

報告番号 * 乙第 2651号

主論文の要旨

題名 薄膜潤滑された動圧気体
スライダ軸受の研究

氏名 三 矢 保 永

主論文の要旨

報告番号 ※ 乙 第 号 氏 名 三 矢 保 永

動圧形スライダ気体軸受は末狭りのすきまを形成した静止面と走行面との間に、すべり運動により発生する気体の圧力（動圧）を利用して負荷容量を得るもので、外部の高圧力源を必要としないため、半永久的な動作が可能であり、無保守・長寿命が必要な航空宇宙機器のジャイロ用スピンドル、磁気ドラム装置・磁気ディスク装置の浮動ヘッドスライダなどに実用されている。動圧軸受は、起動・停止時には負荷容量がなくなり、接触走行する。したがって、起動・停止が繰り返される場合には信頼性という観点から、動作時のすきまに比して極めて微小なすきまにおける潤滑特性が問題視される。また、浮動ヘッドスライダは、微小すきまとすることによってしか十分な負荷容量が得られない動圧気体軸受の特徴を有効に利用したもので、記録密度を高めるためには、ヘッドと媒体とのすきまをできるだけ小さくすることが必要であり、動作時のすきまはサブミクロンに達している。このような薄膜気体潤滑が、一般の潤滑問題と異にする問題点としては、以下のものがある。

- (i) すきまが気体の分子平均自由行程と同程度まで微小になると、気体の粒子性に起因する不連続流体としての特性が現れる。
- (ii) 軸受表面は滑らかではなく、面粗さがある。微小すきまにおいては、相対的に粗さの影響が増大する。
- (iii) 薄膜で気体潤滑される場合には、圧縮性潤滑膜の特性を支配するレイノルズ方程式の非線形性が強くなるため、数値計算において逐次近似の収束性が劣化する。

本論文では、第2章において汎用性と逐次近似の収束性とに優れた有限要素法による数値計算法を、第3章～第7章において薄膜気体潤滑に特徴的なスリップ流れ、レイノルズ粗さ、ストークス粗さについての基礎的な研究結果を示し、第

主論文の要旨

報告番号	※乙第	号	氏名	三矢保永
------	-----	---	----	------

8章～第10章において、薄膜気体潤滑を応用した浮動ヘッドスライダ、浮動ヘッド位置決め機構などの応用研究と、これらの技術を用いた小形大容量磁気ディスク装置の開発結果を示している。

第2章では、分子平均自由行程の影響を考慮した修正レイノルズ方程式に対応する変分式を導入して、有限要素法の適用方法を示すとともに、離散値化した後に得られる連立非線形代数方程式をニュートン・ラフソン逐次近似法で解く計算手順を示した。また、代表的な3種類のすきま形状のスライダに適用した計算例、逐次近似の収束性、収束解の不安定現象についても言及した。本手法には、すきまを微分した項が含まれないため、すきまの連続・不連続に関係なく統一的な汎用プログラミングが可能であり、また、ニュートン・ラフソン法は収束性が高く、かつ非線形性が強くなる圧縮性定数 A が大きい場合にも2～5回の反復計算で解が得られるので有用性が高い。

第3章では、第2章で示した計算手順をスライダ軸受に適用し、広範囲の圧縮性定数 $A = 1 \sim 10^4$ について分子平均自由行程 λ の影響を明らかにした。 λ の影響は、すきま形状と A 値に依存するが、無次元負荷容量 W が同一の条件下で比較すれば、クヌッセン数 M の大きさによってほぼ一義的に定量化できることから、 W が λ の影響の大きさを見積る上で好都合なパラメータとなることを示した。また、荷重や速度とすきまの関係などの静特性に及ぼす影響を明らかにした。さらに、無次元負荷容量 W が0.1～0.4の軽荷重を用い、サブミクロンのすきま領域で、 λ に起因する負荷容量の減少率が30～70%の範囲で実験を行った。負荷容量の減少率が60%程度までは、実験値と修正レイノルズ方程式による計算値とはよい一致を示すことから、この領域までは修正レイノルズ方程式が妥当であることを実証した。

