

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 20 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2010～2012

課題番号：22360070

研究課題名（和文）従来原理の限界を超える“進行波”空気軸受の開発

研究課題名（英文）Development of “Traveling Wave” Air Bearing which Exceeds Limitation of Traditional Principles

研究代表者

社本 英二（SHAMOTO EIJI）

名古屋大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：20216146

研究成果の概要（和文）：

本研究では、進行波を利用した新しい軸受原理によって高性能軸受を開発し、さらに超精密送り装置としての性能を評価した。まず、有限要素法解析により適切な駆動条件と装置寸法を決定し、理論性能を求めた。次に、直接軸受荷重を支える方向に多数の圧電板を配置する高剛性・高精度軸受を提案し、進行波発生部をモジュール化することで安定した性能の実現を目指した。その結果、浮上量4  $\mu\text{m}$ 時において68.8 Nの軸受荷重と27.4 N/ $\mu\text{m}$ の剛性が得られることを実証した。その他、軸受媒体として液体を用いる進行波軸受も新たに提案し、剛性・耐荷重性能が大幅に向上すること等を解析的に明らかにした。

研究成果の概要（英文）：

A high-performance fluid bearing which utilizes traveling waves has been proposed and evaluated in this research. First, ideal performance of the bearing is calculated by utilizing the finite element model at appropriate driving conditions and device dimensions. Next, a new device with higher rigidity and accuracy is proposed, where many thin piezoelectric plates support the bearing plate directly in the supporting direction. In addition, modular actuators which generate the traveling waves are developed to attain steady performance. As a result, it is verified that the developed device can generate bearing force of 68.8 N and has rigidity of 27.4 N/ $\mu\text{m}$  at floating displacement of 4  $\mu\text{m}$ . Furthermore, a new type of traveling-wave bearing is proposed which utilizes liquid as the bearing medium. It is clarified analytically that the liquid bearing has considerably higher performance.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	4,500,000	1,350,000	5,850,000
2011年度	3,400,000	1,020,000	4,420,000
2012年度	6,100,000	1,830,000	7,930,000
総計	14,000,000	4,200,000	18,200,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・設計工学・機械機能要素・トライボロジー

キーワード：トライボロジー，機械要素，流体軸受，進行波，非接触浮上

## 1. 研究開始当初の背景

「機械」は一般に可動部を持つ。この可動部を支持する基本的な機械要素が軸受であり、その基本特性としては第一に摩擦力が小さいことが要求される。すなわち、低摩擦の軸受を開発することは機械にとって太古から極めて基本的かつ重要な課題であった。

古くから広く用いられている軸受にはすべり軸受と転がり軸受があり、前者は紀元前約 2500 年のメソポタミアにおいて、後者は紀元後約 50 年のローマ近郊において使用されていたことが知られている。低摩擦の軸受を目指して、1865 年にはフランスにおいて L.-D. Girard が静圧軸受を發明し、その実演がパリ万博において話題を呼んだと言われている。同時期に、能動型磁気軸受が考案され、1950 年頃に実現されている。その後、1964 年には、スクイーズ軸受の実現の可能性が初めて示されている。これらの各種軸受は、それぞれの特徴に応じて利用されているが、これ以降には原理的に新しい軸受は創案されていないようである。

これに対して申請者らは、進行波を利用した新しい非接触流体軸受の原理（図 1 参照）を創案し、その原理に基づく軸受装置（図 2）を試作して、周囲の空気を媒体とする非接触浮上が可能であることをすでに実証している。

## 2. 研究の目的

本装置は、原理的に、また理論解析上、極めて高い性能（高剛性、高耐荷重、軸受力の制御性、付帯設備の簡略化など）を有するが、上記の初めての試作機では、軸受寸法や駆動条件が最適化されておらず、装置自体の剛性や精度が低いことから、十分な性能を確認するには至っていない。そこで本研究では、適

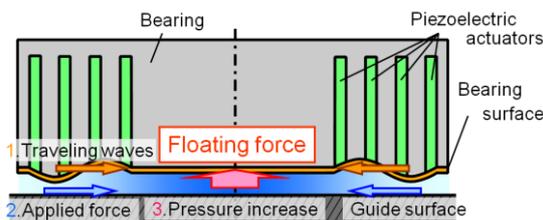


図 1 進行波軸受の原理

表 1 アクチュエータの仕様

Number of piezoelectric elements	10
Pitch of piezoelectric elements	2.5mm
Width	30mm
Height	34mm
Thickness	23.9mm

