

浮上量差による推進機構を付加したスクイーズ効果支持リニアスライダ

田丸 雄摩^{*1}, 清水 浩貴^{*1}

Linear slider supported by squeezed air films with self-propulsion mechanism based on floating height difference

Yuuma TAMARU^{*1} and Hiroki SHIMIZU^{*1}

^{*1} Dept. of Mechanical and Control Engineering, Kyushu Institute of Technology
1-1 Sensui-Cho, Tobata-ku, Kitakyushu, Fukuoka, 804-8550 Japan

Received** June 2017

Abstract

Non-contact supports involving air or magnetic forces are used as guide supports for linear motion mechanisms. In the present study, non-contact supports are generated using the effect of the static pressure force produced by a squeezed air film. The linear slider is supported at just two of its ends. Applying a different excitation amplitude to the two transducers leads to a difference in the floating height at either end of the slider due to the different air-film thicknesses. This causes the slider to tilt, which produces a propulsion force due to the dead load. An experimental apparatus with a flat plate slider was developed and its floating characteristics were examined. In addition, the propulsion force was measured for sliders with different weights. The results indicated that the floating height was 2 to 3 times the excitation amplitude. The slider was capable of travelling all over the movement stroke. The traveling force increased with increasing slider weight, and was about 0.15-0.35 mN. The measurement results were in good agreement with theoretical calculations. Thus, the present study showed that the slider could be successfully supported in a non-contact state and was capable of movement under the influence of a propulsion force generated only by the dead load.

Keywords : Squeezed air film, Linear slider, Non-contact support, Self-propulsion mechanism, Floating height difference, Machine element, Piezo-element

1. 結 言

直動機構の案内支持において転がりやすべりと並んで空気や磁気を用いた非接触による手法が利用されている(大岩, 勝木, 2015). 非接触支持は摩擦係数の問題を排除できるためスティックスリップが生じず, 高い案内精度が期待できる. 加えて摩耗劣化がなくメンテナンスフリーを実現できるなど有用性が高い. ところで磁気式は電磁石が多数必要で発熱するなどの課題を抱える. 一方, 空気式はこれら磁気式の問題を解消し, 磁力の影響を考慮する必要がない. スクイーズ効果は空気式の一つで高周波振動を与えることで自律的に静圧力を生成する. 従って外部から加圧空気の供給源が不要となり非接触の浮上支持手法として実用性が高い(小野, 1973). スクイーズ効果による浮上支持はその特性を生かして様々な応用がみられる. 例えば空気軸受では軸および周方向の回転体の保持を一つの振動子で可能にしている(大岩, 2006). 最近は半導体シリコンウェハや液晶ガラス基板の大型化にともない, 枚葉搬送が進んできている(小池, 上羽, 2008). これらは損傷を防ぐ目的から非接触搬送が望まれておりスクイーズ効果は好適であるが推進手段が課題となる. 例えば, 物体を定在波で浮上保持して振動子ごと推進させるもの(大八木他, 2003). また, 脱落防止の定在波と推進の進行波を重畳させて物体を搬送路に沿って推進させるもの(磯部, 2011)が報告されている. 本研究ではこれら単に物体搬送を目的として研究されているスクイーズ効果の非接触支持技術を応用展開して, 推進機能を持つ試料搭載用リニアスライダの構築を試みる. 類例の研究として角形ガイドの4辺に対して支持力を得るスライドテーブルの開発(Yoshimoto et

al., 2007) がある。ただし、推進力は発生しない。また、ハの字型に加工したスライダを進行波で推進させる機構の開発 (Ide et al., 2005) があるが搬送路自体を高周波振動させる必要がある。本研究で提案するリニアスライダはスライダ推進方向の左右両側2か所のみスクイーズ効果を発生させて浮上支持する。さらに各々の空気膜厚を個別に調整して浮上量差を生じさせ、スライダ自体の傾きを利用して自重で推進力を得る独特の手法によるものである。これらにより搬送路に特別な加工を必要とせず全体を振動させる必要がない。また、搬送路を傾斜させることなく単に両側の高周波振動振幅の加減のみで推進が可能であるといった特徴を有する。本研究では平板をスライダとする試験装置を試作し、浮上性能を調べた。また、浮上量差を与えてスライダ負荷重量変化に対する推進力の計測および評価を行った。

