

液体を利用した広帯域振動発電手法に関する研究

47196712 望月 賢輝

指導教員 伊藤 寿浩 教授

A wideband energy harvester is required for equipment whose vibration frequency fluctuates. In this paper, a structure that widens the frequency characteristics by using a liquid has been studied. The contribution of liquids to widening the band was investigated by Fluid-Structural Interaction simulation. The prototype structure in which a cantilever (length=17.26 mm, width=18.26 mm, and thickness=0.2 mm) is placed in a structure containing a liquid (viscosity=50 mPa*s and specific gravity=0.96) between two soft thin membranes (thickness=0.1 mm) showed wideband frequency characteristics. A simulation using 2 mass model was performed to further increase the output. The simulation showed that reducing the friction with the wall by reducing the liquid volume would result in 150% output.

Key words: energy harvesting, broadband, piezoelectric, fluid structure interaction

1 緒言

近年、ワイヤレスセンサによる機械のモニタリングが提案されており、機械の故障検知・メンテナンスコストの低減に有効であるとして注目を集めている。一方、危険な場所やアクセスしづらい場所にセンサを設置する場合、センサへの電力供給が大きな課題となる。そこでセンサへの電源供給手法として、周囲の環境から電力を得る、エナジーハーベスティングの研究が盛んに行われている。発電手法には振動発電、光発電、熱発電、電磁波発電等があるが、振動が発生する機械に対しては振動発電が適している。機械の振動周波数が一定の場合は、共振周波数を合わせて品質係数 Q 値を高めることで、高出力で安定した電源供給が可能である。一方、振動の周波数が低く、かつ周波数が変動するポンプ等の機械では安定して電力を供給することができないため、低周波数・広帯域の振動に対応した発電手法が必要とされている。広帯域な発電特性を実現するため、複数の発電素子を用いる手法¹⁾や、磁石等による非線形ばねを用いる手法²⁾等が研究されているが、更なる出力や帯域幅の増加を求めて様々な手法が開発されている。

デバイスの広帯域化を実現した例として、カンチレバーと液体を組み合わせて低周波の振動を効率良く得られるセンサを実現した研究があり³⁾、応用して振動発電においても流体の粘性の効果による広帯域化が、実験的に示されている⁴⁾。先行研究における振動発電構造を Fig. 1 に示す。構造の上下に薄膜を固定し、中央部に圧電片持ち梁を配置している。内部にシリコンオイルを封止し、流体の粘性抵抗により広帯域を実現している。しかし、流体が広帯域化に寄与する原理が十分に分かっておらず、設計により出力を増加するためには流体が振動時に及ぼす影響を明らかにする必要がある。

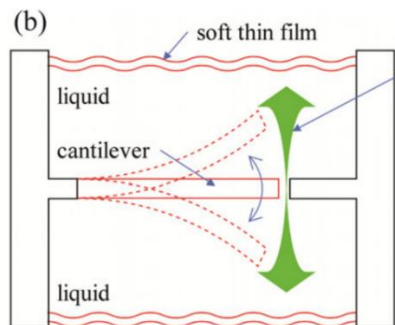


Fig. 1 Energy harvester structure using fluid [2].

また、この手法は、2 質点系によるモデル化が行われており、液体質量を変化させた場合の特性を表現が可能である。一方、モデルの流体に関連するパラメータについてはフィッティングにより求めており、このモデルを構造検討に用いることは行われていない。

以上より、本研究の目的を以下の通りとした。

- 液体を薄膜で封止した構造における、液体の広帯域化への寄与を調査する。
- デバイスを試作し、設計パラメータによる影響を実験的に調査する。
- 2 質点系モデルを用いて出力を増加する構造を検討する。

2 液体の広帯域化への寄与の調査

2.1 広帯域化の原理

構造による振動において、振動周波数帯を増加するための手法として、ゴム等の超弾性体を用いるものがある。超弾性体の振動特性は Duffing 方程式を解くことによって得られ、広帯域の特性を持つ。

