圧電素子の高周波振動を利用したアクティブスクイズ空気軸受の開発（第1報）*

—プロトタイプモデルによる基礎的研究—

磯部 浩 已** 久曾 神 煌** 小 島 茂***

Development of Active Squeeze Air Bearing Using Oscillation of Piezoelectric Actuators (1st Report)
—Basic Study with Prototype Model—

Hiromi ISOBE, Akira KYUSOJIN and Shigeru KOJIMA

Hydrostatic air bearings allow a floating shaft to rotate accurately with compressed air. They are utilized in many fields because of their load carrying capacity, although the shaft does not rotate. However, the installation of additional equipment such as air compressor, regulator and pipelines etc. is required to supply pressured air into the bearing. In this research, piezoelectric actuators oscillate a number of pads surrounding the shaft. In consequence, squeeze air films with load carrying capability are developed. A piezo displacement pattern consists of two functional waveforms. The AC component stimulates the squeeze motion and the other DC component shifts the mean position of oscillating pad. Therefore, application of a controllable piezo-driving pattern allows the shaft to be manipulated. In this paper, the air film characteristics are investigated experimentally for a prototype model with two circular plates of 15mm in radius as oscillating pads. The squeeze air film was able to support the object against the external load of 4.9N with a mean film thickness of 5.5 μ m. It had the capability to support an external load up to 9.8N with a stiffness of 1.8N/ μ m. By constructing a simple feedback system, the object was manipulated accurately without contact.

Key words: squeeze air bearing, squeeze air film, compressive flow, piezoelectric actuator

1. 結 言

スクイズ空気軸受は、軸受面に圧縮空気を供給する必要がなく、軸が回転していなくても負荷容量を発生させることができる動圧空気軸受の一種である。これまでに圧縮性スクイズ効果の理論解析および空気軸受への応用例が報告されている。これらは軸受面を高周波振動させることにより浮上物体—軸受面間に周囲よりも圧力の高いスクイズ空気膜を発生させ、物体を非接触で保持しようとするものである。黒田ら¹⁾は、鉛直方向にのみ自由に運動できる円形浮上物体を水平に置かれた軸受面上に載せ、軸受面を鉛直方向に振動させた場合の物体の運動を解析し、実験により解析結果の有効性を確認した。吉本ら²⁻⁴⁾は、より実用的な応用例として、スクイズ空気軸受のリニアガイドへの適用を提案している。ここでは浮上するスライダ側に加振源（圧電素子）とカウンタウェイトが内蔵されているため、案内面全体を振動させる必要がなく、実用的な構造である。スライダとカウンタウェイト間の質量差を利用することで、スライダ面を固定案内面に対して相対的に振動させている。

本研究の目的は、圧電素子の高周波振動で発生するスクイズ空気膜を介して、物体の非接触位置決めを行うことである。従って、圧電素子は励振源であると

同時に、浮上している物体の位置決めを行うためのアクチュエータとしての機能を持つ。また、運動している物体の運動誤差を検出し、これを動的に補正することができるアクティブスクイズ空気軸受の開発を行う。この結果、例えば閉鎖空間内や配管設備を設置できないような状況下において、高精度な空気軸受を実現することができる。本報においては、ラジアル型スクイズ軸受の実現の第一段階として、非常に柔らかい板ばねで支持された浮上物体を持つプロトタイプモデルを製作し、空気膜を介した非接触位置決めが実現可能であることを実験的に確認する。

2. 基 本 原 理

図1にアクティブスクイズ空気軸受の概念図を示す。回転軸の周囲に配置された振動パッドが圧電素子により高周波で振動させられると、軸—軸受間に周囲よりも圧力の高いスクイズ空気膜が発生する。この結果、外部から圧縮空気を供給する必要がなく、回転軸は浮上する。さらに点線で囲まれた部分を簡略化して、回転軸を直方体で置き換えたモデル（図2）を用いて、アクティブスクイズ軸受の動作原理を説明する。

2.1 実験モデル

図2(a)は空気膜が発生していない状態である。2枚の振動パッドが浮上体から初期すきま c_0 だけ離れ、浮上体に対して平行に配置される。浮上体は左右方向の変位に対してばね定数 k_t を持つ平行板ばねにより支えられているので、浮上体が移動しても振動パッドに対