2. スライダ推進原理

スライダはスクイーズ効果による空気膜によって浮上支持されるため物理的な摩擦を生じない。したがってごく微小な傾斜を与えることで推進が可能である。図 1 に推進の原理を示す。(a)はスクイーズ効果が生じる前の初期状態を表す。加振用の振動子として用いる PZT A,B をスライダ推進方向の左右両側に対称配置する。PZT の上端には加振パッドを取り付けてスライダを保持している。次に(b)のように PZT A,B それぞれを同周波数 $f_0(\text{Hz})$ 、同振幅 $a_0(\mu\text{m})$ で加振させると加振パッド、スライダ間に等しい膜厚が生成されスライダが $Z_0(\mu\text{m})$ の高さで浮上支持する。さらに(c)のように PZT A の加振振幅を $a_1(\mu\text{m})$ に増幅すると膜厚が $Z_1 > Z_0$ となりスライダに $\theta(\text{arcsec})$ の角度で傾斜が生じ、自重 $W(\text{g})$ によって推進力 $F(\text{N})$ が発生する。 θ は微小であるため F は重力加速度を $g (\text{m/s}^2)$ とすると式(1)で求められる。PZT A,B の加振振幅を相互に調整して膜厚を変化させることでスライダは左右両方向に推進可能である。

$$F = \left(\frac{W \cdot g}{1000} \right) \cdot \left(\frac{\pi \cdot \theta}{180 \cdot 3600} \right) \quad (1)$$

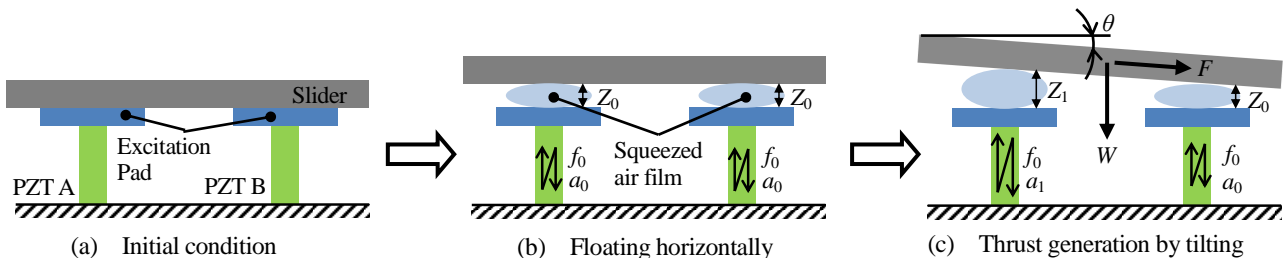


Fig.1 Principle of thrust generation by squeezed air films thickness difference

3. 試験装置および駆動・計測

3・1 試験装置の構成

図 2 にリニアスライダ試験装置を示す。振動子には最大駆動電圧 150V で発生力 200N、変位量 $42\mu\text{m}$ を出力する積層型 piezo 素子 (以下 PZT と称す) を用いている。PZT は加振機能を果たす両端を支持されたはりに対してプリロードが作用するように設置してあり、高周波の振動振幅を安定かつ確実に取り出せるよう工夫している。加振パッドには平面度 $\lambda/10$ 、 $\square 30\text{mm}$ のガラス平面基板を用い、PZT 直上のはり上面に接着している。なお、 λ は He-Ne レーザ光の波長: 632.8nm であり、一般的にガラス平面基板の平面度は λ を指標として定められている。これらで構成される加振機構 A, B はスライダの左右両側を支持させるため対称配置し、PZT A, B によって個別に空気膜を生成する。スライダは被加振面を平面度 0.01mm 、 $\text{Ra}=0.03\mu\text{m}$ で鏡面加工した重量 180g の A2017 材である。なお、スライダは長手方向に推進させるため幅方向には脱落防止用のガイドを設けている。ガイドには鋼球を取り付け、スライダに対しては点接触で摩擦力を低減し、極力推進の妨げにならないようにしている。試験装置は 3 点支持の高さ調整ねじによって水平が保たれる。

