

## 科学研究費助成事業(学術研究助成基金助成金)研究成果報告書

平成 25 年 6 月 10 日現在

機関番号：12701

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2012

課題番号：24656155

研究課題名(和文) 微小振動系に対するレーザを用いた光減衰機構の開発

研究課題名(英文) Optical Damping Mechanism by LASER on a Micro Vibration System

研究代表者

森下 信 (MORISHITA SHIN)

横浜国立大学・大学院環境情報研究院・教授

研究者番号：80166404

研究成果の概要(和文)：

本研究では、線径 20 ミクロン、直径が 300 ミクロンのコイルばねと球による 1 自由度振動系を構築し、この微小振動系の動的特性について実験的検討を行った。まず微小要素に対する新たな計測系を提案し、固有振動数と減衰特性を実験的に把握した。次いでレーザ光によって減衰を与える可能性について検討した。この実験系で微小振動系の振動特性を得ることができたが、製造工程の問題で実験系大きくなり、放射圧による減衰作用を確認することはできなかった。

研究成果の概要(英文)：

In this project, a very small size mass-spring system was constructed and a vibration experiment was conducted to get the characteristics of the system. The spring had 300  $\mu\text{m}$  in diameter and 1 mm in length. The wire of the spring was 20  $\mu\text{m}$  in diameter. The present mass-spring system was so small that conventional measurement techniques could not be adopted, and we proposed a high-speed digital camera and microscope for the measurement system. The dynamic characteristics of this small vibration system could be obtained successfully. Further, we tried to give some amount of damping to this system by means of the optical radiation pressure produced by a LASER, but its effect could not be obtained in our experiment.

交付決定

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	3,100,000	930,000	4,030,000

研究分野：機械力学

科研費の分科・細目：機械工学・機械力学・制御

キーワード：マイクロマシン, 1 自由度振動系, 固有振動数, 減衰, 光放射圧

## 1. 研究開始当初の背景

この 10 年間、政府は科学技術政策としてナノテクノロジーを含むマイクロテクノロジー関連研究を重要視してきた。平成 13 年に公表した第 2 期科学技術基本計画、さらに平成 18 年度第 3 期科学技術基本計画でも重点推進 4 分野のひとつとして「ナノテクノロジー・材料」を取り上げ、また推進分野として「ものづくり技術」の強化を

掲げている。技術戦略マップではナノテクノロジーに関するロードマップ作成にまで至り、関連施策は関心を集めている。本研究はこのような将来のマイクロテクノロジーを見据えて微小振動系に減衰を与えて振動抑制を行うという重要な基礎研究と位置付けている。申請代表者は微細加工技術を背景として機械をどこまで小さくできるか、また従来のモデルはどこまで適用

可能かという疑問に対する回答を探している。静力学的には幾何学的相似によりある程度予測が可能であるが、動力学に関しては全く手をつけられていない状況にある。そこで、ミクロンサイズの振動系に対する基礎研究、さらにはその振動系への減衰の付与方法に興味をもつに至った。

## 2. 研究の目的

マイクロマシンという言葉は概念が先行し、その開発は研究レベルでもあまり行われておらず、小型センサを開発する程度が現状である。多少複雑な部品を組み合わせた構造をしているが、単に通常の機械の寸法を小さくしたものが多く、しかも動力学を考慮した研究は申請者の知る限りほとんどない。そこで、動力学系の基本形として、超小型のばねと質量を組み合わせた1自由度振動系によって、振動特性を実験的に把握することを目的とした。

本研究では、線径 20  $\mu\text{m}$ 、直径が 300 $\mu\text{m}$  のコイルばねと鋼球およびダイヤモンド球による1自由度振動系を実験的に構築し、振動特性を把握することで、系の動的特性に影響を及ぼす因子について同定する。さらに、微小振動系にレーザ光の放射圧を利用した減衰を作用させることを試みる。