主論文の要旨

報告番号	※ 乙第	号	氏名	三 矢 保 永
------	------	---	----	---------

第4章では、まず、一次元粗さに関する平均すきま理論の適用法を示した。ついで、一次元あるいは二次元の矩形波状粗さをもつスライダ軸受を対象として、数値計算シミュレーションにより、平行粗さ、直交粗さおよび二次元粗さの特性、粗さの波長を有限とした場合に現れる粗さの凹凸内の局所圧縮性の効果を明らかにし、平均すきま理論と比較して、その適用限界を示した。また、非圧縮性レイノルズ方程式が静電場方程式と同様のポアソン方程式であり、すきまが導電率に対応する関係があることを利用して、すきまを電流コンダクタンス網に置き換えて、平行粗さは並列コンダクタンス、直交粗さは直列コンダクタンスに対応させることにより、平均すきまを求める方法を示した。これを二次元粗さに拡張して、二次元粗さに関して、算術平均と調和平均とを混合する形の新しい平均化の方法を提案した。さらに、規則的に分布した平行あるいは直交粗さをもつスライダを用いた実験と平均すきまによる計算結果とを比較し、一次元平均すきま理論の妥当性を実証した。

第5章では、規則的に分布した粗さをもつ平行2面間の流路コンダクタンスの特性を用いた結果として、1波長分の粗さで構成される単位粗さの概念を導入し、対称な単位粗さを選べば、単位粗さの集合としてのマクロな面粗さが、ミクロな単位粗さの流路コンダクタンスの特性に支配されることを示した。また、二次元粗さがある場合の流路コンダクタンスは、圧力流れと剪断流れのいずれの場合にも、算術平均すきまから求めたそれよりも小さく、調和平均すきまから求めたそれよりも大きいことを明らかにした。これらの結果より、二次元粗さをもつ面と等価な平滑面が算術平均と調和平均とを混合した形の混合平均すきまで与えられること、混合比は対称な単位粗さモデルから求められることを明らかにし、混合平均すきまで与えられるレイノルズ方程式を導入した。等方性、異方性の二次元

主論文の要旨

報告番号	※乙第	号	氏名	三	矢	保	永
------	-----	---	----	---	---	---	---

粗さについて、混合平均すきまによる計算結果と厳密解とを比較し、両者がよい一致を示すことから、混合平均すきまの妥当性を確認した。本手法は単位粗さの流路コンダクタンスを用いて容易に計算できるため、実用的にも有用である。

第6章では、スライダ側にストークス粗さのある非圧縮性および圧縮性潤滑膜について、圧力、速度に加えて、これらの二つの境界条件を関連付ける定数として、流量をも被摂動量とするナビエ・ストークス方程式の解法を示した。また、圧縮性潤滑膜の場合に流れの連続式に部分積分法を適用して、ストークス粗さの効果として現れる二次の圧力を陽に求める方法を提案し、この方法が圧縮性の評価に有用であることを確認した。この方法により、スライダ軸受の流量、負荷容量、摩擦力に及ぼすストークス粗さの影響を明らかにするとともに、速度分布、圧力分布を用いて物理的な解釈を加えた。ストークス粗さの影響は粗さの波長の2乗に反比例し、非圧縮性潤滑膜では負荷容量を増大させるが、圧縮性の効果が大きい場合には、逆に負荷容量を減少させること、また、ストークス粗さはその振幅のほぼ2乗に比例して負荷容量を増加させ、振幅が大きいと、この割合は加速されるため、振幅を微小量とする従来解析法は、ストークス粗さの影響を過小に見積る結果になることなどを明らかにした。

