

東京大学大学院新領域創成科学研究科
人間環境学専攻

2020 年度

修士論文

液体を利用した
広帯域振動発電手法に関する研究

2021 年 2 月 10 日提出

指導教員 伊藤 寿浩 教授 

学籍番号 47196712

望月 賢輝

目次

第1章 序論.....	1
1.1 はじめに.....	2
1.2 振動発電技術の概要.....	4
1.3 振動発電の広帯域化技術.....	7
1.4 流体を用いた広帯域振動発電手法.....	9
1.5 研究の目的.....	12
1.6 本論文の構成.....	13
第2章 液体の広帯域化への寄与の調査.....	15
2.1 はじめに.....	16
2.2 液体を用いた構造の原理.....	17
2.2.1 超弾性薄膜による広帯域化.....	17
2.2.2 流体による振動の伝達.....	18
2.3 シミュレーションによる動作の検証.....	19
2.3.1 有限要素法を用いた3次元モデルによるシミュレーション.....	19
2.3.2 シミュレーション結果.....	21
2.4 おわりに.....	28
第3章 デバイスの試作と評価.....	29
3.1 はじめに.....	30
3.2 デバイスの製作方法.....	31
3.3 発電機構の評価方法.....	34
3.3.1 加振実験.....	34
3.3.2 インピーダンス整合.....	35
3.4 流体を用いた手法の出力特性の調査.....	37
3.4.1 出力の周波数特性の調査(錘付加時の周波数特性との比較).....	37
3.4.2 インピーダンス整合と出力電力の測定.....	38
3.5 設計パラメータの出力への影響の調査.....	40

3.5.1 液体質量による影響	40
3.5.2 液体粘度による影響	42
3.5.3 薄膜による影響	44
3.6 おわりに	46
第4章 2 質点系モデルによるシミュレーション	47
4.1 はじめに	48
4.2 質点系によるモデルの作製	49
4.2.1 2 質点系モデルのシミュレーション方法	49
4.2.2 各係数のシミュレーションによる算出	50
4.2.3 Simulink によるモデルの作製	51
4.3 シミュレーション結果	53
4.3.1 各係数のシミュレーション結果	53
4.3.2 加振シミュレーション結果	58
4.3.3 出力増加方法の検討	64
4.4 おわりに	66
第5章 結論	67
5.1 結論	68
5.2 今後の展望	69
謝辞	71
参考文献	73

第1章 序論

1.1 はじめに.....	2
1.2 振動発電技術の概要.....	4
1.3 振動発電の広帯域化技術.....	7
1.4 流体を用いた広帯域振動発電手法.....	9
1.5 研究の目的.....	12
1.6 本論文の構成.....	13

1.1 はじめに

近年，高齢化とともに労働人口が減少している日本では，製造業において自動化が推し進められている．それに伴い，各生産設備の故障は生産ラインの停止に繋がり，工場全体に与える損失が大きくなっているため，故障が起きる前に設備診断，修理を行い，可能な限り故障の発生を抑える予防保全が行われている．その中でも，従来行われていた定期的に設備の保全を行う時間計画保全に代わり，設備の状況をモニタリングし，その状況に合わせて保全を行う状態監視保全がより多く行われるようになってきている [1]．統計的な手法や機械学習が発達している現在，センサによって得られたデータから故障検知を行う精度は日々向上しており，振動や温度から音，磁場に至るまで生産設備の様々なセンシングの需要が高まり，モニタリングデバイスに関する研究が広く行われている．

生産設備において，モータは最も多く用いられている機器の一つとして，産業機械の制御機構や搬送，送風等の重要な箇所で使われ，故障時の工場に与える損失も大きくモニタリングの需要は高い．モータのモニタリングでは，温度 [2]や電流 [2, 3]，音 [4]を用いたものもあるが，加速度計を用いて測定した振動のデータを用いる手法が多く取られてきた．振動データはモータに用いられているベアリングの故障やアンバランス，ミスアライメントを顕著に表現し，ウェーブレット変換や STFT を用いて信号を時間周波数領域に展開する手法 [5]や，近年ではニューラルネットワークやファジィ理論を用いた手法 [3, 6]により故障を検知できることが知られている．また，振動のセンシングは電流のモニタリング等と比較して，デバイスの設置が簡易であるのも多く用いられている要因である．振動のモニタリングに用いられる振動データ測定・送信デバイスの例を図 1-1 に示す．