* 原稿受付 平成10年7月23日

** 正 会 員 長岡技術科学大学工学部(長岡市上富岡町1603-1)

*** 日機装(株)(東村山市野口町2-16-2)

Fig.1 Concept of active squeeze air bearing

して平行なすきまが保たれる。この後、初期負荷荷重 $F=m_0g$ が浮上体に加えられる。この結果、空気膜が発生していない場合、浮上体は図中左側の振動パッドに接触することになる。図2(b)はスクイーズ空気膜の発生に伴い、負荷荷重に逆らって物体が浮上している状態である。この時、空気膜厚さを h 、振動パッドの振動中心から見た物体の位置を z とする。なお、添字1が負荷荷重を受けている側の空気膜を意味する。

2.2 スクイーズ運動

圧電素子によって正弦波状に振動している振動パッドと物体の間にスクイーズ空気膜が発生し、物体が浮上する。振動パッドのスクイーズ運動により引き起こされる浮上物体の微振動は、これを位置決め装置として利用した場合に大きな問題となることが予想される。スクイーズ運動と呼ばれる振動パッドの変位 δ_1 , δ_2 は右方向への変位を正とすると、下式で示される。

$$\begin{cases} \delta_1 = a_0 \sin(2\pi ft) \\ \delta_2 = a_0 \sin(2\pi ft + \pi) \end{cases} \quad (1)$$

このように、振動パターンの位相は π だけずらされている。この結果、それぞれの空気膜内部の発生圧力 p_1 , p_2 の時間変動はほぼ同相となり、浮上物体は負荷荷重 mg とスクイーズ空気膜の負荷容量とが釣り合った位置でほぼ静止する。

2.3 位置決め動作

振動パッドのスクイーズ運動を維持したまま、その振動位置を Δ だけ移動させる（図2(c)）。

$$\begin{cases} \delta_1 = a_0 \sin(2\pi ft) + \Delta \\ \delta_2 = a_0 \sin(2\pi ft + \pi) + \Delta \end{cases} \quad (2)$$

この結果、浮上物体は振動パッドに追従して Δ だけ移動するので、浮上物体を非接触で位置決めすることが可能になる。本実験においては、1つの圧電素子がスクイーズ運動を引き起こすと同時に、位置決めのためのアクチュエータとしても作用するので、装置の構造が簡単になる。圧電素子の駆動パターンはスクイーズ運動のための正弦波状交流電圧と位置決めのための直流電圧が重ね合わされたものになる。

この方法を図1の回転軸系に適用すると、回転軸を非接触で多自由度位置決めすることが可能になると思

(a) Initial setting

(b) Operating condition

(c) Shifted position

Fig.2 Principle for positioning operation without contact

われる。さらに回転運動誤差を測定するシステムを構築し、提案したスクイーズ空気軸受と組み合わせる。検出された運動誤差を取り除く方向に回転軸を移動させ、これを動的に補正することで、回転軸の高剛性化・高精度化が実現される。本報では、このような軸受を実現させるための第一歩として、プロトタイプモデルに基づいた実験装置を製作し、スクイーズ空気膜の特性を測定する。

3. 実験装置

図2中の実験パラメータを表1にまとめ、実験装置の概略図を図3に示す。スクイーズ空気膜を介して、安定に浮上させることのできる物体の質量を実験的に求めるため、空気膜に浮上体の自重が加わらない横置き構造とした。その結果、スクイーズ空気膜に対して任意の負荷荷重を印加することができる。

振動パッドは半径 $r_0=15\text{mm}$ 、平面度 $\lambda/4$ のガラス板であり、弾性ヒンジを利用した平行リンク機構に取り付けられている（図3(b)）。また、圧電素子の先端は球状で、リンク機構の案内精度を阻害しない構造となっている。この結果、振動パッドは圧電素子の伸縮に伴って、矢印方向に振動する。この方向の変位に対するリンク機構の理論的ばねこわさ⁷⁾は、 $k_{eth}=22.8\text{N}/\mu\text{m}$ 、振動パッドおよびリンク出力端（斜線部分）の質量 $m_e=0.2\text{kg}$ より、励振装置の固有振動数は $f_{enth}=1.8\text{kHz}$ となる。

