸受ではこの式はかなりよい近似を与えている。

第7章では、気体軸受をヘリウム膨張タービン用高速気体軸受として応用した際の問題点とその対策について述べている。

第8章は結論である。

以上要するに本論文は、近年次第に実用化されつつある静圧空気軸受に関する設計基礎式とその応用について述べたもので、精密工学、精密工業に寄与するところ少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。