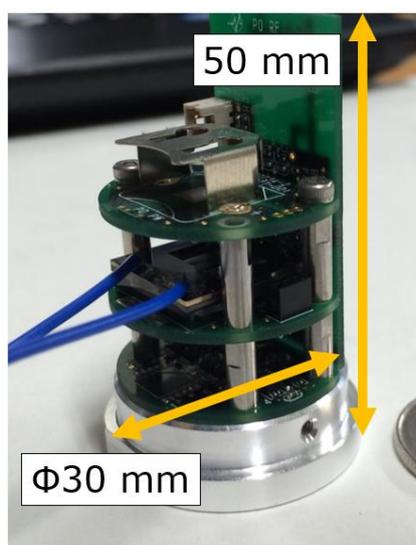


図 1-1 振動データ測定・送信デバイス．

一方，センシングデバイスを用いるにあたって，各デバイスへの電源の供給が大きな課題となっている．特に工場等で多くの生産設備に対してモニタリングを行う場合，ケーブルを用いて電源を供給するのはコスト，安全性の面で難しく，無線センサネットワーク(WSN: Wireless Sensor Network)が用いられることが多い．WSNを用いる場合，電源として電池を用いることもある [7]が，各生産設備に合わせたより長い期間の運用のために，太陽光発電 [8]や廃熱発電 [9]などの発電機構を各デバイスに付加することも多い．特に振動を発生する生産設備においては振動から電力を生み出す振動発電が，他手法に比べて安定して電力を得られるためよく用いられる．

本章では，振動センサデバイスの電源供給を担う振動発電技術について述べたうえで，振動発電の広帯域化技術について述べる．続いて，本研究の対象である液体を用いることで振動発電の広帯域化を行う手法について，現状と課題を整理し，最後に本論文の目的を述べる．

1.2 振動発電技術の概要

本節では振動モニタリングデバイスの電源として用いられる振動発電技術について述べる。振動の運動エネルギーを電気エネルギーに変換する手法として、WSN に用いられるものは大別して、圧電材料による圧電効果を用いたもの、磁石とコイルによる電磁誘導を用いたもの、エレクトレットを用いた静電誘導型のものの3つがある。

圧電効果を用いたものは、応力に応じて電圧が発生する圧電材料を用いてエネルギーを変換する手法である。圧電効果は材料に与える応力と分極の方向で分類され、双方向が平行である圧電縦効果(33モード)と垂直である圧電横効果(31モード)が振動発電では多く用いられる [10]。各圧電効果について図 1-2 に示す。

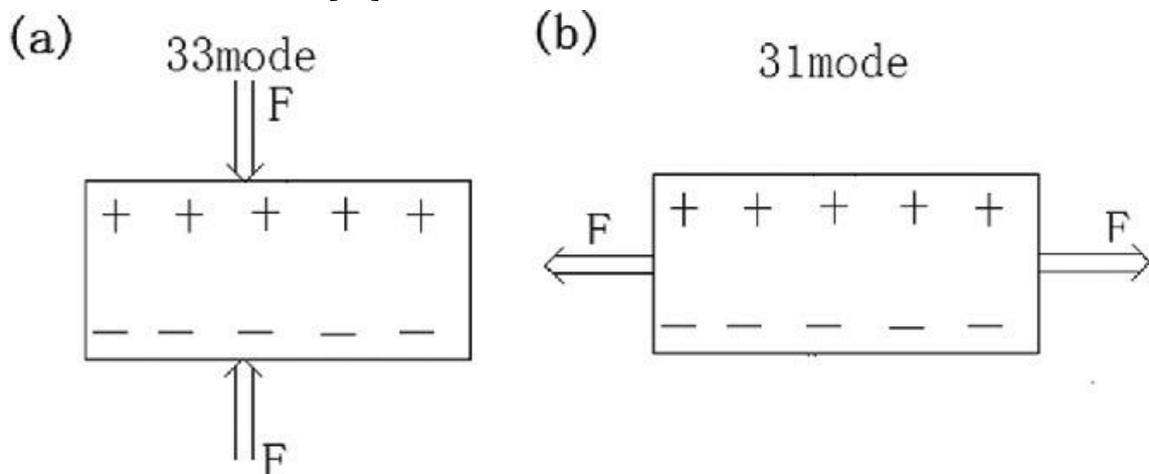


図 1-2 圧電縦効果(33モード)と圧電横効果(31モード) [10].

