

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 22 日現在

機関番号：34416

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2015

課題番号：25630100

研究課題名(和文)光放射圧を用いた光ベアリングの開発

研究課題名(英文)Development of optical bearing using light pressure

研究代表者

新井 泰彦(Arai, Yasuhiko)

関西大学・システム理工学部・教授

研究者番号：80131415

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：光により得られる力の基本的な特性を検討するために、シリコンウェハにより、製作された四方にバネ構造を有する中空板を用いた実験を行ってきた。さらに、FEM(COJISOL)によるシミュレーション並びに平成27年度には、3Dプリンターを用い試作したベアリング構造モデルによる検討を以下の項目に従って実施した。(1)シリコンウェハによるバネ構造を用いた実験。(2)FEM(COMSOL)によるシミュレーションによる検討。(3)3Dプリンターを用いたベアリング構造モデルによる検討。
いずれの試みにおいても、光ベアリング製作に関する基本的な特性並びに新たな改善に向けた知見を得ることができた。

研究成果の概要(英文)：The behavior of the silicon plate supported by four springs was investigated in order to discuss the characteristics of the force that is produced by light. The characteristics were also checked using the FEM technology. The bearing model that was produced by 3D printer is checked. Each challenge was performed as follows: (1) Experiment using silicon plates: The force of light is discussed by value of the deformation of the plate by laser. It can be shown that the force by the light is almost 100pN in this experiment. (2) The simulation by FEM: The force for supporting the axis of the rotor is also 100pN in the results by FEM. To employ the resonance frequency of the axis is useful to serve bearing function by light. (3) The bearing model which is manufactured by 3D printer: Because complicated structure can be produced by 3D printer, the model produced by 3D printer is useful to check characteristics of bearing from many viewpoints. Possibility of producing optical bearing is confirmed.

研究分野：工学

キーワード：光放射圧 シリコンプロセス ベアリング 3Dプリンター

1. 研究開始当初の背景

1980年代後半からのマイクロファブリケーションの進展に伴いMEMS(Micro Electro Mechanical Systems)では、マイクロモーターのような回転機械の製作が行われるに至っていた。ところが、回転機械では、回転体と回転軸との間で機械的な摩擦面が存在するために、シリコンを用いて製作された構造物では、摩擦により回転が阻害されるのみならず、その摩擦により回転軸が大きく損傷を受ける問題が発生していた。通常の機械装置であれば、転がりベアリングあるいは、滑りベアリングなどのベアリングによってこのような問題は解消されている。しかしながら、MEMSではそのような複雑な構造を持つ従来の機械的なベアリングの製作は困難であり、たとえ作製が可能であったとしても、通常のベアリングのような高精度な製作技術でマイクロベアリングを作製することは困難であるものと考えられていた。

本研究では、このようなMEMSにおける状況を光が持つ放射圧を利用することによって、光を滑りベアリングの潤滑材として利用することによる「光ベアリング」の製作を目指して研究を開始した。

本研究開始当初の光放射圧に関しては、一般にトラッピング等に関する成果が報告される状況で、我々の研究室でもトラッピング、マイクロパーティクルを用いた推進実験などを通して光放射圧の具体的な値を求め、学会などに報告し、その成果をもとに図1に示すような多重反射による大きな力の創出についての議論を進めようとしていた。

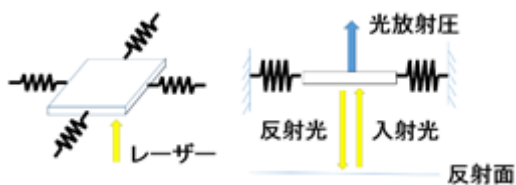


図1 中空板ばね構造の概念

このような研究開始当初の状況から、平成25年度は「基礎データの収集を中心とした研究期間」、平成26年度は「基礎データの収集ならびに実用化への基礎データの収集期間」、平成27年度は研究をさらに発展させて「3Dプリンターをもちいたプロトタイプ製作並びにその特性検証・実用化技術の検討期間」と位置付けた研究計画のもとに研究を推進してきた。