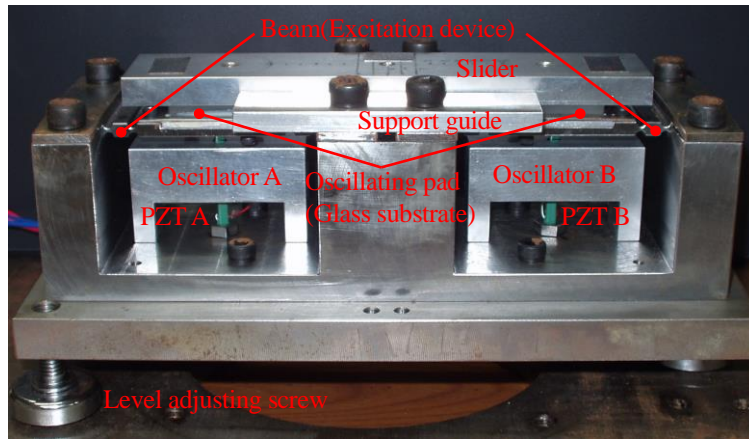


Fig.2 Apparatus of linear slider

3・2 加振機構

スクイーズ効果によって空気膜を良好に生成するには加振面，被加振面双方に対して高精度の面粗度や平面度を必要とするが，加えて両面間の平行度も重要である．加振パッドを直接 PZT 端面に取り付けると高周波振動のためパッドの挙動が不安定になりやすい．そこで図3に示すように弾性ヒンジ構造を有するはりを製作した．はり上に取り付けたパッドは可撓案内により安定した振動状態を確保できる．パッドの加振面とスライダの被加振面相互の平行度はパッドを取付けた板の底部4隅をねじで押さえ，それらの締め込み量で調整する．試行錯誤的に調整と浮上量計測を繰り返して浮上量が最大になる状態で取付け板を固定する．

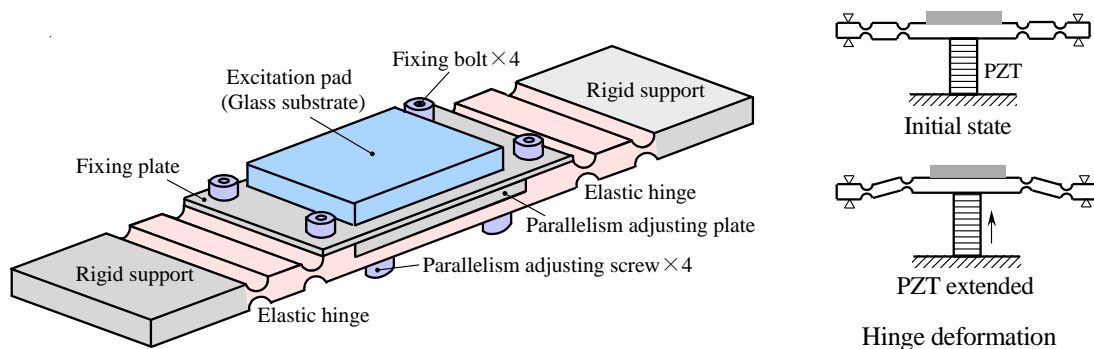


Fig.3 Excitation device (beam) applied elastic hinge mechanism with parallelism adjuster

3・3 駆動及び計測系統

図4に PZT 駆動およびスライダの浮上量，推進力の計測系統を示す．ファンクションジェネレータ (FG) から正弦波信号を出力し，アンプを介して PZT A, B をそれぞれ高周波で伸縮微動させる．FG から出力される2チャンネルの信号により振幅，周波数を PZT A, B に対して個別に設定できる．スライダ浮上量は静容量型非接触変位計で計測する．加振機構 A, B それぞれで生じる浮上量を計測するため両機構の直上に各々変位計プローブ1，プローブ2を設置している．スライダ推進力は推進を拘束する片持ちの板ばねにひずみゲージを貼り付け，曲げひずみの検出によって計測した．板ばねはスライダの推進方向に応じて取付け位置を変えられる．なお，スライダを中央に保持した状態を起点にスライダ左端から加振機構 A の加振パッド左縁までのスライダ推進移動量をストローク A，同様にスライダ右端から加振機構 B の加振パッド右縁までのスライダ推進移動量をストローク B とする．ストローク A, B はいずれも 20mm であり，両方向 40mm 推進可能な状態を全ストローク可動状態とする．