第7章では、面粗さがある場合にも、分子平均自由行程に起因する速度スリップが壁面に沿って生ずるとして、ストークス粗さに関するスリップ流れの速度境界条件を導入し、第6章で示した摂動解を適用して、スリップ流れの領域におけるストークス粗さの影響を明らかにした。スリップ流れに起因する負荷容量の減少量は、非圧縮性潤滑膜では平滑面、レイノルズ粗さ、ストークス粗さの順に大きくなる。一方、圧縮性の効果が大きい場合には、ストークス粗さではクヌッセン数 M の増加とともに負荷容量は一旦増加し、その後減少し始めるため、負荷

主論文の要旨

報告番号	※ 乙第	号	氏名	三 矢 保 永
<p>容量の減少量は最も小さく、ついで平滑面、レイノルズ粗さの順に大きくなる。また自己相関長さを指定して計算機で合成したランダム面粗さの場合に適用して、ランダム面粗さは平均的には2乗平均振幅と2乗平均山数から定まる正弦波状面粗さと等価な特性を示すことを明らかにした。</p> <p>第8章では、スライダ気体軸受の特長を効果的に利用して実用されている磁気ディスク用浮動ヘッドスライダの浮上すきまの微小化技術を示した。ヘッドが媒体に接触した状態で起動停止を行う低押圧力のテーパフラットスライダおよびテーパクラウンスライダを対象として、空気膜の静特性・動特性を明らかにし、微小すきまスライダの設計指針を示した。この結果をもとに、浮上すきまを$0.2\mu\text{m}$とするテーパフラット形およびテーパクラウン形の二つの浮動ヘッドを試作した。前者では停止中にはヘッドを引き離しておくランディングオンオフ動作を行わせ、後者では浮上面を円筒面状として停止中の接触面積を減らすとともに吸着力の小さい媒体表面潤滑法を採用して、媒体の面精度の向上に伴うヘッドと媒体との吸着の問題を解決した。また$0.15\mu\text{m}$以上の突起を完全に除去可能な媒体の平滑化技術を示した。</p> <p>第9章では、浮動ヘッドを所定のトラックに位置決めするためのヘッドポジションナの高速度・高精度化技術を示した。まず、定電流駆動方式と定電圧駆動方式とを対比して、目標とする速度を実現するためのボイスコイルモータの設計手順を示した。ポジションナには直進形とシング形の二つの形式があり、振動特性上は前者が、小形化の点では後者が有利である。そこでそれぞれについてモータの小形化、可動部の軽量・高剛性化、振動特性の向上を目的に試作を行った。直進形については、14インチ形ディスク装置を対象に、センタポール形磁気回路を用い、可動部の一体化と対称化により軽量・高剛性構造を実現した。シング形に</p>				

主論文の要旨

報告番号

※乙第

号

氏名

三 矢 保 永

については、8インチ形ディスク装置を対象に、対向ボール形磁気回路を用い、有限要素法とモーダル解析による動的設計を行い、小形・高剛性構造を実現した。

第10章では、小形・高信頼で400メガバイト容量のヘッドディスクアセンブリとこれを8台で構成した集合形磁気ディスク装置の開発結果を示した。本装置では8章で示した浮上すきま $0.22 \sim 0.27 \mu\text{m}$ の浮動ヘッドと媒体、9章で示した平均アクセス時間 18ms 、位置決め精度 $0.2 \mu\text{m}$ 以下の小形簡易なスィング形位置決め機構を用いた。構造設計としては、ディスク回転機構、ヘッド位置決め機構、空気清浄機構などをコンパクトに一体化し、防塵防湿のために磁性流体シール、吸湿機構などを用いた新しい密閉構造を構成した。これにより $0.22 \mu\text{m}$ における安全なヘッド浮上を可能とし、 $550 \text{ビット}/\text{mm}$ の高い線記録密度を実現した。また、振動と熱膨張差・熱変形の抑圧により、総合的な位置決め誤差を $2 \mu\text{m}$ 以下に抑え、 $43 \text{トラック}/\text{mm}$ の高いトラック密度を実現した。