## 3. 研究の方法

### 3.1 ばねの仕様

実験に用いたコイルばねの仕様を表1のように決定した。コイルばねのばね定数は材料力学の基本式より与えられるが、これを用いて算定したばね定数は  $3.6 \times 10^3$  [N/mm] となった。ここで、横弾性係数  $G$  は材質をピアノ線として 78,000 [N/mm] を用いている。髪の毛の太さの3倍ほどの直径をもつコイルばねである。なお、この程度の大きさでの圧縮ばねの製作は容易ではなく、極めて高度な製作技術が必要とされる。

Table 1 Parameters of Coil Spring

Outer diameter, mm	0.3
Wire diameter, mm	0.02
Number of Active Coils ( $N_a$ )	20
Natural Length [mm]	1.05
Material of Wire	SWP-H

### 3.2 ばね特性の測定

まず、ばね定数の測定を行った。単に力を加えて変位を測定すればよいことであるが、ばねが小さいために通常の力を加える方法およびばね変位の測定方法が使えない。そこで、図1に示した実験系を用いて測定を行った。基本的には力の大きさは、3軸方向に可動なステージの鉛直方向を操作して、電子天秤の計量皿にばねを押しつけ、そのときの反力を電子天秤により測定した。また、押しつけた際のステージ変位を

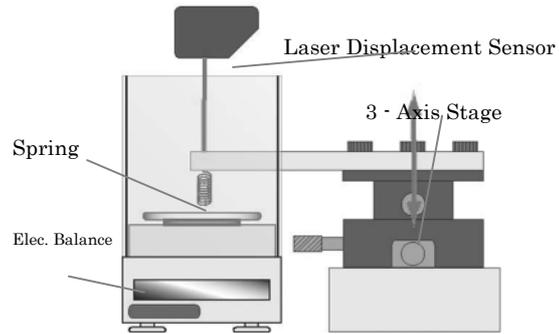


Fig.1 Measurement Method of Spring Constant

ばね変位と考え、レーザ変位系を用いてステージの移動量を測定している。

### 3.3 実験系

自由振動実験に用いた実験系の構成図を図2に示す。ばね・質量系を固定して、初期変位を与えることでその後の質量の自由振動を測定する実験である。この実験の難しさは、初期変位を与える方法および変位の測定方法にある。振動系は3軸方向に動かすことができるマイクロステージ上に懸架装置を設置して取り付けた。初期変位は、細胞生物学の実験に利用するマイクロマニピュレータに取り付けたマイクロピンセットで質量をはさみ、マニピュレータを操作することで与えた。錘の振動変位は通常の変位系では測定できないために、高速度カメラを用いて映像を取得し、マイクロスケールを映像

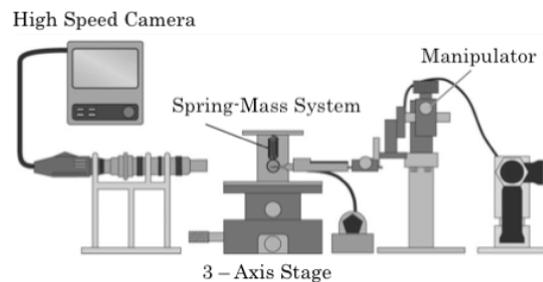


Fig.2 Experimental setup

の視野に入れることで変位を同定した。ここで利用した高速度カメラは  $640 \times 320$  ピクセルの画像ならば、6,000[fps]の速度で映像を取得できる。

## 4. 研究成果

### 4.1 ばね特性実験結果

ばね定数の測定結果を図3に示す。ばねの変位を最大 0.3mm まで測定したが、測定に多少のばらつきはみられるが、基本的には線形を保っていることがわかる。図中にはばね特性を表現する近似式も示している。なお、変位計の原点を、