2. 研究の目的

本研究では、MEMS分野で現在実施されている光放射圧を用いた研究成果を実用につながるための技術開発を目的としている。

具体的には、回転軸などの摺動面を持つ

MEMSの潤滑を円滑に行うことのできる技術の開発と光放射圧を用いた光を潤滑剤として利用する光ベアリングの開発を目的としている。この技術開発においては、光アクチュエータの開発において培った成果をもとにするものであり、宇宙空間でも利用可能な将来的に重要な技術の開発を目指している。研究期間内に光アクチュエータに組込が可能なプロトタイプを製作する。この技術は、一般のベアリングと同様に、自動調心機能を持つものであり、MEMSにおけるより高効率な機械要素としての利用のみならず、MEMS技術のさらなる発展を促すものとなる。

従来、微小な領域において回転体と軸の間の固体摩擦が回転の妨げとなっている。この微小領域の問題を解消するために微小領域における光放射圧を利用した光ベアリング機構を本研究では開発する。

本研究で取り扱う光ベアリングの概念は、図2に示すように、回転体と軸の間に光を照射し多重反射させることによって発生した光放射圧がクッションの役割を果たし、回転体と軸との間の摩擦を軽減するものである。

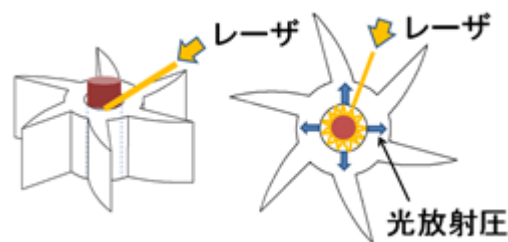


図2 光ベアリング概念図

3. 研究の方法

光ベアリングの開発にあたり、まず光を多重反射させた時にどの程度の光放射圧による力を得ることができるのかを検査する必要がある。そのために、光放射圧の基礎実験を行うことによって光放射圧による力を求めることから以下に示す3項目に従って研究を推進することとした。

(1) 光放射圧に関する基礎実験

水中でマイクロパーティクルにレーザー光を照射し推進実験によって、光放射圧の具体的な大きさを同定することより実験を開始した。さらに、光から取り出すことができる力の基本的特性を検査するために、申請書に記したシリコンウェハ(酸化膜付:厚さ $1\mu\text{m}$)によって四方にばね構造を有する中空板(表面にアルミ蒸着を施した)の作製を端緒として、マイクロフィゾー干渉計・レーザードップラー振動計を用いた光放射圧による力を図1に示すような中空板の変形より求めた。

この結果をもとに、光ベアリングとしての特性を検討した。

(2) FEMによるシミュレーションによる検討

光放射圧によって得られる力を検証するために、推進実験のみならずFEMを用いて光放射圧による板ばね構造の変形状況から具

体的に光放射圧の大きさを検討した。

(3) 3D プリンターを用いたベアリング構造

シリコンプロセスによるベアリングの製作では、複雑な構造の製作は困難であることから、より複雑な構造を簡易に製作することのできる 3D プリンターを用いて、光ベアリングの製作、並びにその特性を検討した。さらに、白金極細線(直径 625nm)を用いて製作したマイクロトルクレンチによる光ベアリングの特性の検証実験を行った。これらの成果に基づいてプロトタイプを製作した。

4. 研究成果

前章に示した 3 項目について研究を進めた。それぞれの項目における成果を示す。

(1) 光放射圧基礎実験

光が発生しうる力の基本的な特性を検討するために、図 3 に示す推進実験を行った。

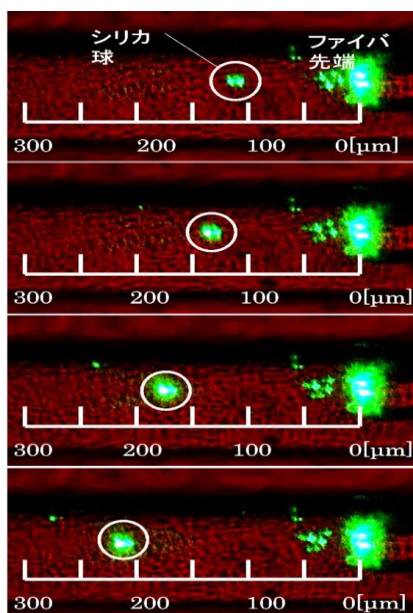


図 3 推進実験の結果

推進実験では、マイクロパーティクルにレーザーを照射し、一秒ごとのパーティクルの移動距離の変化を用いて速度を求め、ストークスの原理に従い力を求めた。100mW のレーザー照射のファイバー先端から直径 $6.5 \mu\text{m}$ の球状のパーティクルが $150 \mu\text{m}$ の地点において 4.4pN の力を得ていることが分かった。