圧電縦効果を用いた発電手法の例として靴底に配置して発電を行う手法 [11]等があるが、応力集中による破壊が起きやすく、実用には課題が残る [12]。また、振動発電においてはその構造により共振周波数が高くなるとともに大きな変位を得ることが難しく、応用が限られる。

そこで、構造の一端を固定したカンチレバー構造の開発が行われている。カンチレバー構造は簡素な構造で振動を増幅することができ、センサやアクチュエータとして幅広い分野で用いられている [13, 14]。振動発電においても圧電横効果をカンチレバー構造によって利用したものは多く [15, 16]、さらに、圧電効果を用いるものに限らず他の手法でも同じ構造がよく用いられている。基本的なカンチレバー構造を図 1-3 に示す。構造の一端を固定し、さらに構造の共振周波数を調整するために、梁の先端に錘を付加して用いられることが多い。

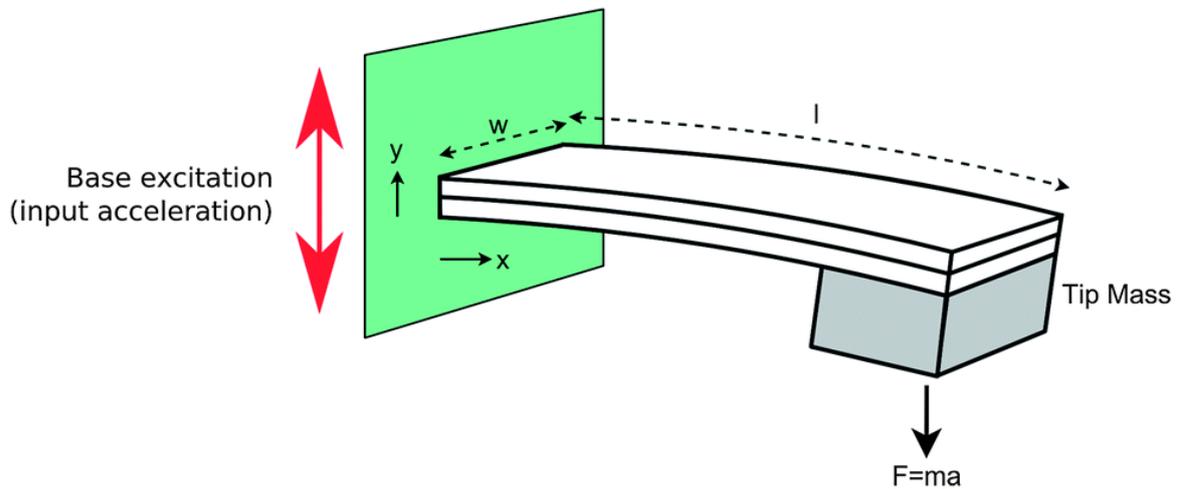


図 1-3 カンチレバー構造 [17].

カンチレバー構造は圧電縦効果を用いたものと対照的に、材料や寸法、先端に付加する錘によって容易に共振周波数を調整でき、大きな変位を得ることが可能である。この特性から、カンチレバー構造は後述する他手法でも頻繁に用いられる。圧電効果を用いた発電の特徴として、発電部に圧電材料を用いるため構造を簡単にすることが可能である。この点を生かして圧電材料の形状を工夫する研究 [18]や、異なる材料を組み合わせる研究 [19, 16]等により、発電の周波数特性の向上がなされている。また、出力について、他の手法と比較して発生する電圧が高いがインピーダンスが大きく電流を取り出すのが難しい。

電磁誘導を用いたものは、磁石とコイルの位置を変化させ、磁束の変動により電磁誘導を起こして発電する手法である。電磁誘導による発電原理を図 1-4 に示す。出力について、圧電材料を用いた手法や静電誘導を用いた手法と比較して発生電圧が小さくなる傾向があり、構造が複雑になりやすい。

