

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 13 日現在

機関番号：12701

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2014

課題番号：26630077

研究課題名(和文) 界面電界現象を利用した超小型可変減衰要素の開発

研究課題名(英文) Controllable damping element for micro spring-mass vibration system by electric field

研究代表者

森下 信 (Morishita, Shin)

横浜国立大学・環境情報研究院・教授

研究者番号：80166404

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、線径15ミクロン、直径が100ミクロン程度のコイルばねと質量による1自由度振動系を実験的に構築してその振動特性を明らかにし、さらに、この微小振動系に界面電界現象を利用した可変減衰を作用させて振動抑制できることを実験的に試みた。その結果、この程度の大きさの振動系では従来の力学に基づくモデルが成立することを示し、さらに減衰に関しては極めて小さいということを明らかにした。実験中にはばねの内部に進行波が発生することがしばしば観察された。界面電界現象による摩擦減衰を与えることはできたが、可変にするには至らなかった。

研究成果の概要(英文)：A mass-micro spring vibration system, composed of up to 100 micron in spring diameter with very thin wire of 15 micron in diameter, was constructed and its damping characteristics were studied experimentally. As a result, the natural frequency of the vibration system with the present small size could be evaluated by conventional Newtonian dynamics, the influence of airflow damping was evaluated to be small compared with other factors, and the influence of material damping was estimated to be also small. A traveling wave along the micro spring due to distributed mass of spring was often observed in the experiment. The friction damping was given by applying voltage to a small stick attached to the mass of vibration system, but it could not be controlled by the applied electric field strength.

研究分野：機械力学

キーワード：機械力学・制御 制御機器 微小振動系 可変減衰器 界面電界現象

1. 研究開始当初の背景

この10年間、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されてきた。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、また平成23年の第4期科学技術基本計画でもナノテクノロジーを含む領域横断的な科学技術の強化を謳っている。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っている。さらに平成25年の産業競争力会議の成長戦略素案ではイノベーション戦略の抜本的強化をとりあげ、技術革新の重要性を示している。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。

申請代表者の専門分野は機械力学であるが、従来からニュートン力学によるモデル化の限界に興味をもっていた。特に近年、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と考えている。この分野は特に動力学に関しては全く手をつけられていない。さらに申請代表者はこれまでに電気粘性や磁気粘性に関する研究を進め、界面での電界現象の実験的検討も行ってきた。そこで、技術革新の将来の核のひとつになると考えるマイクロマシンの原型としての超小型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

本研究では、線径15ミクロン、直径が80~100ミクロンのコイルばねと質量による1自由度振動系を実験的に構築し、この微小振動系に界面電界現象を利用した可変減衰を作用させて振動抑制できることを実験的に示すことを目的としている。マイクロマシンは研究レベルで積極的に開発が試みられているが、動力学を考慮した研究はほとんどない。そこで、本研究では近い将来に稼働することが予想されるマイクロマシンを想定して、振動が発生した場合にも円滑な稼働を保證する目的で、付与する減衰の可変性に着目した。複数部品からなるマイクロマシンの減衰器を製作することは困難であるので、できるだけ簡素な構造で減衰を可変にすることが求められる。そのために界面電界現象を利用した可変減衰要素の開発を行い、動的特性を同定さらには振動振幅を抑制することを提案したい。

3. 研究の方法

3.1 微小ばね・質量系の振動実験

まず、図1に示すようなばねと質量の2要素からなる微小な1自由度振動系を構成して振動実験を実施する。非減衰振動系は慣性力と復元力をモデル化した2階の微分方程式で表現することができ、手元で扱うことのでき

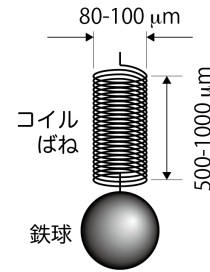


図1 微小1自由度振動系

る通常の大きさではこのモデルにより十分に理論的考察ができることが知られている。しかし、マイクロマシンという大きさで議論すると、この振動系をどこまで小さくすると、どれだけ微分方程式の予測値と異なるか、定量的な考察が求められる。理論値と実験値が異なる要因として、ばね質量、ばね材料内部の構造減衰、空気抵抗、静電気力等の影響が現時点で考えられるが、定量的な割合については不明な部分が多い。実際にこのような微小な振動系に対する実験は過去に実施された報告は申請者の研究以外はみあたらない。

本研究で提案する微小振動系を構成するばねの製作ができる企業は我が国でも限られており、申請者の知る限りにおいて、東京都大田区にある小松ばね工業(株)、横浜市にある(株)ファインパーツ、諏訪市にある(株)ミクロ発條くらいである。これらの企業に微小ばねの製作を依頼する。