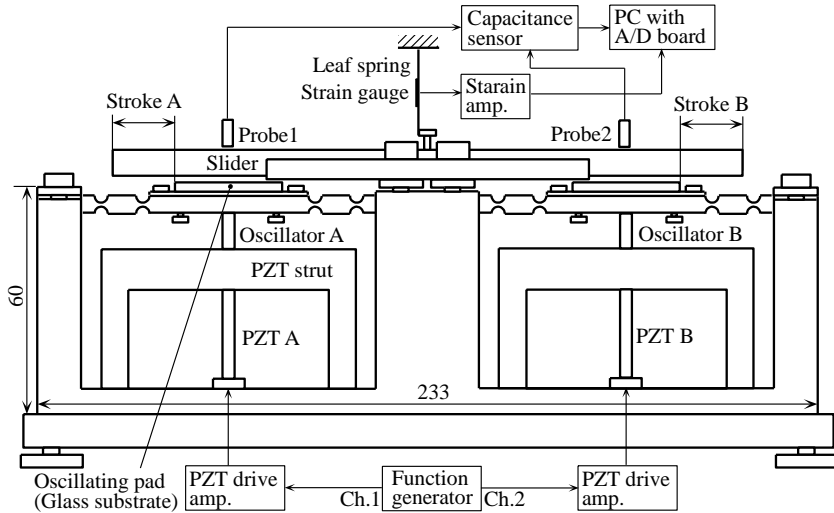


Fig.4 Setup of driving and measuring systems

4. スライダの浮上性能と負荷容量評価

4・1 スライダの浮上性能

スライダの浮上性能を調べた。浮上量の計測は加振機構 A, B を個別に駆動させて行い、加振機構 A はプローブ 1、加振機構 B はプローブ 2 で各々計測した。加振振幅は予め、PZT への印加電圧と振幅の関係を校正しておき、電圧の設定で生じさせる。なお、校正時は加振振幅の変位を検出できるように加振パッド表面に金属テープを貼り付け、静電容量変位計で計測している。図 5 は加振振幅 a_A, a_B に対する浮上量 Z_A, Z_B を示す。加振周波数 f_A, f_B は 5 種類を設定した。なお、PZT アンプ性能の都合で $a_A, a_B=9\mu\text{m}$ の一部データは取得できていない。加振機構 A, B ともにほぼ同様の浮上性能が得られている。浮上量は加振振幅に対しておおよそ 2~3 倍となり、比例して増加している。また加振周波数による浮上量の特異性はみられない。スクイーズ効果では空気粘性によって加振面、被加振面に拘束力が生じて空気の出入りが制限され、スクイーズ数と呼ばれる無次元数 σ が 10 以上になると空気の出入りがなくなる閉管状態とみなされる (小野, 1973)。本試験条件では $\sigma=30\sim 10000$ であり当該状態で浮上していると推察されることから加振周波数の大小は浮上量に影響しないと考えられる。

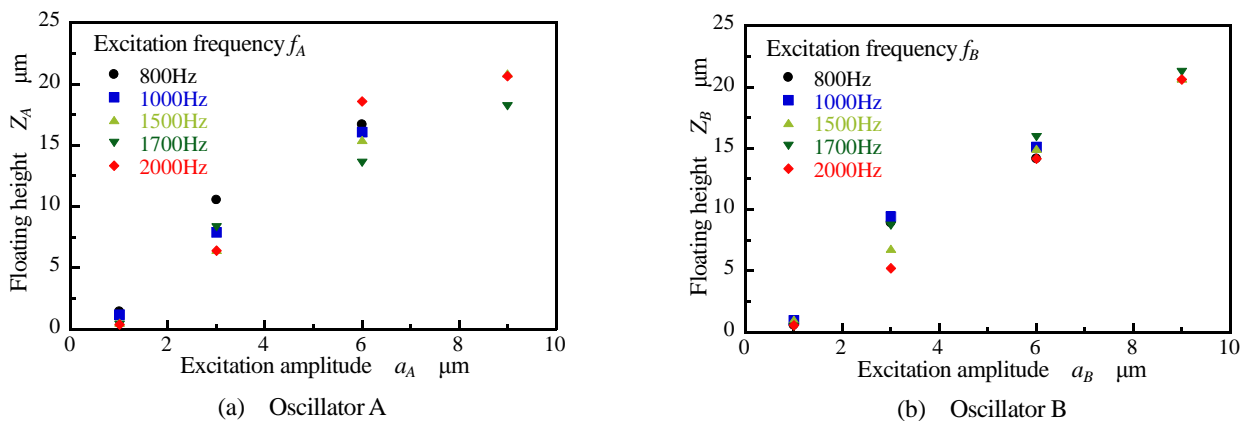


Fig.5 Relationship between excitation amplitude and floating height

4・2 負荷容量評価

負荷容量とはスクイーズ効果によって発生する空気膜が負荷する (支持する) 加振パッド単位面積当たりの重量であり、負荷容量理論値 W_L (N/m^2) は γ : 比熱比(1.4), ρ : 大気密度($1.2\text{kg}/\text{m}^3$), C : 音速($340\text{m}/\text{s}$), a : 加振振幅 (m), Z : 浮上量(m) とすると式(2)で求められる (小池他, 1995)。

$$W_t = \frac{\pi}{2 \cdot \gamma} \cdot \rho \cdot C^2 \cdot \frac{a^2}{Z^2} \quad (2)$$