Fig.3 Horizontal squeeze air bearing

浮上体は発生するスクイーズ空気膜と比較して充分に柔軟な板ばねで支えられている。4枚の板ばね(35^(L)×18^(W)×0.5^(t))で平行板ばね機構を構成することで、安価で摩擦のない案内機構を実現できる。その両端には振動パッドと同一の形状を持つ円板が取り付けられている。振動パッド-浮上体間の相対的な角度(2円板間の平行度)は、浮上体に取り付けられた角度微調整機構により、±10μrad 以内になるように調整される。従って、浮上体は振動パッドに対して平行状態を保ったまま、圧電素子の変位方向にのみ滑らかに移動できる。この方向の変位に対する平行板ばね機構の理論的ばね定数は $k_l=23.5\text{N/mm}$ であり、浮上体の質量から求められる固有振動数は $\omega_l=18.3\text{Hz}$ となる。これは、自由振動測定により実験的に求められた固有振動数と一致した。また、浮上体が実験において移動する可能性のある範囲内(中立位置から±20μm 程度)において、ばね特性は線形であることも確認している。

振動パッド-浮上体間の初期すきまは、圧電素子を取り付けられたステージを微細ねじを用いて位置決めることで、 $c_0=20\mu\text{m}$ となるように調整される。この後、ピアノ線を介して $F=4.9\text{N}$ ($m_0=0.5\text{kg}$) の初期負荷荷重が浮上体に加えられる。ここではデットウェイトにより負荷荷重を掛けるために、滑車を使って荷重方向を90°だけ曲げている。

空気膜の厚さと形状は振動パッドに埋め込まれた3個の渦電流式変位計(電子応用社製、分解能0.1μm、カットオフ周波数80kHz)により測定、算出される。また、物体上部に取り付けられたブロックゲージを測定対象面として、物体の浮上量を測定する。さらに振動パッドの変位も同時に測定する。これより、高周波駆動時における振動パッドの振幅および圧電素子の熱変形によるゼロ点のドリフトを補正した。

ファンクションジェネレータで作られた正弦波電圧は圧電素子駆動用リニアアンプ(エコー電子製、出力インピーダンス10Ω、定格出力電流1A_{max})により増幅され、圧電素子(秩父小野田製、変位量36μm/140V、静電容量4.4μF)を駆動する。制御信号および測定結果はパーソナルコンピュータにより処理される。こ

Table 1 Mechanical parameters of constructed apparatus

Floating object		
Spring constant of leaf spring linkage	k_l	23.5 N/mm
Mass of floatable object	M	1.8 kg
Initial external load	F	4.9 N
Initial clearance	c_0	20 μm
Exciter		
Radius of oscillating pad	r_o	15 mm
Frequency of piezo oscillation	f	600~1000 Hz
Piezo amplitude	a_0	2.0, 3.0, 4.0 μm
Spring constant of flexure hinge guide	k_{eth}	22.8 N/μm
Natural frequency in X-direction	f_{enth}	1.7 kHz