振動中の質量の変位測定は質量の代表寸法が小さく、また質量自体も微量量であるために、通常の変位計や加速度計を用いた方法では振動対象を計測できない。そこで、申請代表者が所有する顕微鏡と高速度カメラの機能を持ち合わせている「ハイスピードマイクロスコープ」を利用する。得られた動画を1枚ずつ解析することで一定時間ごとの振動変位を同定する。解像度にも依存するが、160ドット四方の映像ならば8万フレーム/秒の録画が可能である。これらの実験結果を理論値と照らし合わせて、振動系を物理的に小さくした際の実験値と理論値の整合性について検討を行う。

3.2 可変減衰要素の開発

流体に高電圧を加えることによって流体の粘度が変化する現象は1939年にAndrade等によりNature誌に公表された。これは流体と固体の界面での電解現象として理解されており、固体表面の流体中に電気二重層が形成されて、その影響により粘度が変化することが示されている。その後、電気粘性流体の研究が開始され、半導体の微粒子を一様流体中に分散させて外部から電場を加えることで粒子の凝集が発生して、結果的には見かけ上の粘度が変化する事が示された。固体面同士で電界を加える際には導体のままでは電流が流れてしまい、実際に力として取り出すことができない。そのために半導体

で表面を覆うことによって静電気力を利用することが可能となる．この静電気力がもととなる摩擦力を減衰として用いるというのが本申請での提案である．

図2に示すように、半導体膜で被覆された質量に対して半導体で製作された微小なピンを押しつける．質量はコイルばねと結合されているので、コイルばねの固定端をアースにとる．一方で微小なピンには支持部を通して電圧を加え、接触部に電場を発生させることで摩擦抵抗力を生み出す．摩擦減衰力の直接的測定は接触点が極めて小さいために困難なので、質量の変位に関する時間履歴から摩擦減衰力を推定する予定である．構成は単純であるが、制振の対象となるものが小さいために構成は単純なものほど利用価値が高いと考えている．

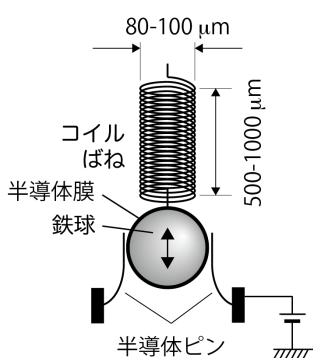


図2 減衰要素を付加した1自由度振動系

4. 研究成果

4.1 実験系の構成

微小ばねを対象とした自由振動実験装置の概要を図3に示す．極めて小型の振動系では、自由振動に必要な初期変位を与えることが難しい．また、自由振動の変位を測定するのにレーザ変位計等の通常の変位計を使用することができない．そこで、本実験装置では細胞生物学の実験に使用されるマニピュレータの先端に取り付けたマイクロピンセットを操作し、これらを操作することで振動系に初期変位を与えた．また質量の振動変位の測定は顕微鏡レンズに接続できる高速度カメラを用いて映像を取得し、その映像から振幅を推定した．ここで利用した高速度カメラ

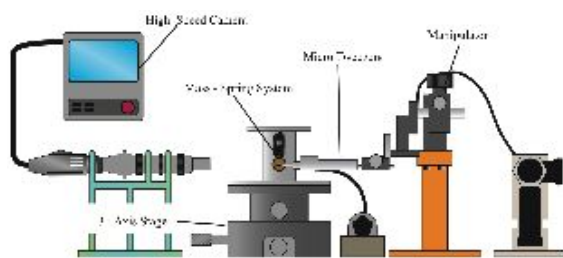


図3 実験装置の概要

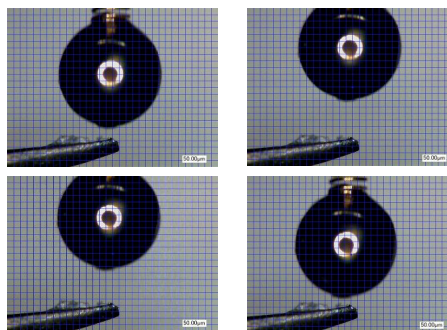


図4 ハイスピードカメラの画像例

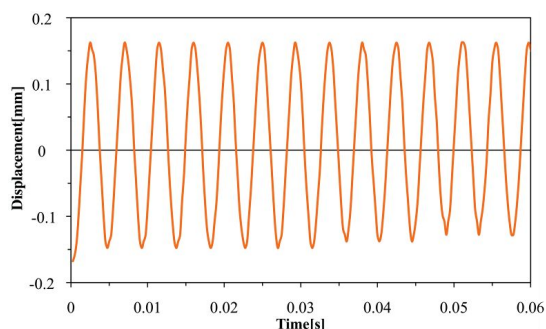


図5 自由振動曲線

は 160×80 ピクセルの画像ならば、 $80,000$ fps の速度で映像を取得できる．実験には振動系の固有振動数によって 640×480 ピクセルにおいて $4,000$ fps、および 640×240 ピクセルにおいて $8,000$ fps を使用した．