さらに、シリコンウェハにより、製作された四方にバネ構造を有する中空板を用いた実験を行った。シリコンプロセスに基づき厚さ $1 \mu\text{m}$ のシリコン酸化膜によって、四方にバネ構造を有する中空板を製作し、その上部にアルミ蒸着によって反射率を 80% に設定した装置を製作した。

製作した板バネ変位構造を図 4 に示す。

(a) が光学顕微鏡で観察したもので、(b) が SEM を用いて観察したものである。SEM で確認することで、板バネ構造の下に反射面が形



(a) 光学顕微鏡による結果 (b) SEM による結果

図 4 シリコンプロセスに基づく板バネ構造

成されていることが分かる。また、板バネ構造は放射圧の大きさを検知するために 5 種類(一辺: $284 \mu\text{m}$, $228 \mu\text{m}$, $171 \mu\text{m}$, $114 \mu\text{m}$, $57 \mu\text{m}$) の大きさで製作した。

この板バネの上部から 50mW の半導体レーザーを図 5 に示すような装置によって照射し、光によって得られる力の大きさを検討した。また、変位を高精度で三次元計測するためにマイクロフィゾー干渉計、レーザードプラー振動計のみならず、スペックルに基づく新しい三次元変形計測法を開発した。光により得られる力は、上記の条件下では、おおむね 100pN 程度であることが分かった。



図 5 光放射圧の測定装置

(2) FEM (COMSOL) によるシミュレーション

FEM を用いたシミュレーションを図 6 に示す板バネ構造パターンを用いて検証した。これらのサイズは、すべて一辺が $150 \mu\text{m} \times 150 \mu\text{m}$ である。

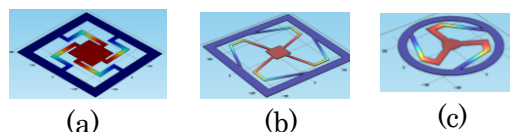


図 6 シミュレーション結果

シミュレーションにおいても、図 6 に示すバネ定数が異なる 3 パターンのモデルから、実験と同様に光により得られる力が、おおむね 100pN 程度であることを確認することができた。これらの結果は、本研究室で従来行ってきたマイクロパーティクルを用いた水中での推進実験で得られた結果において照射面積並びにレーザー出力を考慮するとよく付合するものであり、これらの力を用いて回転する軸を支えるベアリング構造を検討した。しかし、ベアリング効果をさらに高めるために、軸の固有振動数での共振現象を用いることが有効であることを図 7 に示すマイクロカ

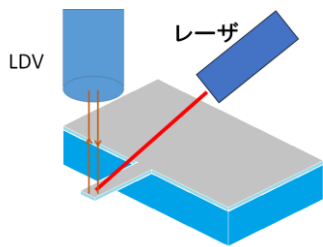


図7 マイクロカンチレバーの共振実験

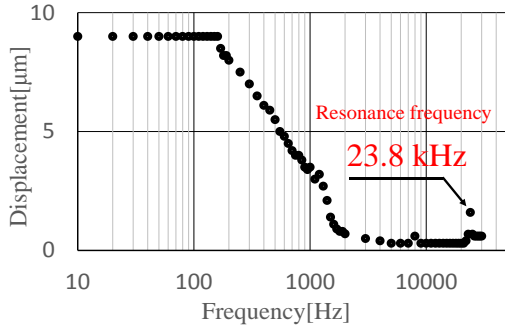


図8 マイクロカンチレバーの共振時の変位の拡大

ンチレバー(長さ:200 μm , 幅:50 μm)の共振実験において以下に示すように新たな知見として得た。

マイクロカンチレバーを共振させると図8に示すように共振周波数 23kHz において変位量が大きくなり、23.8kHz で変位が 1.6 μm であることを確認した。この性質を用いてベアリングとしての軸の保持力の増加が期待できるものと考えた。この結果より、軸の共振を利用することのできるベアリング構造が有効であるとの結論を得た。