式(2)に図5の各値を代入すると本試験条件による W_t が求まる。また、スライダ重量($W=180\text{g}$)と加振パッドの面積($A=30^2 \times 2=1800\text{mm}^2$)から実際の負荷容量($W_a=980\text{N/m}^2$)が求まる。図6に加振振幅 a_A, a_B の平均 a_{ave} に対する W_a / W_t の百分率を示す。実際の負荷容量は理論値に対して数%にとどまっている。4・1節で述べた通り本試験条件は閉管状態に相当するが、理論値通りの負荷容量を保って当該状態に近づけるには良好な閉管状態の生成が必要であり、加振面、被加振面の表面精度向上や平行度調整に相当の余地があるといえる。特に $a_{ave}=1\mu\text{m}$ では極端に負荷容量が低いが加振振幅が小さい領域では殊に高い閉管状態の生成能力が必要と考える。また、 $a_{ave}=3\mu\text{m}$ では $a_{ave}=1\mu\text{m}$ ほど負荷容量は小さくないが、閉管状態の生成が周波数に対して安定せず、加振周波数 f_A, f_B によるばらつきが生じたと推測する。

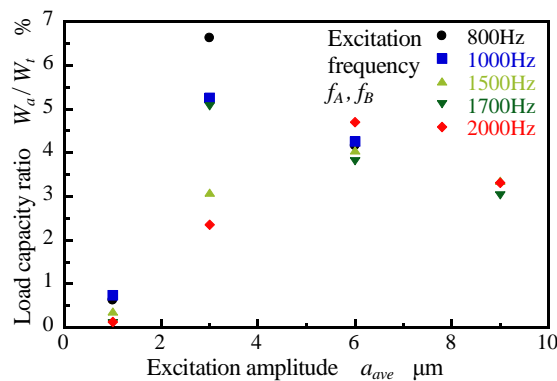


Fig.6 Estimate of load capacity

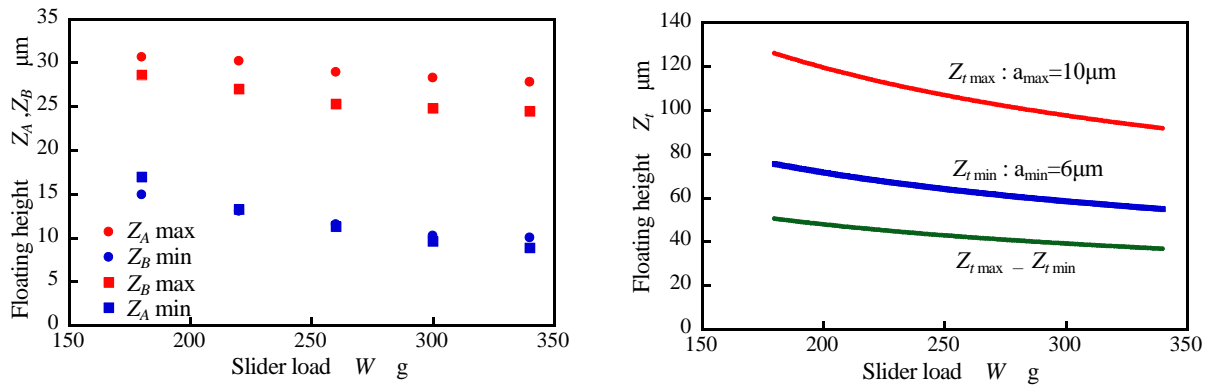
5. 全ストローク可動状態における推進力計測

5・1 スライダ重量変化に対する浮上量と傾斜の関係

浮上量 Z_A, Z_B はスライダが全ストロークにわたって推進可能になるように加振振幅 a_A, a_B を試行錯誤的に調整して計測した。なお、加振周波数 f_A, f_B はいずれも 1700Hz で固定している。スライダ重量 W はスライダ上にもり載せて変化させ、180g~340g の 40g 刻みで設定した。なお、スライダ傾斜角は 3・3 節で説明した板ばねで推進を妨げ、スライダを中央に静止させた状態で計測した浮上量 $Z_A \cdot Z_B$ をもとに算出する。図 7(a)はスライダ重量 W の変化に対する $Z_{A \max} \cdot Z_{B \min}, Z_{A \min} \cdot Z_{B \max}$ を示す。 Z_A, Z_B のいずれも W の増加に応じて小さくなる。ところで浮上量の理論値 $Z_t(\text{m})$ は負荷容量を算出する式(2)を変形して式(3)で求められる。