切な寸法や駆動条件を見出すとともに、より優れた進行波の発生機構を考案することで、従来原理の限界を超える超高性能・非接触気体軸受の開発に挑戦する。

## 3. 研究の方法

本軸受の浮上原理を図 1 に示す。軸受内部に配置した圧電素子を振動させることで軸受面上に軸受外周部から軸受中央部へ向かう進行波状の変位を発生させる。軸受面の変位によって軸受隙間内における流体が進行波の進行方向に駆動力を得ることで、流体が軸受中央部に搬送され、軸受中央部における圧力が上昇し、非接触支持を実現する。

本軸受の特徴として、軸受面に圧縮流体を供給する必要がないこと、また、静止状態においても負荷容量を発生させられることが挙げられる。さらに、浮上力から吸着力までの幅広い範囲にわたり軸受力を電氣的に制御することも可能である。

## 4. 研究成果

### 4-1 進行波アクチュエータのモジュール化と軸受への適用

#### 4-1-1 モジュール式進行波圧電アクチュエータの開発

圧電素子を用いた進行波発生部を一つのアクチュエータとしてモジュール化することで、組立てを簡素化するとともに、安定した高い軸受性能の実現を目指す。試作開発したアクチュエータの仕様及び外観をそれぞれ表 1、図 2 に示す。本アクチュエータは直方体形状とし、厚さ 1mm の圧電素子 10 枚を厚さ方向に 2.5mm 間隔で並べ、各圧電素子間を充填剤によって埋めて接着する。本アクチュエータは各圧電素子を異なる位相差で振動させる必要があるため、隣り合う圧電素子の変位を拘束しないよう、充填剤にはヤング率の低い材料としてシリコンゴムを用いる。また、各圧電素子間にスペーサとしてガラスビーズを挟むことで、各圧電素子の間隔を等間隔に保持する。各圧電素子に対して位相差をつけた電圧を印加し、各圧電素子の縦方向の変位を利用することで図 1 に示すように進行波を発生させる。

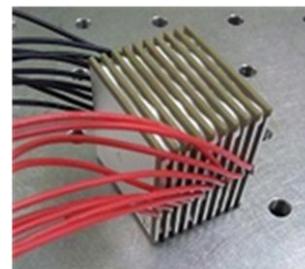


図 2 開発したアクチュエータ

#### 4-1-2 モジュール式アクチュエータを用いた軸受の開発

次に、モジュール化した進行波アクチュエータを用いて進行波軸受を試作開発した。試作機の外観を図3に示す。本試作機は、軸受面のための平板（以下軸受面板）上に、本アクチュエータを4つ及び隙間を支えるための支柱を配置し、これらを上板によって挟み込む構造である。支柱によって装置全体の剛性が確保される。各部材はエポキシ系接着剤を用いて接着され、高い平面度が必要な軸受面は組立後に超精密加工機を用いた端面旋削によって仕上げられる。軸受面板の材料には、圧電素子による変形の容易さ及び平面加工の容易さを考慮してA2017Sを、支柱には圧電素子と線膨張係数が近い低熱膨張鋳鉄を用いる。装置サイズは内節煙直径85 mm、装置重量は1.06 kgである。



(a) 内部構造 (b) 組立て後

図3 試作開発した軸受装置

#### 4-2 開発した進行波軸受試作機の評価

本試作機を評価するために、本試作機を駆動させ、浮上させた時の浮上量を測定した。実験装置の模式図を図4に示す。変位計として静電容量型変位計を用い、試作機の上板上面においてできる限り外周寄りの3点における変位を測定する。浮上量は、駆動前後における変位の差を、3点で平均した値と定義する。駆動条件は、駆動周波数1750 Hz、印加電圧300 V<sub>pp</sub>である。測定結果として荷重と浮上量の関係を図5に示す。図5より、荷重の増加に伴い、浮上量が漸減し、浮上量4 μm時において本試作機が支えることのできる荷重は68.8 Nであることが分かる。また、浮上量8 μm及び4 μm近傍において、荷重と浮上量の関係はそれぞれ8.2 N/μm、27.4 N/μmである。