Fig.4 Alternate change of floating height and film thickness

では圧電素子のヒステリシスの影響は無視して、印加される正弦波状駆動電圧に対して、ひずみのない変位が得られるものと仮定する。

4. 実験結果および考察

4.1 浮上実験

図4に浮上体の浮上量 z_1 と空気膜の形状 h_1 , α , γ の時間変動を示す。ここで h_1 は振動パッド中心部における空気膜の厚さであり, α , γ は装置側面および上面から見た空気膜の勾配（ピッチ, ヨー）を示す。空気膜が発生していない場合, 浮上体は外部負荷荷重 $F_0=4.9\text{N}$ により, 一方の振動パッドに押しつけられている。その後, 振動パッドを振動させ, すきま内にスクイーズ空気膜を発生させることで, 浮上体を外部負荷に逆らって浮上させることができた。ここでは平均浮上量 $z_{ave}=5.5\mu\text{m}$ と浮上体の微振動 $z_{amp}=0.2\mu\text{m}$ が確認できた。空気膜の厚さはスクイーズ運動に伴って正弦波状に変化し, 空気膜の形状も同じ周期で変化している。特に装置上面から見た角度 γ の変動が振幅 $25\mu\text{rad}$ と大きく, 半径 15mm の振動パッド端部において $0.4\mu\text{m}$ 程度の変位変動に相当する。これは振動パッドのスクイーズ運動の振幅 $a_0=3.0\mu\text{m}$ と比較すると, 無視できない大きさであり, 両端面が平行な円盤状のスクイーズ膜が発生していないことがわかった。この原因を明らかにするため, 浮上体を取り外して, 励振時の振動パッド単体の挙動を測定したところ, 振動パッド自身がコニカル運動していることがわかった。今後は弾性案内の加工誤差, 可動部分の慣性のアンバランスを改良する必要がある。

くさび形のスクイーズ空気膜においては, 振動パッドの半径方向にポンピング作用が発生することが報告⁵⁾⁶⁾されており, 形状変動は空気軸受の負荷容量, 剛性を低下させ, 軸受の特性に大きく影響を与えることが予測される。

4.2 駆動周波数-浮上量の関係

駆動周波数 $f=600\sim 1000\text{Hz}$ における振動パッドの振動振幅 a_0 と浮上体の浮上量 z_{ave} および微振動の振幅 z_{amp} との関係を図5に示す。平均浮上量は振動パッドの振幅 a_0 に対して, 単調増加している。このような傾向は, 浮上物体の片面に発生するスクイーズ空気膜を取り扱った文献^{1)~4)}においても報告されている。浮上体の微振動は, 駆動振幅にかかわらずほぼ一定であり, 空気膜は物体を安定に浮上させる能力を持つことがわかった。測定された駆動周波数の範囲では, 浮上量, 微振動ともに明確な違いは見られなかった。電源回路の容量不足のため, これ以上の駆動周波数に対する実験を行うことはできなかった。

4.3 空気膜の負荷特性

駆動周波数 800Hz , 振動パッドの振幅 $3.0\mu\text{m}$ における空気膜のばね剛性を測定した。初期負荷荷重 $F=4.9\text{N}$ を支えているスクイーズ空気膜に対して $\Delta F=0.0\sim 4.9\text{N}$ の負荷荷重を追加した。全荷重 $F+\Delta F$ と物体平均浮上量 z_{ave} との関係を図6に示す。ここでは5回の測定結果がプロットされている。曲線の傾きの逆数がばね剛性に相当するので, 空気膜の減少にともなって剛性が増加する特性が確認された。これより, 空気軸受の高剛性化には初期軸受すきまを小さくすることもあることがわかる。測定範囲内において, この曲線を

Fig.5 Experimental floating height

Fig.6 Air film stiffness

最小二乗法で線形近似すると, 空気膜の剛性は $1.8\text{N}/\mu\text{m}$ となり, 本実験装置は静圧空気軸受の中でも, 特に低い値に相当する剛性を持つことが確認された。

4.4 浮上体の位置制御

図7に浮上体の位置制御を行うための制御信号の流れ図を示す。測定された浮上体の位置は, パーソナルコンピュータに取り込まれ, 目標値と比較演算される。ここで一方の圧電素子に対する操作量が増加した場合には, 他方は同じ大きさだけ減少するように比例積分制御器が構築されている。従って, 2枚の振動パッドの相対的な間隔は一定に保たれる。この操作量はサンプアンプによってファンクションジェネレータから発生した交流信号と重ね合わされ, 圧電素子駆動用リニアアンプにより増幅されて圧電素子に印加される。この結果, スクイーズ空気膜で支持されている物体を, 非接触で位置決めすることが可能になる。積層型圧電素子は, 電気的に見て非常に大きなキャパシタンスとみなせる。従って, 急激な制御信号の変化に対して, 圧電素子駆動電源には過渡的に定格以上の電流が流れる。ここでは, 制御器の比例積分ゲインは安定性を重視しながら, 試行錯誤的に決定された。浮上体の位置は静電容量型変位計（分解能 30nm , 公称カットオフ周波数 1kHz ）で測定され, サンプリング周波数は 2kHz である。ステップ幅 $1.0\mu\text{m}$ と $0.5\mu\text{m}$ のステップ入力に対する浮上体の応答を図8に示し, 変位の立ち上がり部分の拡大図も併記した。立ち上がり時間は 10ms 以内であり, 定常偏差は測定器の分解能の範囲内に収まっている。この結果, 提案した制御方法をスクイーズ空気