一方、広帯域の振動特性を圧電材料に与える場合、構造が複雑になりやすいことや摺動部、接触部が発生しやすいことが挙げられる。特に磁力を用いる場合は外部に磁石を設置する必要があり、構造が複雑化しやすい。また、超弾性材料を用いる場合には接触や磁力による振動の伝達が必要となり、同様に構造が複雑化する。圧電セラミクスでは接触時や外乱時の摩擦、衝撃によって脆性破壊が起きやすいことが課題となっており、超弾性材料から圧電材料への効率的な伝達と、衝撃等の外乱に対して破壊が起きないように、構造の簡素化を両立する必要がある。

液体が構造と接触して流れる場合、構造との間に粘性抵抗による摩擦が働く。粘性抵抗による摩擦は流体と構造の相対速度によって決まる。振動の伝達を流体によって行うことで、構造による伝達と比較して簡易な構造になり、同時に摩擦や衝撃による接触が発生しないため、破壊が起きにくい利点がある。

2.2 シミュレーションによる検証

液体を薄膜で封止したカンチレバー構造は、実験的に広帯域化が示されている[2]。本研究では乱流に適した $k-\epsilon$ モデルを用いた有限要素法による連成解析を行う。

圧電素子には PVDF を用いたセンサ(TE Connectivity 社 LDT1-028K)を用いた。液体は水を用い、薄膜には 15 μm の TPU フィルム(大倉工業株式会社 シルクロン)を用いた。液体を 3.3 g 封止したデバイスについて各周波

数で 200 ミリ秒加振するシミュレーションを行った。30 Hz と 100 Hz でそれぞれ加振を開始して 200 ミリ秒シミュレーションした際の、カンチレバー先端の変位を Fig. 2 (a)に示す。各周波数で、100 ミリ秒程度で振動が収束する。加振周波数に対する出力電力を Fig. 2 (b)に示す。液体を封止した構造では、出力が最大となる周波数は 50 Hz となり、その時の出力は 140.7 nW となった。また、半値幅は 18 Hz, 品質係数 Q 値は 2.78 となった。比較のために片持ち梁の先端に錘を付加することで共振周波数を 50 Hz まで低下させた場合は半値幅が 10 Hz となり、 Q 値は 6.25 となった。錘を付けて共振周波数を低下した場合と比べて半値幅は約 2 倍に増加した。

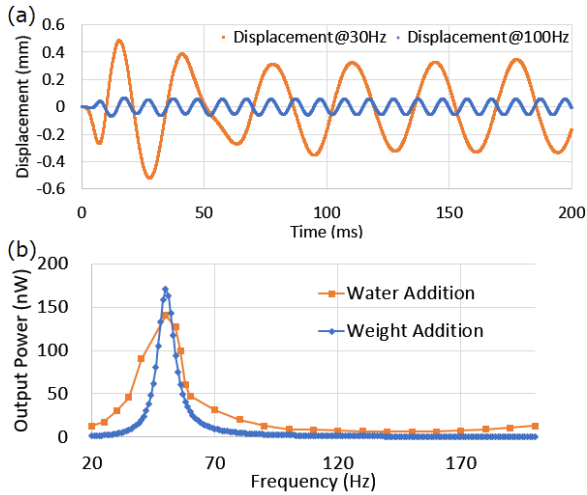


Fig. 2 (a) Displacement of cantilever tip at 30 Hz and at 100 Hz. (b) Frequency characteristics of electric power.

液体を用いることの有効性を確認するために、薄膜と片持ち梁の振動の関係について調査する。薄膜と片持ち梁それぞれで面積が異なるため、変位の面積分を取ることで比較を行う。出力が最大となった 50 Hz で加振した際のシミュレーションでの結果を Fig. 3 に示す。