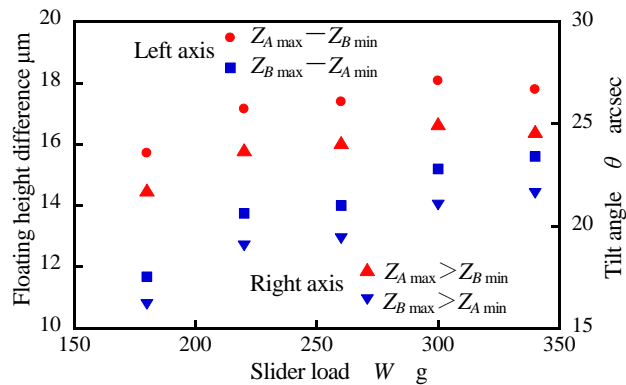
$$Z_t = \sqrt{\frac{\pi \cdot \rho \cdot C^2 \cdot a^2}{2 \cdot \gamma \cdot W}} \quad (3)$$

式(3)に本試験の設定値程度である $a_{\max}=10\mu\text{m}$, $a_{\min}=6\mu\text{m}$ を代入して各々浮上量：大の場合および浮上量：小の場合に該当する $Z_{t \max}, Z_{t \min}$ の W の変化に対する結果を図 7(b)に示す。なお、4・2節で述べた理由により浮上量が試験では理論値より小さくなっている。そこで、図 7(a)と図 7(b)の W の変化に対する $Z_A \cdot Z_B$ と Z_t を定性的に比較すると図 7(a)では W が 180g~300g までは $Z_A \cdot Z_B$ とともに漸減して 300g から 340g ではほぼ減少が収束傾向にある。一方、図 7(b)では W の増加に伴って Z_t は漸減するが減少割合は徐々に小さくなっている。これらより、スライダ重量に対する浮上量の特性は試験値と理論値でほぼ同様の傾向を示しているといえる。図 7(c)は図 7(a)のデータをもとにした浮上量差と傾斜角を示す。図 7(b)より理論値では W の増加にともなって $Z_{\max} - Z_{\min}$ は漸減するが試験では概ね漸増する結果となった。



(a) Maximum and minimum of floating height

(b) Theoretically estimated floating height



(c) Floating height difference and tilt angle

Fig.7 Floating property of slider to load change for assuring drive

5・2 スライダ重量変化に対する推進力の計測

浮上量とあわせて推進力の計測を同時に行った。計測手法は3・3節で説明した通りである。図8にスライダ重量 W の変化に対する傾斜角 θ と推進力 F の関係を示す。 $Z_{A \max} > Z_{B \min}$ 、 $Z_{B \max} > Z_{A \min}$ のいずれの場合も θ は 20arcsec 、 F は $0.15\sim 0.35\text{mN}$ 程度であった。また、推進力計測用の板ばねを取り外して拘束フリーの状態にした上で推進力計測と同等の条件に設定してスライダの可動状態を目視で確認したが、全ストロークにわたって推進することを確認した。

5・3 スライダ傾斜角の大小および負荷重量の大小と推進力の関係

スライダ推進力を得る手法として次の2通りが挙げられる。①スライダ重量は変化させず傾斜角を大きくする。②浮上量調整による傾斜角変化を生じさせないでスライダ重量を増す。そこで、①、②のいずれが効率的に推進力を高めるのに有効であるかを調べた。図9は式(1)より求めたスライダ単体の重量が固定 (180g) の場合における傾斜角 θ と推進力 F の関係および、図8に示す $Z_{A \max} > Z_{B \min}$ 、 $Z_{B \max} > Z_{A \min}$ の θ と各々の F を平均した関係をプロットして示す。①は浮上量を一方的に上昇させることで可能であり、原理的に加振振幅を上げれば良いので理論値で表す。一方、②は4・2節で評価したように実際の負荷容量は理論値に比して小さいため実験値による確認が必要である。ところで①では、浮上量に加振振幅に依存するため推進力は加振振幅の設定可能範囲に応じて決定する傾斜角に従う。対して、②では重量増加に追従して確実に推進力が高くなっている。従って、スライダ重量を増すのは加振振幅設定可能範囲の制約がある傾斜角を大きくする手法に比して推進力を効率的に高めるのに有効な手段である。