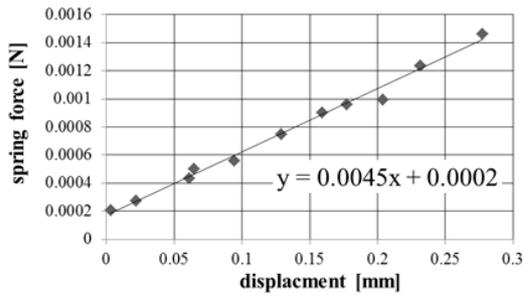


Fig.3 Experimental Results

ばねに初めて力が付加されたときに設定したため、近似直線の切片が原点とは一致しない。

#### 4.2 基本振動特性の測定結果

図3より、用いるコイルばねの特性がほぼ線形であることがわかったので、ばね定数が特定されたばねを用いて振動系を構成して自由振動実験を行った。なお、振動特性を同定するための振動系の質量には材質が SUJ-2 の鉄球を用いた。

本来、コイルばねは圧縮用のばねと引っ張り用のばねに分類され、本実験のような自然長さからのばして行う際は引っ張り用のばねを用いる。その場合は、両端にフックを取り付けるのが一般的であるが、本実験の場合は対象が小さいためにフックと錘の接着ができない。そこで、圧縮用ばねを利用して、ばねと錘の接着には瞬間接着剤を用いた。接着剤の分量も加減が必要で、多めの接着剤を用いると表面張力によりばねの内部に接着剤が容易に入り込み、有効巻き数の減少につながる。

実験は表 2 に示すような、Case-A, Case-B, Case-C にある 3 種類の質量に対して固有振動数と減衰比を測定した。表中には理論的な固有振動数が示されている。ただし、コイルばねの質量の 1/3 を錘の質量に加えて算出した値である。固有振動数に幅があるのは、コイルばねのばね定数のばらつきによる。

Table 2

	Case-A	Case-B	Case-C
Mass of spring[mg]	1.3	1.3	1.3
Mass [mg]	2.1	0.9	0.3
Natural frequency [Hz]	220-227	272-291	344-386

図4に高速度カメラを用いて取得した振動実験の映像の一コマを示す。使用したレンズがある程度の焦点深度を有しているので、マイクロスケールも同時に映っている。また逆にマイクロスケールにも焦点をあてたために写真のコントラストが弱くなっている。マイクロピンセットではばねの一端に取り付けた錘をつかんでいる様子が見える。このマイクロスケールのメモリと質量の位置関係から変位を読み取った。

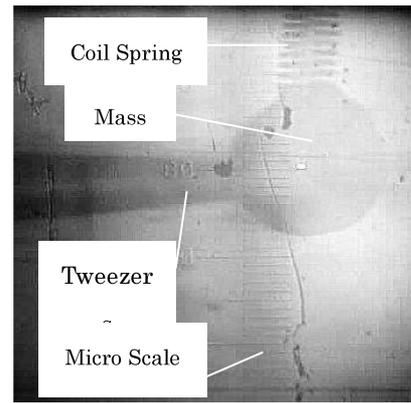


Fig.4 Example of Experimental Scene

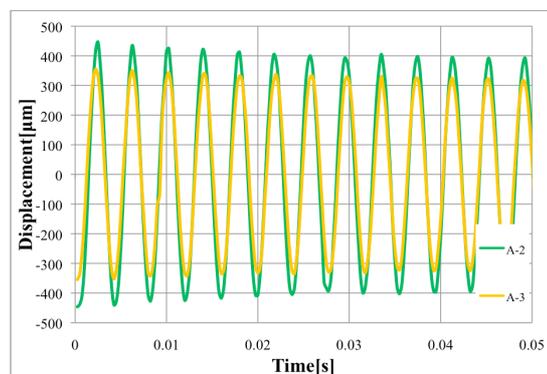


Fig.5 Vibration response (Case-A)

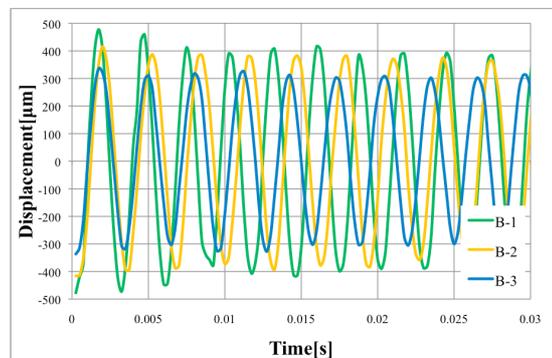


Fig.6 Vibration response (Case-B)