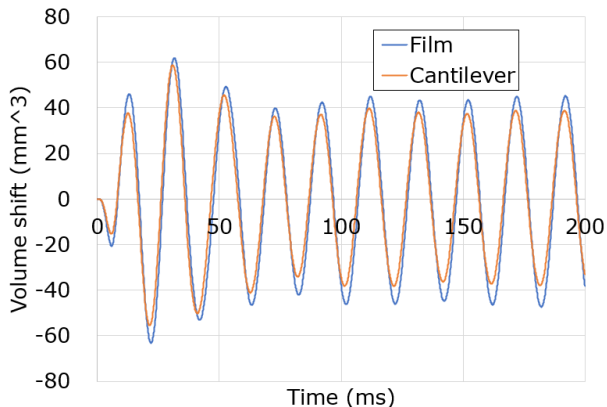


Fig. 3 Volume shift of film and cantilever

振動の大きさについては薄膜の変位が 44.6 mm^3 に対して片持ち梁は 38.2 mm^3 と 85.6% の変位の振動が発生していることが分かる。一方、比較のために空気を封止した場合のシミュレーションを行ったところ、共振点において 47.5% の振動が片持ち梁で発生した。空気を封止した場合と比較して、液体を封止することで約 1.8 倍の効率で振動が伝達されており、液体を封止することで、薄膜の振動が効率よく片持ち梁に伝達されることが分かった。

3 デバイスの試作と評価

3.1 構造の作成方法

圧電素子には PVDF を用いたセンサ (LDT1-028K, TE Connectivity) を用いた。薄膜には $15\sim 100 \mu\text{m}$ の PU フィルムを用いた。液体は $1\sim 1000 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ の粘度の液体を用い、 $1 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ の液体には水を、 $50\sim 1000 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ の液体にはシリコンオイル (KF-96, 信越シリコン) を用いた。

流体の封止方法を Fig. 4 に示す。液体を薄膜で封止する際に、管内部に気泡が封止されるのを防ぐために、流体の粘度により異なる封止方法を用いた。低粘度の液体を封止する際には、液体で満たした空間で圧電材料と薄膜を固定することで液体を内部に封止する。高粘度の液体を封止する際には、上部からスポイトを用いて管内部に液体を満たし、上方向から薄膜を固定することで液体を内部に封止する。作成したデバイスの例を Fig. 5 に示す。

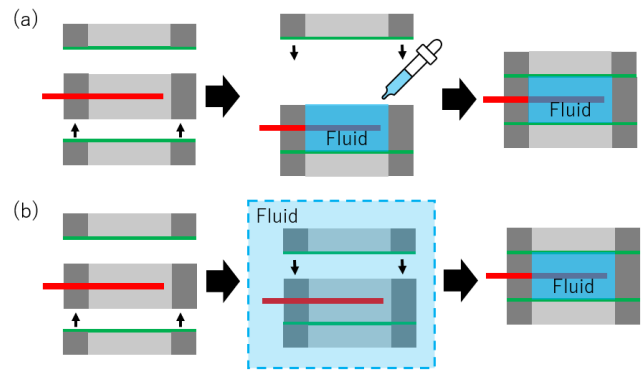


Fig. 4 Device fabrication procedure

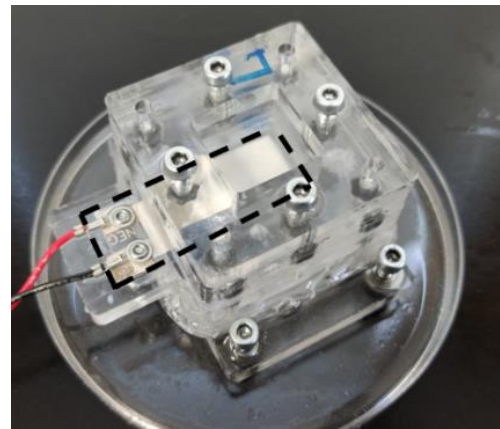


Fig. 5 Example of prototype device

3.2 電力の測定方法

加速度は 10 m/s^2 とし、共振周波数が含まれる $20\sim 200 \text{ Hz}$ の範囲を 1 Hz 刻みで測定した。各加振周波数でオシロスコープを介して PC に接続された加速度計を用いて校正しながら測定を行った。測定系は LabVIEW で制御した。各周波数でインピーダンスマッチングを行い、ボルテージフォロアを介することで電圧を補償して電力を測定した。

3.3 測定結果

デバイスを試作し、加振試験によって特性を調査した。シミュレーションを行った 3.3 g の液体を封止したデバイスに加え、4 段階の液体質量のデバイスを作製した。測定結果の波形について、広帯域化の指標となる半値幅と最大出力の関係を Fig. 6 に示す。ハーベスタ内の液体の質量

の増加に伴い、半値幅が広がると同時に最大出力が増加する。錘の付加によって共振周波数を低下させると品質係数は増加するが、本手法では共振周波数を低下させると品質係数が低下する。これは、液体体積の増加により内部減衰が大きくなったことが原因として考えられる。