5・4 浮上量差による推進力の確認

スライダが浮上量差による傾斜角によって推進力を得ているかを確認した。式(1)にスライダ重量と傾斜角を代入した計算値と試験値とを比較した。図 10 にその結果を示す。両者は良好に一致しておりスライダが非接触で支持されかつ自重成分のみで推進力を生じていることが分かる。

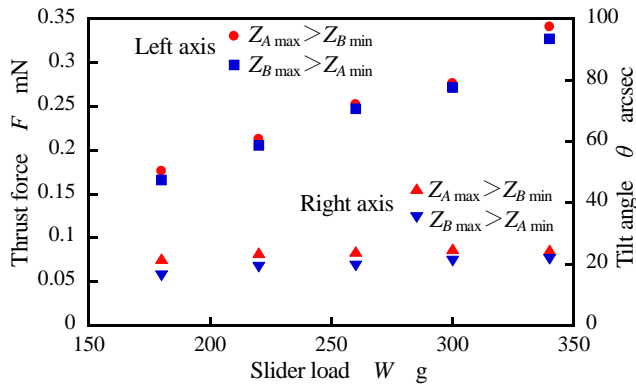


Fig.8 Thrust force of slider to load change

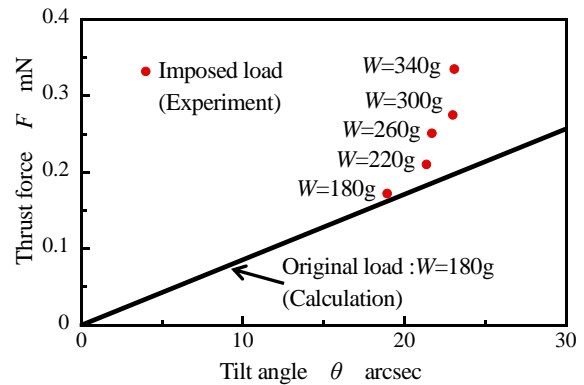


Fig.9 Comparison of thrust force between original load and imposed load for slider

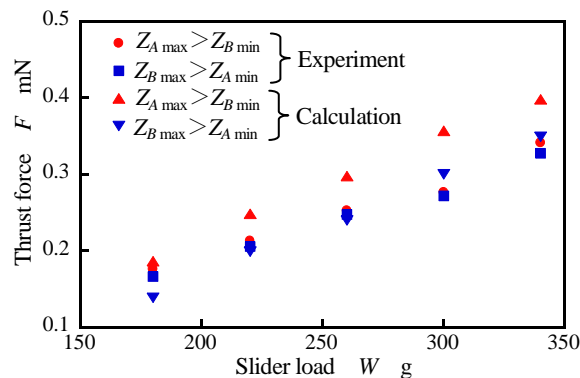


Fig.10 Comparison of thrust force between experiment and calculation

6. 結 言

スクイーズ効果で浮上支持させ、浮上量差で推進力を発生するリニアスライダを開発し、試作装置で評価試験を行った。本研究で得られた知見ならびに課題と今後の展望を以下にまとめる。

- (1) 左右両側 2 か所をスクイーズ効果による空気膜で浮上支持させ、さらにそれぞれの膜厚調整で生じる浮上量差で推進力を発生するリニアスライダを提案した。
- (2) リニアスライダ試験装置を試作した。スクイーズ効果を良好に生成させるため加振面、被加振面相互の平行度を調整できる機構を設けた。さらにそれぞれに高精度の面粗度や平面度を持たせ、加振用の振動子である PZT の高周波振動を確実に取り出せるように可撓案内を採用した。
- (3) スライダの浮上性能を調べた。左右ともにほぼ同等の浮上量を得た。浮上量は加振振幅の 2~3 倍程度であり比例して大きくなった。また、スクイーズ数が 10 以上であるため閉管状態になったと推察され、加振周波数の大小は浮上量に影響しないと考えられる。
- (4) スライダの負荷容量は理論値に対して数%にとどまった。スクイーズ効果による十分な浮上能力を獲得するためには良好な閉管状態の生成が必要であり、加振面、被加振面の表面精度向上や平行度調整に相当の余地があるといえる。

- (5) スライダが全ストロークで推進可能な状態でのスライダ推進力を計測した。傾斜角は 20arcsec, 推進力は 0.15~0.35mN 程度だが確実に推進することを確認した。また, スライダ重量を増すことは, スライダ重量は固定のまま傾斜角を大きくする手法と比較して, 推進力を効率的に高めるのに有効な手段である。さらに, 推進力の実測値と計算値は良好に一致しており, スライダが非接触で支持され自重成分のみで推進力を生じていることが確認された。