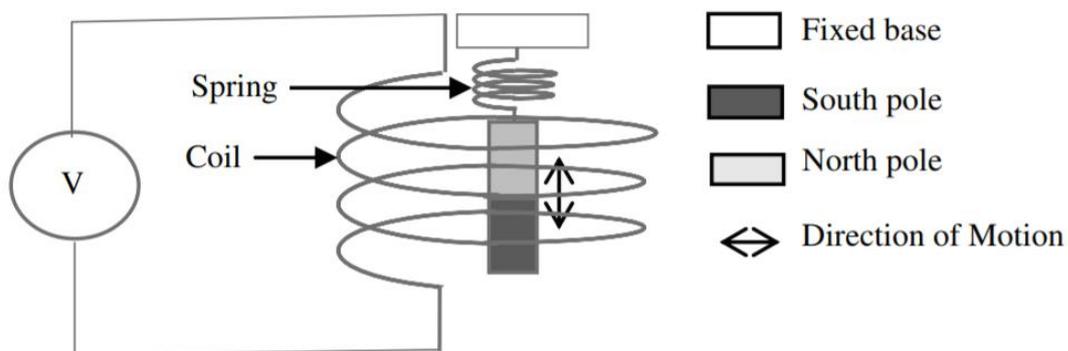


図 1-4 電磁誘導による発電原理 [20].

静電誘導を用いたものは、材料に電荷を保持させることで電界を発生するエレクトレットにより、発電を行う手法である。静電誘導による発電原理を図 1-5 に示す。エレクトレットにより形成される静電場によって対向電極に誘導電荷が生じる。エレクトレットと対向電極の配置等を変化させることで電流が発生する。水平方向、あるいは垂直方向にエレクトレットを振動させる方式や高誘電率の物体をエレクトレットと対向電極の間に挿入する方式がある。

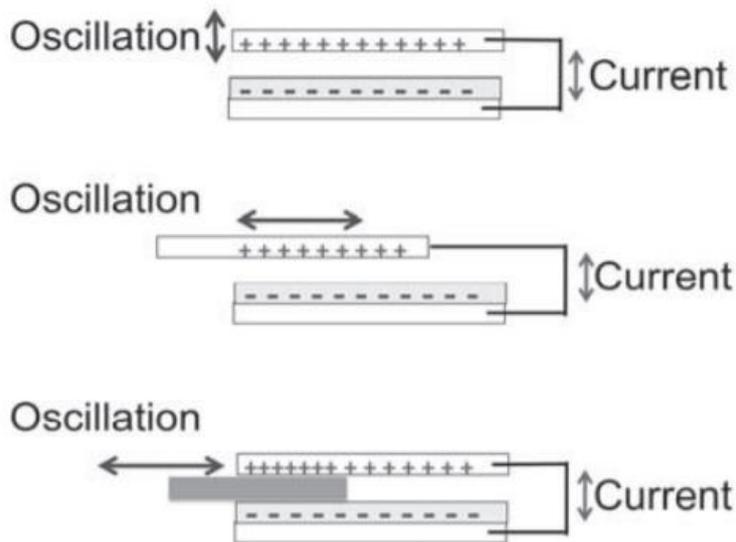


図 1-5 静電誘導を用いた発電原理 [21].

静電誘導を用いた構造はエレクトレットマイクロホンのようなセンサとして多く用いられている [22]. また、この手法は他の手法と比較して発生電圧が高いがインピーダンスが大きく電流を取り出すのが難しい。

圧電材料による圧電効果を用いたもの、磁石とコイルによる電磁誘導を用いたもの、エレクトレットを用いた静電誘導型のものそれぞれの利点を生かし、圧電効果と電磁誘導を組み合わせた研究 [23]の様に、複数の発電手法を用いたエネルギーハーベスタの研究も多く行われている。

1.3 振動発電の広帯域化技術

前節まで述べてきたように、様々な発電手法を用いて、振動に対してより大きな電力を得るための研究が行われている。振動源の周波数が一定の場合には、エネルギーハーベスタの共振を合わせることで大きな電力を得ることができ、圧電材料の改良 [24, 25] や、電力抽出回路 [26, 27] の効率化によって出力の改善が進んでいる。一方、大きな課題の一つは、エネルギーハーベスタがその共振周波数で励起された時以外は発電量が小さいことであり、応用する振動源の特性に合わせてエネルギーハーベスタの形状や錘を調整する必要がある。また、実際の応用の際には振動源の周波数がシフトすることもあり、その場合には発電量は著しく減少する。特に、ポンプ等の回転機械では、モータの回転速度の変化に起因する振動源の周波数の変動をあらかじめ考慮する必要がある。そのため、単一の励起周波数での出力の増加や変換効率、エネルギー出力密度等の改善のみではなく、幅広い周波数帯で振動発電を行う広帯域化技術の研究も多く行われている。広帯域化技術が必要とされるポンプの例を図 1-6 に示す。



図 1-6 地域熱供給システムのポンプ(TM-21FIIシリーズ).