(3) 3Dプリンターを用いたベアリング構造モデル

当初の計画では、シリコンプロセスによりベアリング構造モデルを製作することとしていた。しかし、共振現象の利用並びにより有効な軸への光の導入を目的として複雑な三次元構造の製作が可能である 3D プリンターの利用をはかり、実際にベアリング構造を製作し、そのモデルを用いてベアリング機能について検討した。

はじめに、どのような構造が製作可能であるのかを検討するために、図9に示すようなサポート付きローターを試作した。

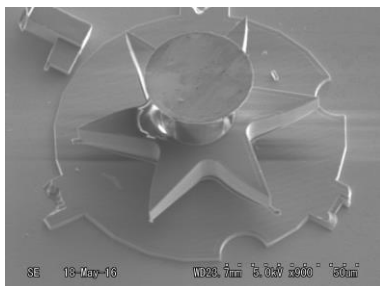
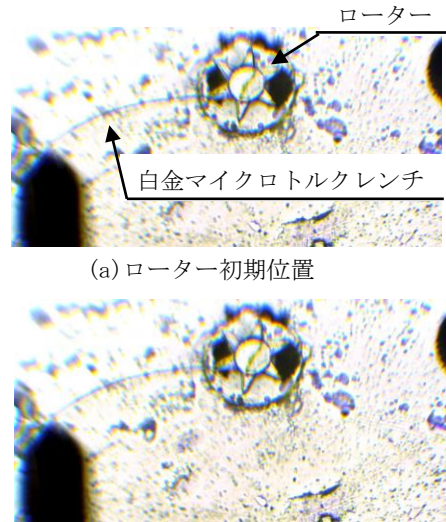


図9 3Dプリンターにより製作したローター(直径100 μm)

このローターの軸にレーザ光を照射した場合の回転トルクの軽減状況を検討するために、白金極細線(直径 625nm)を用いて製作したマイクロトルクレンチによる回転時のトルク検出を行った。

図10では中央のローターを極細線で回転させた時の(a)から(b)への細線のたわみ量からFEMを用いて回転トルクを検出している。



(a) ローター初期位置
(b) 微小角回転後のローター

図10 マイクロトルクレンチによる回転時のトルク検出

この実験において、ローターを回転させるためには 93fNm のトルク(力としては 450pN)が必要であること、450pN, 支えるためにおおむね 100pN 程度の力が必要であることが分かった。

この結果に基づいて、光ベアリングのプロトタイプを 3D プリンターを用いて製作した。光ベアリングの製作条件として、3D プリンターの製作分解能は縦方向が 200nm、横方向が 100nm であり、縦 50 μm 、横 100 μm の構造物を製作するのに 1 時間程度で、レジスト(高分子材利用)溶液中で描画によって製作することになる。当然のこととして、複雑な構造を容易に製作することができる。

本研究では、光放射圧を利用したベアリングを実際に回転させ、光アクチュエータで利用しているような軸付きローターが少しでも回転トルクの軽減で回転させやすくなるかを検証した。そのために、ローターの横には力を加えるための出っ張りを製作し、真上からレーザ光を照射させ、コーン状の鏡から

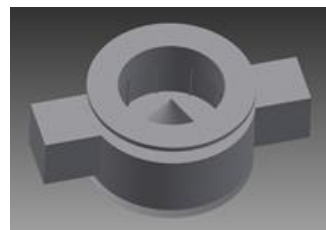


図11 光ベアリング構造の立体図

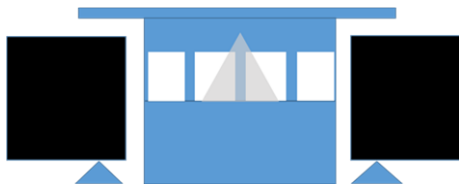
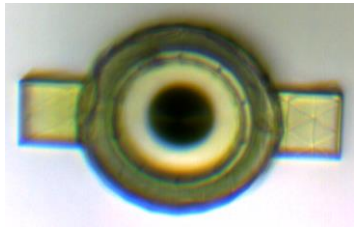