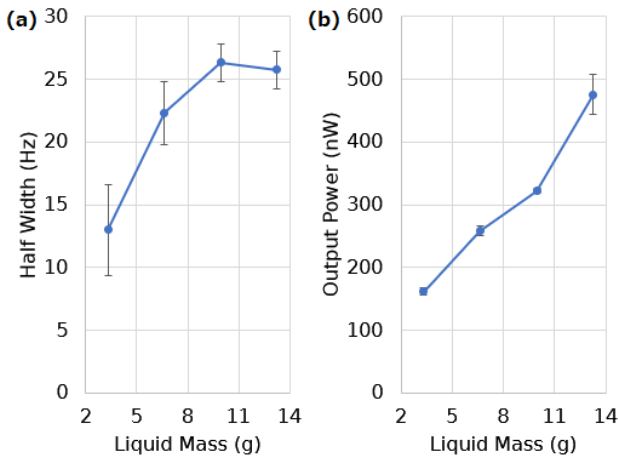


Fig. 6 Changes in output characteristics when the fluid mass is changed.

半値幅と薄膜のばね定数の関係を表したグラフは上に凸である形状を示す。半値幅とばね定数の関係について、同程度の減衰が生じる場合には、共振周波数が増加し、半値幅は増加する。一方、流体による粘性抵抗は流体の流れによって異なり、変位がある程度大きい場合は速度の2乗に比例した抵抗が働く。従って、アクリル板で封止した場合には流体の移動がほとんど起こらず、粘性抵抗が小さくなるため、半値幅が小さくなったと考えられる。また、最大出力と薄膜のばね定数の関係については、薄膜のばね定数が大きくなると出力は減少することが分かる。

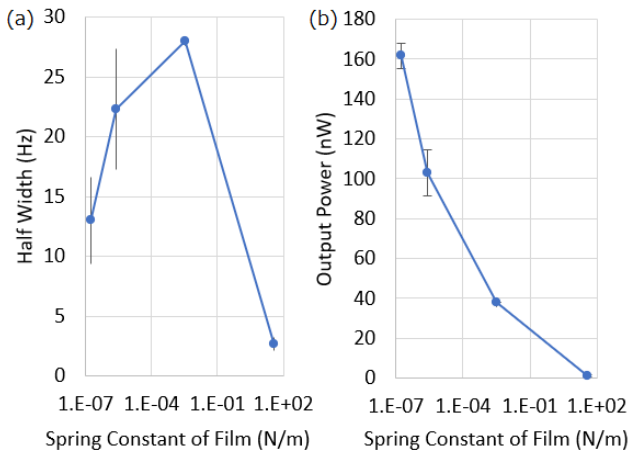


Fig. 7 Changes in output characteristics when the film spring constant is changed.

4 2 質点系モデルによるシミュレーション

4.1 モデルの作成

流体を薄膜で封止し、内部に圧電片持ち梁を配置した振動発電の構造は先行研究により 2 質点系モデルで簡略化が行われている。2 質点系モデルを使用し、流体構造連成解析によるシミュレーションによって算出したパラメー

タを用いて出力の推定を行う。2 質点系モデルで表した各係数と構造の対応を図に示す。

流体に関連する係数である c_l や c_c は実験値や物性等を用いて解析的に求めることが難しい。そこで、本研究では c_l と c_c を、有限要素法を用いた 3 次元シミュレーションを行うことによって求める。

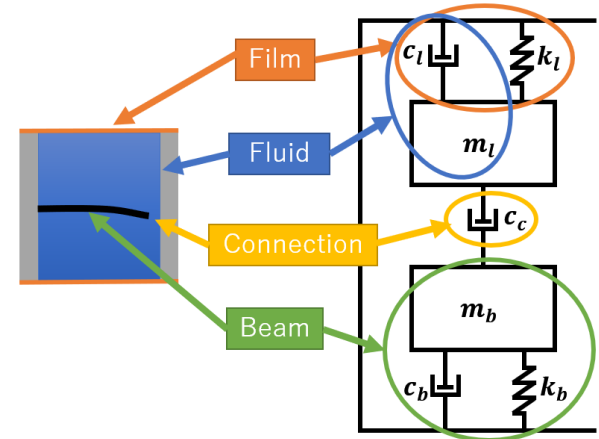


Fig. 8 Solid model of the structure using fluid.