基本的なカンチレバー構造において、広帯域化の指標となる品質係数 Q 値は、振動サイクルでの散逸エネルギーに対する蓄積エネルギーの比率として定義される。品質係数 Q は蓄えられている振動エネルギー E_{stored} と 1 周期で損失するエネルギー $E_{dissipated}$ を用いて式(1-1)で表される。

$$Q = 2\pi \frac{E_{stored}}{E_{dissipated}} \quad (1-1)$$

カンチレバー構造はバネマスダンパ系でモデル化することができ、品質係数は式から導ける。カンチレバーを加振した際の運動方程式は式(1-2)の通りとなる。 m は質量、 b は線形損失、 k はばね定数であり、入力を f_{drive} とする。

$$m\ddot{x} + b\dot{x} + kx = f_{drive} \quad (1-2)$$

この時、共振周波数 ω_0 は式(1-3)で表され、品質係数 Q は式(1-4)で表される。

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (1-3)$$

$$Q = \frac{m\omega_0}{b} = \frac{\sqrt{km}}{b} \quad (1-4)$$

従ってカンチレバーの品質係数 Q の向上は、線形損失 b を減らすか、質量 m 、または、ばね定数 k を増やすことで達成できる。この式より、ピーク時出力と半値幅はトレードオフの関係にあることが分かる。そこで、構造による工夫や材料特性による工夫によって振動発電の広帯域化と出力の増加を行う研究が広く行われている。

振動発電において広帯域化を行う手法は、大別して以下の2種類に分類できる。

a. 線形ばねを用いる手法

線形ばねを用いて広帯域化を実現する手法は、主に発電構造を複数結合する手法と、単一の発電構造を複数の共振モードが起きるように設定する手法がある。前者の代表的なものに共振周波数の異なるカンチレバーを複数並べたカンチレバーアレイがある [28, 29]。各共振において発電を行う帯域は狭いが、異なる共振周波数を持つ構造を複数接続することで発電を行う帯域を広げる手法であり、最適化についての研究も行われている [30, 29]。

後者の手法としては、カンチレバー上に複数の錘を付加した研究 [31] や、圧電カンチレバーをばねで接続した研究 [32] などが挙げられる。この手法は前者と比較して構造が簡易であるという利点がある。ヤング率の低い材質を用いることで複数の共振モードを結合し、より広い帯域を実現した研究例 [33] もある。

b. 非線形ばねを用いる手法

非線形ばねを用いることで広帯域を実現する手法である。主なものとして、磁石などによる双安定性/多安定性によって非線形性を実現したもの [34, 35, 36, 37] や、ストッパーなどの機械的な機構により振動子の振幅を制御することで非線形を実現したもの [38, 33] があり、それぞれ広帯域化が報告されている。一方、この手法では加振周波数に対して複数の安定動作が存在し、初期値によって定まる。また、大振幅で動作をしても外乱によって小振幅の動作に遷移することがあるため、ストッパーや磁力による非線形性を用いる場合では構造が複雑化することが課題として挙げられる。

また、振動によって得られた電力を、広帯域において効率よく取り出すための回路に関する研究も同様に行われている [39]。

1.4 流体を用いた広帯域振動発電手法

本研究が対象とする液体を薄膜で封止した構造は、流体を構造内部に封止することによって出力を増加したセンサに関する先行研究 [40]をもとに開発されている。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 [19]。構造の概要とその断面図を図 1-7 に示す。この構造は流体の粘性によって広帯域化を実現している。この構造を用いて、内部にシリコンオイルを封止することで、空気中において錘を用いて共振周波数を下げた場合と比較して、共振周波数である 100 Hz において、帯域幅が 450% 増加する結果を示した。