スクイーズ効果を用いてリニアスライダの非接触支持および推進を試みたが上記の通り基本的な性能を示すことができた。今後, 有用性を高めるために以下の展望を挙げる。

- (1) 今回, スライダの幅方向は脱落防止のためやむを得ず物理的に支持したが完全に非接触支持可能な構造を検討したい。例えばスライダを幅方向に対してくさび状に支持する形態が考えられる。
- (2) スライダの負荷容量を大きくしたい。加振面, 被加振面の支持機構や調整手法を見直してスクイーズ効果の発生効率を高める。

謝 辞

本研究の一部は研究実施当時, 九州工業大学卒業研究生, 室本国人氏の研究課題として実施されたものである。ここに記して謝意を表す。

文 献

- Ide, T., Robert, F., Nakamura, K. and Ueha, S., Low-profile design for the noncontact ultrasonic levitated stage, *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol.44, No.6B(2005), pp.4662-4665.
- 磯部浩己, 超音波音響粘性力と空気静圧を組み合わせた非接触基板搬送路 (第一報), *精密工学会誌*, Vol.77, No.4(2011), pp.433-437.
- 小池義和, 橋本芳樹, 上羽貞行, スクイーズ膜圧理論に基づいた浮揚現象の検討, *信学技報*, US95-74(1995), pp.45-49.
- 小池義和, 上羽貞行, 近距離場音波浮揚を用いた搬送技術, *日本機械学会誌*, Vol.111, No.1074(2008), pp.52-55.
- 大岩孝彰, 超音波振動を用いたアクティブベアリング, *信学技報*, US2006-87(2006), pp.7-12.
- 大岩孝彰, 勝木雅英, 超精密位置決めにおけるアンケート調査, *精密工学会誌*, Vol.81, No.10(2015), pp.904-910.
- 小野京右, スクイーズ空気軸受, 潤滑, Vol18, No.10(1973), pp.773-779.
- 大八木岳人, 諸熊洋輔, 小池義和, 上羽貞行, 高三正己, 振動板の傾斜制御を用いた近距離場音波浮揚利用非接触搬送法の搬送速度向上に関する検討, *信学技報*, US2003-89(2003), pp.25-30.
- Yoshimoto, S., Kobayashi, H. and Miyatake, M., Float characteristic of a squeeze-film air bearing for a linear motion guide using ultrasonic vibration, *Tribology International*, 40(2007), pp.503-511.

References

- Ide, T., Robert, F., Nakamura, K. and Ueha, S., Low-profile design for the noncontact ultrasonic levitated stage, *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol.44, No.6B(2005), pp.4662-4665.
- Isobe, H., Non-contact handling and transportation for board by ultrasonic oscillation (1st. report), *Journal of the Japan Society for Precision Engineering*, Vol.77, No.4(2011), pp.433-437 (in Japanese).
- Koike, Y., Hashimoto, Y. and Ueha, S., A study of an acoustic levitation phenomena by means of the squeeze film theory, *Technical Report of IEICE US95-74(1995)*, pp.45-49 (in Japanese).
- Koike, Y. and Ueha, S., Non-contact transportation using near-field acoustic levitation, *Journal of the Japan Society of Mechanical Engineers*, Vol.111, No.1074(2008), pp.52-55 (in Japanese).
- Oiwa, T., Active air bearing based on ultrasonic oscillation, *IEICE Technical Report*, US2006-87(2006), pp.7-12 (in Japanese).
- Oiwa, T. and Katsuki, M., Survey of questionnaire on ultra-precision positioning, *Journal of the Japan Society for Precision Engineering*, Vol.81, No.10 (2015), pp.904-910 (in Japanese).

- Ono, K., Squeeze air bearing, *Journal of Japanese Society of Tribologists*, Vol.18, No.10(1973), pp.773-779 (in Japanese).
- Ooyagi, T., Morokuma, Y., Koike, Y., Ueha, S. and Takasan, M., Improvement of transportation velocity for a non-contact transportation system using near-field acoustic levitation through tilting angle control of vibration plate, *IEICE Technical Report*, US2003-89(2003), pp.25-30 (in Japanese).
- Yoshimoto, S., Kobayashi, H. and Miyatake, M., Float characteristic of a squeeze-film air bearing for a linear motion guide using ultrasonic vibration, *Tribology International*,40(2007),pp.503-511.