Fig.7 Signal flow diagram for positioning through squeeze air films

軸受に適用することで、浮上物体を非接触で位置決め可能なことが分かった。ところで、実験結果には4.1節で述べられた浮上体の微振動が見られない。これは、変位計の周波数特性が、実際には公称値を大きく下回っていた（約600Hz程度）ことが原因である。

5. 結 論

圧電素子により振動パッドを励振させることによって発生するスクイズ空気膜を利用して、回転軸を非接触で支持すると同時に、その駆動電圧を調整することで回転軸の位置・姿勢を制御できるアクティブスクイズ空気軸受を提案した。本論文においては、回転軸を支持する前段階として、1自由度にのみ滑らかに変位する物体の両側に振動パッドを配置したプロトタイプモデルを試作して実験を行い、以下の結論を得た。

- (1) 半径15mmの振動パッドを駆動周波数800Hz、振幅 $3\mu\text{m}$ で励振した場合、外部からの負荷荷重4.9Nを受けている物体が、発生したスクイズ空気膜によって $5.5\mu\text{m}$ 浮上した。スクイズ運動にともなう物体の微振動は $0.2\mu\text{m}$ であった。
- (2) 空気膜は9.8Nの荷重を受ける物体を非接触で支持できた。空気膜厚さの減少に伴ってばねが硬くなる非線形ばね特性が確認され、測定範囲内の平均的な剛性は $1.8\text{N}/\mu\text{m}$ であった。
- (3) 圧電素子を振動させている正弦波状の印加電圧パターン上に、任意のオフセット電圧を重ねることで、浮上している物体を非接触で移動できることを確認した。
- (4) 浮上体の位置を測定して、簡単なフィードバック系を構築した結果、浮上体を立ち上がり時間10msで位置決めできた。

以上の結果、回転軸を非接触で支持するスクイズ

Fig.8 Positioning results

空気軸受実現の可能性が見いだされた。今後の課題として、より高い駆動周波数に対する実験を可能にするために、静電容量の小さい圧電素子への変更、駆動用電源の改良を行い、さらに回転軸を支持するラジアルスクイズ軸受へと発展させる。

最後に、圧電素子および駆動用増幅器を貸与いただいた秩父小野田（株）に謝意を表します。また、本研究の一部は文部省科学研究費奨励研究（A）No.09750163 および高度自動化技術振興財団のご援助によることを付記し、謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 黒田成昭, 平田教行: 浮上物体の運動を考慮したスクイズ空気膜に関する基礎研究, 日本機械学会論文集(B), **50**, 459 (1984) 2727.
- 2) 吉本成香, 阿武芳朗: 圧電素子を用いた動圧形スクイズ空気案内面, トライボロジスト, **36**, 7 (1991) 543.
- 3) 吉本成香, 阿武芳朗: 圧電素子を用いた動圧形スクイズ空気案内面—リニアガイドへの応用—, 精密工学会誌, **58**, 3 (1992) 527.
- 4) 吉本成香, 阿武芳朗, 佐藤祐一, 浜中憲二: 弾性ヒンジを用いた動圧形スクイズ空気軸受, 日本機械学会論文集(C), **60**, 574 (1994) 2109.
- 5) H.Takada, S.Kamigaichi and H.Miura: Characteristics of Squeeze Air Film between Nonparallel Plates, J. of Lubric. Technol., **105** (1983) 147.
- 6) H.Takada, S.Kamigaichi and H.Miura: Sealing Effects of Squeeze Air Film, J. of Tribol., **108** (1986) 594.
- 7) 吉村靖夫, 天田勝正, 赤坂 隆: 微動位置ぎめ用一体形平行ばね機構のピッチ, 日本機械学会論文集(C), **55**, 515 (1989) 1741.