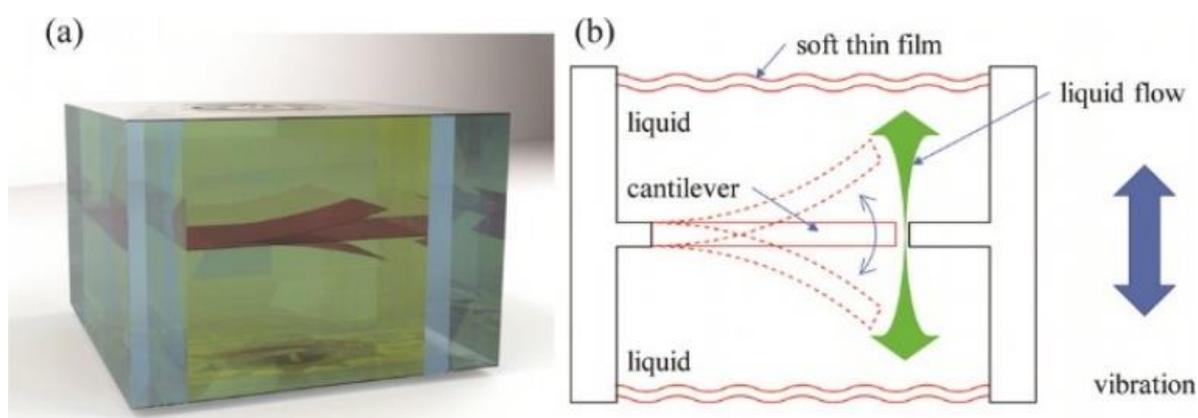


図 1-7 (a)流体を薄膜で封止した発電構造のイメージ図と(b)その断面図 [19].

振動発電においては、構造をモデル化することにより、出力を最適化する研究が多く行われている [41]。本手法は、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。モデルを図 1-8 に示す。このモデルでは、構造を流体質点 m_1 と片持ち梁質点 m_2 の 2 質点として簡略化している。また、流体質点と片持ち梁質点それぞれについて、バネ要素 k_1 及び k_3 による復元力と、ダンパ要素 c_1 及び c_2 による減衰力を持たせている。2 つの質点の間には流体と構造の間に発生する摩擦力 c_3 によって力が伝わる。

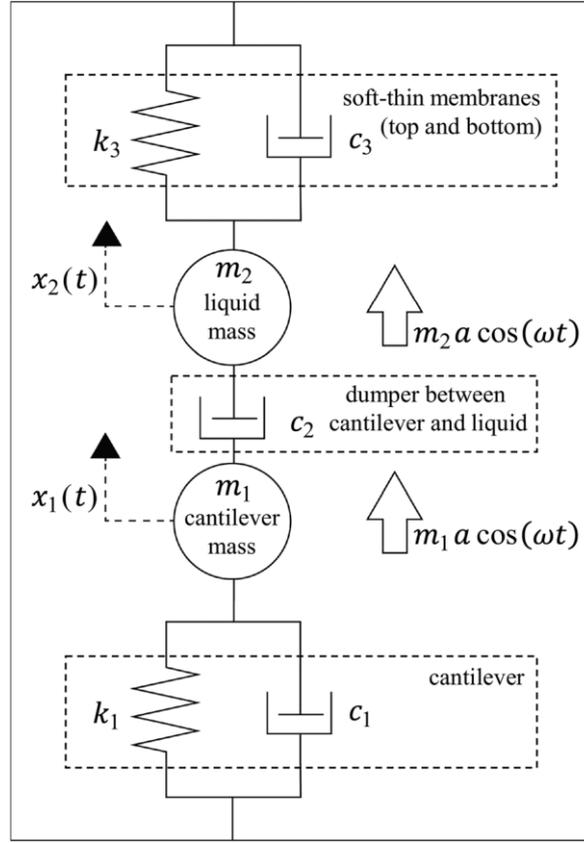


図 1-8 液体と薄膜を用いたハーベスタのモデル図 [19].