4.2 シミュレーション結果

c_l は流体と管体の間に発生する抵抗力である。片持ち梁を含まない管体について、流体に荷重をかけた定常解析を行った。流体と構造が接触する壁面では流体速度は 0 m/s になっており、構造の中央部分で最も流速が大きくなる。粘度のパラメトリック解析のシミュレーション結果の、流速と荷重の関係を Fig. 9 に示す。それぞれの粘度において、流速が低い領域では流体粘度に比例した摩擦力が働いている。また、同時に粘度に比例した摩擦力が働いている。一方、流速が大きくなると流速の2乗に比例した力が大きくなると同時に粘度による影響が小さくなっている。

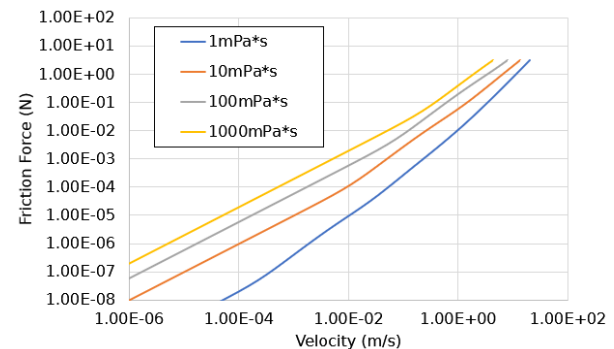


Fig. 9 Simulation results of fluid velocity and frictional force when the liquid viscosity is changed.

求めた各係数を用いて Simulink で作成したブロック線図を用いてシミュレーションを行う。加振加速度は 10 m/s² とし、共振周波数が含まれる 20~300 Hz の範囲を 1 Hz 刻みでシミュレーションを行う。加振シミュレーション結果の周波数応答を Fig. 10 に示す。粘度が上昇するにしたがって流体の変位に対する片持ち梁の変位がより近づき、変位が伝達されている。一方、粘度の上昇に従って流体部分のエネルギー損失が大きくなり、流体の振動が抑制されている。

次に流体粘度を変化させた場合の、流体部分の振動に対する片持ち梁の振動の割合を Fig. 11 に示す。低粘度の流体では、低周波数の振動において振動の割合が小さくなる。

一方、高粘度の流体では 20~300 Hz の範囲でほぼ同じ振動振幅で振動が発生する。

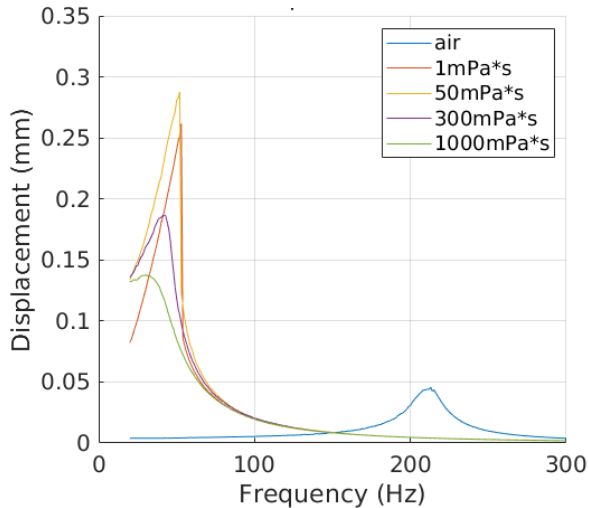


Fig. 10 Simulation result of frequency response of cantilever displacement.

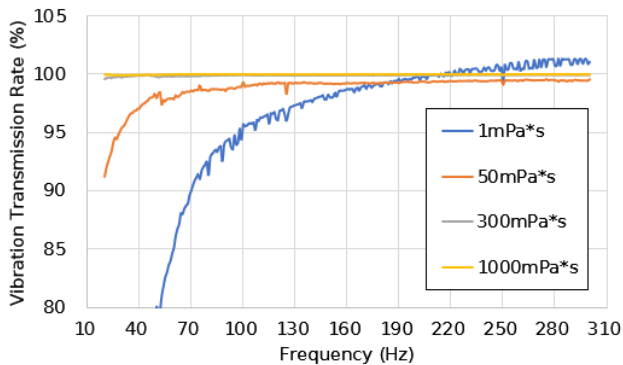


Fig. 11 Simulation results of the vibration amplitude of the fluid / the vibration amplitude of the cantilever where the fluid viscosity is changed.