図 12 モデルの断面図



(a) 光学顕微鏡画像



(b) SEM 画像

図 13 製作結果

反射した光が軸とローターの壁面間で反射を繰り返す構造とした。また、レーザ光を軸の固有振動数で変調し、共振させる構造としている。

また、光を入射させるためにコーンを軸上部に製作している。プロトタイプの立体図を図 11、断面図を図 12 に示す。さらに、製作結果を図 13 に示す。

現在までに、申請当初の計画に従い光ベアリングを製作し、その特性を検証してきた。

当初のシリコンプロセスに基づく製作から、より複雑な構造の製作が可能な 3D プリンターの利用により、当初の計画以上に研究は進展し、具体的なプロトタイプの光ベアリングを製作することができた。

今後、作製したベアリングの形状と特性の検証を行い、改善を図ることを目指している。

<引用文献>

- ① 樋口俊郎, 大岡昌博, アクチュエータ研究開発の最前線, NTS, 2011, 154-266
- ② E. O. Doebelin, Measurement systems, McGraw Hill, 1990, 207-747
- ③ D. Malacara, Optical Shop Testing, John Wiley & Sons, 1992, 501-652.

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 4 件)

- ① Yasuhiko Arai, Development of in-plane

and out-of-plane deformations simultaneous measurement method for the analysis of buckling, Optical Engineering, 査読有, Vol. 54, 2015,

DOI: 10.1117/1.OE.542.024102

- ② 新井泰彦, 誤差要因と測定精度の向上 -2 枚のスペckルパケーンのみを用いたスペckル干渉計測法-, 機械の研究, 査読有, Vol. 67, 2015, 297-306

- ③ 新井泰彦, スペckル干渉計測に基づく三軸方向に同一測定感度を持つ三次元変形計測法の開発, 光学, 査読有, Vol. 44, 2015, 399-406

- ④ 新井泰彦, 光放射圧を用いた光アクチュエータの開発 機械の研究, 査読有, Vol. 65, 2013, 1003-1010.

[学会発表] (計 12 件)

- ① 清水大, 新井泰彦, 光アクチュエータの開発 -ローターの製作-, 2014 年度精密工学会秋季大会学術講演会, 2014 年 9 月 17 日, 鳥取大学(鳥取)

- ② 武田大樹, 新井泰彦, 光アクチュエータの開発 -微小回転素子の形状に基づく特性-, 2014 年度精密工学会秋季大会学術講演会, 2014 年 9 月 17 日, 鳥取大学(鳥取)

- ③ 新井泰彦, 光アクチュエータの開発, 第四回早稲田大学・関西大学理工学研究交流セミナー, 2013 年 12 月 18 日, 関西大学千里山キャンパス(大阪)

- ④ 木下晶博, 新井泰彦, 田原樹, 光アクチュエータの開発 -ローターの製作プロセスの確立-, 2013 年度精密工学会秋季大会学術講演会, 2013 年 9 月 12 日, 関西大学千里山キャンパス(大阪)

- ⑤ 江上大知, 新井泰彦, 田原樹, 微小物体における光放射圧の同定とそれによる光アクチュエータへの応用, 2013 年度精密工学会秋季大会学術講演会, 2013 年 9 月 12 日, 関西大学千里山キャンパス(大阪)

[その他]

ホームページ等

<http://www2.itc.kansai-u.ac.jp/~arayoshi/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

新井 泰彦 (ARAI, Yasuhiko)
 関西大学・システム理工学部・教授
 研究者番号: 80131415

(2) 研究分担者

青柳 誠司 (AOYAGI, Seiji)
 関西大学・システム理工学部・教授
 研究者番号: 30202493

多川 則男 (TAGAWA, Norio)
 関西大学・システム理工学部・教授
 研究者番号: 50298840