このモデルに加速度 $a \cos(\omega t)$ で強制振動を与えた際の出力は、運動方程式を解くことにより解析的に出力を計算することができる。このモデルの運動方程式は式(1-5)で与えられ、片持ち梁の振幅の周波数応答は式(1-6)及び(1-7)で与えられる。

$$\begin{cases} m_1 \ddot{x}_1 + c_1 \dot{x}_1 + k_1 x_1 + c_2 (\dot{x}_1 - \dot{x}_2) = m_1 a \cos(\omega t) \\ m_2 \ddot{x}_2 + c_2 (\dot{x}_2 - \dot{x}_1) + c_3 \dot{x}_2 + k_3 x_2 = m_2 a \cos(\omega t) \end{cases} \quad (1-5)$$

$$D_1(\omega) = \sqrt{a_1^2 + b_1^2} = a \sqrt{\frac{\gamma^2 + \delta^2}{\alpha^2 + \beta^2}} \quad (1-6)$$

$$\begin{cases} \alpha = (k_1 - m_1 \omega^2)(k_3 - m_2 \omega^2) - (c_1 c_2 + c_2 c_3 + c_3 c_1) \omega^2 \\ \beta = \{(k_1 - m_1 \omega^2)(c_2 + c_3) + (k_3 - m_2 \omega^2)(c_1 + c_2)\} \omega \\ \gamma = (k_3 - m_2 \omega^2) m_1 \\ \delta = \{(c_2 + c_3) m_1 + c_2 m_2\} \omega \end{cases} \quad (1-7)$$

また、振幅に対する電力の関係は解析的に計算される [42]。図に示す形状の圧電片持ち梁を振動させた場合の誘導電荷 Q は、 x 方向の歪を S_x 、 z 方向の電場を E_z として式(1-8)で表される。 b は片持ち梁の幅、 L は片持ち梁の長さ、 d は圧電材料の厚みである、 e_{31} は圧電応力定数、 ϵ_{33} は誘電率を表す。

$$Q = b \int_0^L e_{31} S_x + \epsilon_{33} E_z dx \quad (1-8)$$

ここで、圧電材料に外部抵抗 R を接続した時、出力 P は式(1-9)で計算される。

$$P = RI^2 = R \left(\frac{\partial Q}{\partial t} \right)^2 \quad (1-9)$$

また、インピーダンス整合を行った場合には外部抵抗 R は式(1-10)で求められる。

$$R = \frac{1}{\omega C} = \frac{d}{\omega \epsilon_{33} b L} \quad (1-10)$$

以上の式より、インピーダンス整合を行った場合の変位に対する出力 P は式(1-11)で求められる。 h は基板の厚みを表す。同じ形状の圧電片持ち梁における出力は加振周波数に比例し、振幅の2乗に比例する。

$$P = \frac{1}{32} \frac{\omega b d h^2 e_{31}^2}{\epsilon_{33} L} A^2 \propto \omega A^2 \quad (1-11)$$

この解析解を用いてデバイスの出力をした結果を図 1-9 に示す。2 質点系に簡略化したモデルで質量を変化させた際の出力の周波数特性を表現することが可能である。一方、モデルのパラメータについては、質量とばね定数を除く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いる。