実験で用いた寸法について、流体の質量を錘によって付加したシミュレーション結果を Table 1 に示す。加振時に片持ち梁が薄膜に接触しない範囲で流体を減少させた。流体質量は 1.3 g まで減少することが可能であった。

加振時の最大変位はピーク時で約 1.5 倍に増加する一方、半値幅はほとんど変化せず、広い帯域でより大きい変位を得ることが可能である。

Table 1 Changes in output characteristics when the liquid mass is reduced.

	Resonance Frequency	Half Width	Maximum Displacement
Original liquid mass	42 Hz	14 Hz	0.53 mm
Low liquid mass	43 Hz	16 Hz	0.80 mm

5 結言

本研究では、広帯域な周波数特性を持つ振動発電を行うために、液体を薄膜で封止した構造について研究を行った。得られた結論は以下の通りである。

液体を薄膜で封止した構造における、液体の広帯域化への寄与を調査した。

●ゴム薄膜を用いることで広帯域な周波数特性をもつ振動を得て、流体によって圧電材料に伝達することで、振動特性を広帯域化している。

●内部の封止媒質は片持ち梁への伝達効率に影響しており、粘性が増加するに従って液体の振動の片持ち梁への伝達率が増加する。内部に粘度 1 mPa*s の流体を封止した場合には、内部に空気を封止した場合と比較して約 1.8 倍の伝達効率となった。

デバイスの試作・評価と、設計パラメータによる影響の調査を行い、以下の結果が得られた。

●試作したデバイスで 10 m/s² の加振条件で出力を測定したところ最大出力 0.5 μW、半値幅 26 Hz の出力が得られた。

●両端の薄膜のばね定数の減少と液体質量の増加に伴い、共振周波数が減少して振動振幅が増加する。

2 質点系モデルを用い、出力を増加する方法を検討した。

●エネルギー損失を減らして薄膜の振動を伝達するためには、流体体積を減らして壁面との摩擦抵抗を減らすと同時に、高粘度の流体を用いることで伝達の効率を高めることが有効である。また、その場合には錘を薄膜に付加することで質量を増加することも有効である。

●流体を減らして内部摩擦を低減することにより、同じカンチレバー形状において最大変位が 1.5 倍に増加することが分かった。

本研究では広帯域な周波数特性を持つ振動発電を行うために、液体を薄膜で封止した構造について開発を行った。液体を薄膜で封止した構造の広帯域化の原理を調べ、設計時の物性や寸法が与える影響を調査した。一方、負荷を接続し出力電力を測定したところ未だ実用的な範囲にない。今後は各設計パラメータの最適化を行うことで出力を増加する必要がある。また、今後は MEMS のような小さいスケールでデバイスの作製を行うことが考えられるが、その場合には液体の封止方法について再検討する必要がある。

文献

- 1) Xingqiang Zhao, Zhengguo Shang, Guoxi Luo and Licheng Deng: "A vibration energy harvester using AlN piezoelectric cantilever array", Microelectronic Engineering, Volume 142, pp. 47-51(2015)
- 2) Arman Hajati and Sang-Gook Kim: "Ultra-wide bandwidth piezoelectric energy harvesting", Applied Physics Letters, Volume 99, Issue 8(2011)
- 3) Yusuke Takei, Ryo Aoki, Tomonori Kaneko, Kiyoshi Matsumoto and Isao Shimoyama: "MEMS Heart Sound Sensor", IEEJ Transactions on Sensors and Micromachines, Vol.135, No.6 pp.199-203(2015)
- 4) Shinichi Ryoki, Michitaka Yamamoto, Kenki Mochizuki, Seiichi Takamatsu, and Toshihiro Itoh: "Cantilever structure placed in liquid sandwiched between soft-thin membranes to realize wide bandwidth harvester", Applied Physics Letters, Volume 115, Issue 18(2019)