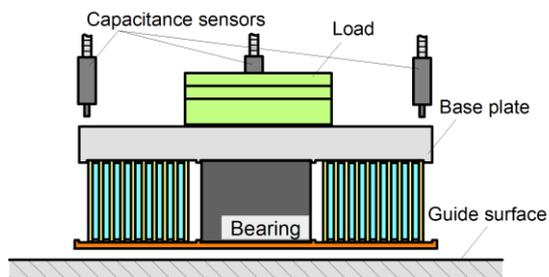


図4 測定実験の方法

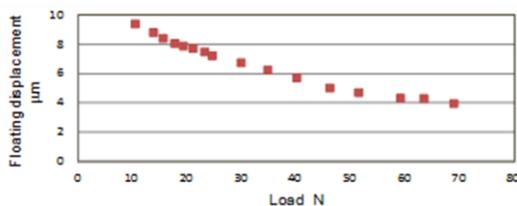


図5 軸受負荷と浮上量の関係

#### 4-3 精密スライダの設計

ここでは、さらに上記軸受を複数用いた精密スライダの開発を目指す。設計した精密スライダを図6に示す。

まず、ガイド部分について述べる。ガイド部分は2つの案内面が内側を向いて直行するV字型形状であり、案内面のための平板及び案内面のための平板を固定するための骨組み部分によって構成される。骨組み部分は材料にSUS304を用い、除振台に固定する。案内面は材料にSUS420J2を用い、精密研削によって平面度2 μmに加工されている。ガイド部分の寸法は概ね幅400×高さ200×奥行き400 mmである。

次に、スライダ部分について述べる。スライダ部分は軸受面を案内面に対して平行になるように配置する三角柱形状であり、前章で述べた進行波軸受の試作機及び中空の三角柱形状のフレーム部分によって構成される。フレームに本軸受をエポキシ系接着剤に

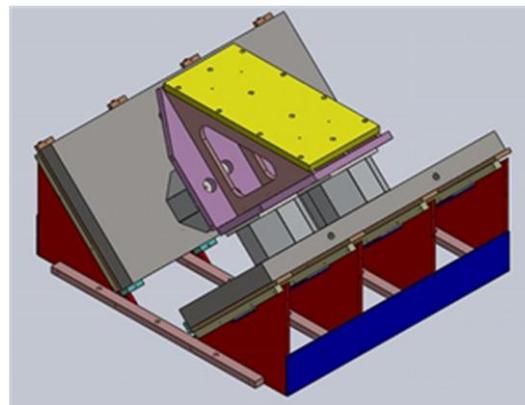


図6 試作開発した1軸スライダ

よって接着することで組立てる。軽量化のために、フレームは材料としてA2017Sを用いる。耐モーメント性、左右のバランス及び重心の高さを考慮して、本軸受を片面に対して上部に1つ、下部に2つ配置し、計6つ用いる。軸受面と案内面の直角度の誤差は軸受装置とフレーム間のエポキシ層によって吸収される。なお、本試作機を含めたスライダ部分の装置重量は概算で8.56 kgである。

#### 4-4 まとめ

本研究では、進行波軸受の実用化に向け

ての検討を行った。本報ではモジュール式の進行波圧電アクチュエータを開発し、本軸受の製作性を向上させる手法を提案した。さらに、開発したアクチュエータを用いた進行波軸受を試作開発し、その評価（荷重と浮上量の関係）を行った。最後に、本軸受装置を用いた精密スライダを設計開発し、その概要を述べた。

なおここでは詳細を省略したが、軸受媒体として液体を用いる進行波軸受を新たに提案し、剛性・耐荷重性能が大幅に向上する反面、進行波に起因する軸受振動が顕著に発生する問題があることを解析的に明らかにした。この振動を抑制するため、進行波発生用アクチュエータに与える駆動電圧に、進行波に同期するオフセット電圧を与える手法を提案した。解析モデルに本手法を組み込んで確認した結果、良好に振動を抑制し得ることを確認した。現在、油を媒体とする進行波軸受装置を試作し、試作装置の性能を評価する実験を行っている。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 14 件)