4.2 自由振動実験

質量 2.1mg (直径 0.8mm の鋼球) を用いて自由振動実験を行ったときの、取得した映像の一例を図4に示している．1周期の $1/4$ ほどの映像を示しているが、質量が周期的に上下動している様子がわかる．これらの画像から質量の変位を読み取り、時間軸を横軸にとって表した自由振動曲線の一例を図5に示している．図から予想ができるように、減衰力は極めて小さい．

4.3 減衰に関する考察

ばね・質量系からなる振動系の減衰要因としては主として、

- (1) 空気抵抗
- (2) 線材の材料減衰
- (3) 座巻のために生じる減衰効果

が考えられるので、まず、質量およびばねの運動に対する空気抵抗の大きさを確認するために、振動系を真空チャンバーの中に入れて 7.09kPa まで真空度を落として実験を行った．大気圧下での実験結果と比較したところ、ほとんど減衰特性には影響を与えないことがわかった．今回の実験系では、ばねの形状から座巻の影響は無視できると考えているので、次に、線材の材料減衰に関する考察を行った．

表1に示すような、ばね線材の体積が異なる、3種類のばねを用意した．端部にそれぞれ1巻きずつ座巻を有する圧縮コイルばねと

表 1 ばねの諸元

	ばね 1	ばね 2	ばね 3
直径 mm	0.4	0.3	0.2
線径 mm	0.02		
自然長 mm	1.0		
巻き数	18		
材質	SWP-A		

して設計・製作されたものを，本研究では引張コイルばねとして用いている．

ばねの特性としてばね定数を知る必要がある．そのために，電子天びんを用いて，鉛直方向に可動なステージを操作することで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．

図 6 は，ばね材として異なる体積のばね 1～ばね 3 を用いた振動系を対象とした実験結果である．ばねの体積と減衰比の関係を示している．減衰に対する空気抵抗の影響を減らすために，いずれも 7.09kPa の条件下で実験を行った．コイルばね自体の体積が小さくなるにつれて，ばね材に含まれる結晶や転移の数も少なくなるため，減衰も小さくなると考えていたが，得られた結果は体積が最小のばね 3 の減衰比が最も大きくなった．

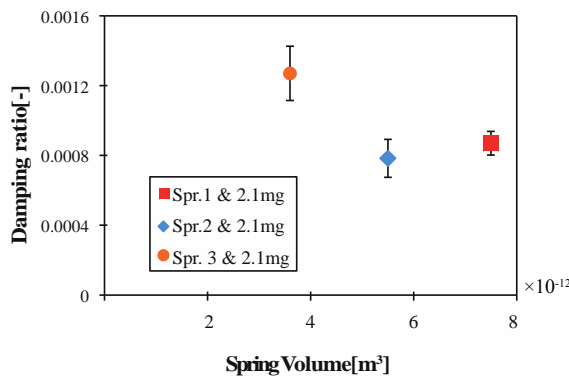


図 6 推定された減衰比

この実験結果の解釈は難しいが，外径が最も小さいばねであったため，固定に使用した接着剤がばね内部に多く侵入してコイル間隙が狭まり，振動時に互いに摩擦を生じたことがひとつの原因であると考えている．ばねに生じる初期変位によるひずみの影響も大きいと考えられるが，それも含めて今後の検討事項としたい．

さらに，可変減衰要素について検討した．当初の目的では，導体に半導体の膜をつけて外部から電圧を加えることで，界面に作用する電気的な引力を利用して摩擦減衰を制御することを考えた．しかし，半導体膜の選定に関して十分ではなく，結果として電気的な引力を変化させることができなかった．原因

としてはいくつか考えられるが，最も大きな原因は押しつける摩擦棒の形状であった．初期の押しつけ荷重を規定する必要があるが，そのばらつきを抑制できず，従って押しつけ荷重の制御もできなかったことが大きな原因である．今後，様々な形状を用いて，しかも押しつけ荷重を任意に設定できる機構を開発する必要がある．

5．主要な論文等

(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 3 件)

(1)青木貴弘，森下信：微小ばね-質量系の減衰に関する考察，日本機械学会関東支部第 21 期総会講演会講演論文集 (2015-3) #10601.

(2)青木貴弘，森下信：微小なばね・質量系の減衰特性(実験的検討)，日本機械学会機械力学計測制御部門講演会講演論文集，No. 14-17 (2014-8) #307.

(3) Takahiro Aoki and Shin Morishita: Vibration Properties of Micron-sized Mass-Spring System, Proceedings of Joint Symposium among Sister Universities in Mechanical Engineering (2014-8) pp.185-188.

〔学会発表〕(計 3 件)

(1)青木貴弘：日本機械学会関東支部第 21 期総会講演会(2015-3)

(2) 青木貴弘：日本機械学会機械力学計測制御部門講演会(2014-8)

(3)Takahiro Aoki: Joint Symposium among Sister Universities in Mechanical Engineering (2014-8)

〔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・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