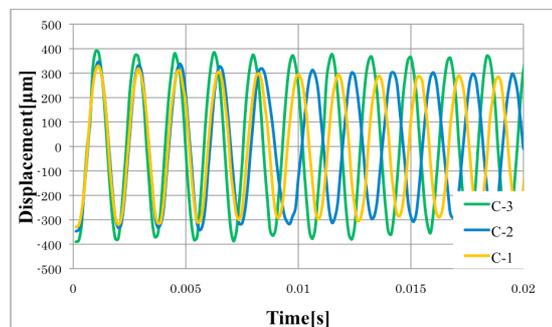


Fig.7 Vibration response (Case-C)

図5~7に映像から読み取った減衰振動波形を示す。Case-A に関しては2種類、Case-B,C に関しては3種類のばね・質量系で実験を行っている。いずれも初期変位が揃っていないが、これはマイクロピンセットおよび錘の帯電によって、錘を設定した変位で離すことができなかつたためである。この大きさになると設定した初期変位を与えることも難しい。初期変位の与え方については今後さらに検討したい。また、実験において得られたのは単純な正弦振動ではなく、ばねの分布質量に起因する進行波が重乗している様子も観察された。今回の理論値としては、ばね質量は近似的に集中質量として扱っているが、さらに分布質量系の振動として捉えることが大切である。これについても今後検討したい。

図5~7に示す減衰曲線より、固有振動数と減衰比を求めた結果を表3に示している。

Table 3 Experimental results

	Natural frequency	Predicted nat. freq.	Damping ratio
Case-A	267	224	0.0024
Case-B	327	284	0.0011
Case-C	562	367	0.00056

固有振動数については、Case-A の場合に予測値とは16%程度誤差があり、同様にCase-Bの場合に13%、Case-Cの場合は35%と次第に理論的予測値とずれが大きくなっている。これはコイルばねの質量の影響であると考えられるが、分布質量系での予測値を算出して今後比較したい。

減衰比については、3種の実験値ともに極めて小さな値であり、これは新しい発見である。実験開始前は、空気抵抗などの影響で減衰が大きくなると予測していたが、実際は減衰はほとんどないということが示された。減衰が発生する理由としてはコイルばねの内部減衰が主なものと考えており、ばねの線径が小さいために実質的体積が小さく、そのために内部減衰として作用しないのではないかと考えている。ばねの体積と減衰との関係についても今後明らかにしたい。また、さらに詳細には、この減衰の原因はばね材料の内部減衰、ばね支持部の損失、空気抵抗等が考えられるが、現状では分離できていないので、今後さらに検討したい。別の見方をすれば、マイクロマシンの減衰は小さくなるのが予測でき、そのためには振動対策が重要であることが明らかになった。

#### 4.3 光減衰機構による検討結果

本申請における研究の最終目標はレーザー光を用いた減衰の付与の可能性を検討することであった。そのために、図2に示す実験系にレーザーを組み込むことで減衰作用の有無について検討した。その際の実験系では錘にガラス球を用い

ることになる。コイルばねが当初の目的であった大きさでは安定的な製作が困難という理由で本実験系に用いたばねを使わざるを得なかつたために、振動系全体が大きくなり、減衰作用を確認することはできなかつた。理論的な検討が不十分であったこともあり、今後、さらに小さな振動系を構成して実験を継続したい。

#### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計0件)

[学会発表] (計1件)

- (1) 青木貴弘, 森下 信, 微小ばね-質量系の振動特性, 第52回日本機械学会関東学生会卒業研究発表会講演論文集, (2013) 251-252. (平成25年3月15日, 首都大学東京にて発表)

[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

#### 6. 研究組織

- (1) 研究代表者

森下 信 (MORISHITA SHIN)

横浜国立大学・大学院環境情報研究院

・教授

研究者番号: 80166404

- (2) 研究分担者: なし

- (3) 連携研究者: なし