- ① 社本 英二: 新しい原理に基づく流体軸受, トライボロジスト, 58-2, 2013, 掲載確定 (査読無し)
- ② 橋本洋平, 鈴木教和, 浅羽正和, 樋野励, 社本英二: 研磨パッドの微細凹凸接触を考慮した CMP プロセスの EHL 解析, 精密工学会誌, 79-2, 2013, pp. 73-80 (査読有り)
- ③ 品川 幹, 社本 英二: 機械構造の結合部における摩擦減衰の解明と定量的予測 (ねじり振動が作用する場合), 日本機械学会論文集 C 編, 78-2, 2012, pp. 2048-206 (査読有り)
- ④ 尾本悠輔, 加藤大香士, 鈴木教和, 安井隆雄, 大里恵子, 加地範匡, 渡慶次学, 馬場嘉信, 酒井康彦, 社本英二: パイこね変換に基づく量産対応・高速ミキサの開発, 日本機械学会論文集 B1 編, 78-2, 2012, pp. 762-768 (査読有り)
- ⑤ 橋本洋平, 鈴木教和, 樋野励, 社本英二: CMP プロセスにおける接触応力の動的有限要素法解析, 精密工学会誌, 77-2, 2011, pp. 513-519 (査読有り)
- ⑥ Tatsuya Mori, Tomoki Hiramatsu and Eiji Shamoto: Simultaneous double-sided milling of flexible plates with high accuracy and high efficiency -Suppression of forced chatter vibration with synchronized vibration with synchronized single-tooth cutters, Precision Engineering, Vol.35, 2011, pp.416-423 (査読有り)
- ⑦ Gyungho Kim, Chun Hong Park, Eiji Shamoto, and Seung Woo Kim: Prediction and Compensation of Motion Accuracy in a Linear Motion Bearing Table, Precision Engineering, Vol.35, Issue 3, 2011, pp.393-399 (査読有り)
- ⑧ Eiji Shamoto, Tomoya Aoki, Burak Sencer, Norikazu Suzuki, Rei Hino, Tomio Koide: Control of chip flow with guide grooves for continuous chip disposal and chip-pulling turning, CIRP Annals - Manufacturing Technology, Vol.60, 2011, pp.125-128 (査読有り)
- ⑨ Norikazu Suzuki, Hideo Yokoi, Eiji Shamoto: Micro/nano sculpturing of hardened steel by controlling vibration amplitude in elliptical vibration cutting, Precision Engineering, Vol.35, Issue 1, 2011, pp. 44-50 (査読有り)
- ⑩ Yusuke Kurata, S. Doruk Merdol, Yusuf Altintas, Norikazu Suzuki, Eiji Shamoto: Chatter Stability in Turning and Milling with in Process Identified Process Damping, Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, Vol. 4, No. 6, 2010, pp.1107-1118 (査読有り)
- ⑪ Eiji Shamoto, Tatsuya Mori, Kohei Nishimura, Tomoki Hiramatsu, Yusuke Kurata: Suppression of regenerative chatter vibration in simultaneous double-sided milling of flexible plates by speed difference, CIRP Annals - Manufacturing Technology, Vol.59, 2010, pp.387-390 (査読有り)

他 3 件

[学会発表] (計 10 件)

- ① Ying-Jie Li, Burak Sencer and Eiji Shamoto: Proposal and Analysis of an Innovative Liquid Bearing Utilizing Traveling Waves, ICPT2012 (The 5th International Conference on Positioning Technology 2012), Kaohsiung, Taiwan (Nov. 14-16, 2012) pp. 221-224
- ② 小松 裕貴, 加藤 大香士, Sencer Burak, 鈴木 教和, 社本 英二: 進行波を利用した非接触流体軸受に関する研究- モジ

ール式の進行波圧電アクチュエータ及び精密スライダの開発, 精密工学会春季大会, 2012. 3. 14, 首都大学東京(東京都)

- ③ 社本 英二, 小松 裕貴, 山路 文恵, 大脇 圭裕, 鈴木 教和, 多段振動型気体軸受の提案, 精密工学会秋季大会, 2010. 9. 28, 名古屋大学 (愛知県)

他 7 件

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

<http://www.mech.nagoya-u.ac.jp/upr/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

社本 英二 (Eiji Shamoto)  
名古屋大学・大学院工学研究科・教授  
研究者番号: 20216146

### (2) 研究分担者

樋野 励 (Rei Hino)  
名古屋大学・エコトピア科学研究所・准教授  
研究者番号: 80273762

鈴木 教和 (Norikazu Suzuki)  
名古屋大学・大学院工学研究科・准教授  
研究者番号: 00359754

### (3) 連携研究者

該当無し