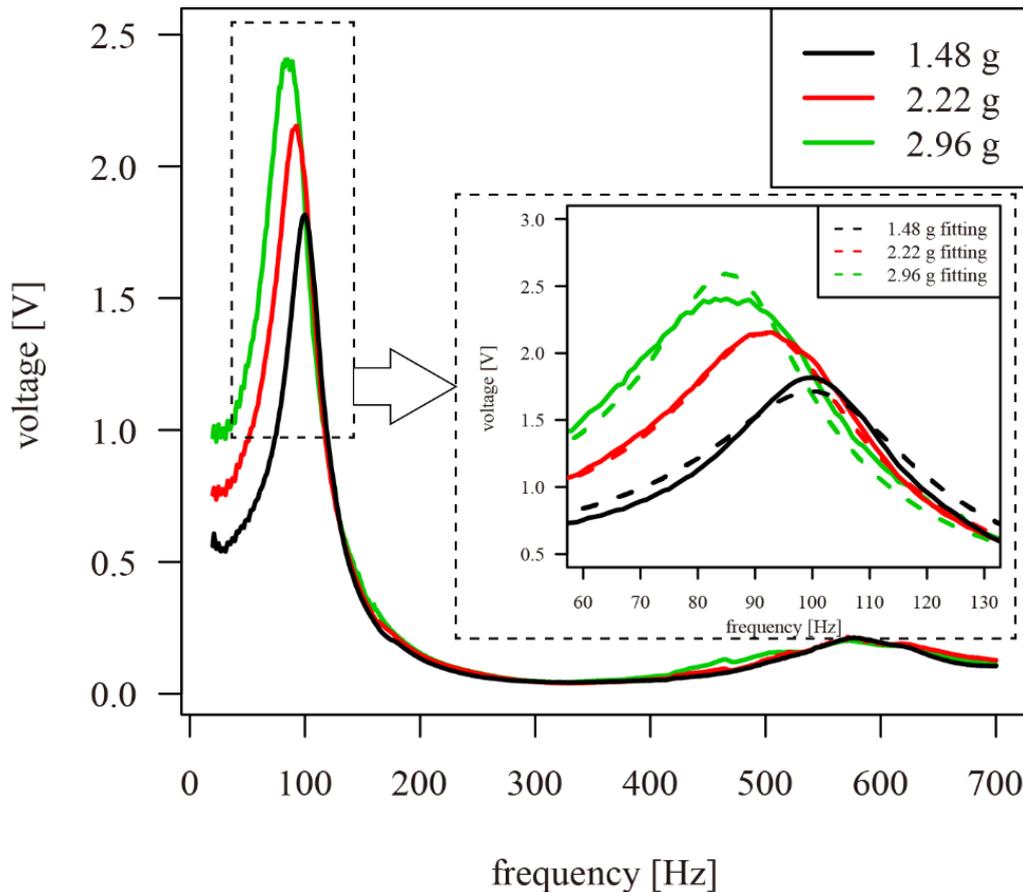


図 1-9 液体質量による出力変化とモデルによるフィッティング結果 [19].

1.5 研究の目的

本研究では，液体を用いた広帯域な振動特性を持つ振動発電手法についての研究を行う．液体を用いた発電構造を応用するためには課題が多く，本研究が対象とする課題は主に以下の通りである．

1. 振動のメカニズムを明らかにする必要がある．
2. 振動構造の発電電力について検討する必要がある．
3. 設計の改善のためにモデルの開発を行う必要がある．

これらの課題を解決するために，本研究の目的は以下の通りに設定した．

1. 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．
液体を薄膜で封止した振動発電構造について，実験とシミュレーションによって，液体が振動の広帯域化にどのように寄与するかを明らかにする．
2. デバイスを試作し，設計パラメータによる影響を調査する．
流体を封止した構造を試作し，負荷を接続して出力特性を測定する．さらに，複数の設計パラメータでデバイスを作製し，出力に与える影響を実験的に調査する．
3. 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
既存のモデルの課題である各係数の算出を，有限要素法を用いた連成解析によって行い，出力をシミュレーションする．また，作成したモデルを用いて，出力を増加する方法を検討する．

1.6 本論文の構成

本論文の構成は以下の通りである。

本章では既存の振動発電とその広帯域化技術について述べた後、本研究が対象とする液体を薄膜で封止した発電構造について課題を挙げ、本研究の目的を示した。

2章では、本研究が対象とする液体を用いたカンチレバー構造のエネルギーハーベスタの原理を述べ、モデル化とシミュレーションによって、液体の振動特性の広帯域化への寄与を調査する。

3章では、デバイスの試作と評価を行う。また、複数の設計パラメータでデバイスを作製し、出力に与える影響を実験的に調査する。

4章では、既存の2質点系モデルを用いて、出力を増加する方法を検討する。

5章において本研究のまとめを行う。

第2章 液体の広帯域化への寄与の 調査

2.1 はじめに.....	16
2.2 液体を用いた構造の原理.....	17
2.2.1 超弾性薄膜による広帯域化.....	17
2.2.2 流体による振動の伝達.....	18
2.3 シミュレーションによる動作の検証.....	19
2.3.1 有限要素法を用いた3次元モデルによるシミュレーション.....	19
2.3.2 シミュレーション結果.....	21
2.4 おわりに.....	28

2.1 はじめに

本章では、本研究が対象とする液体を用いたカンチレバー構造の振動発電手法について述べる。2.2 では、液体を用いることにより、振動の周波数特性が広帯域化する原理を示し、2.3 ではシミュレーションによって検証を行う。

2.2 液体を用いた構造の原理

2.2.1 超弾性薄膜による広帯域化

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。超弾性体とは、ひずみエネルギー密度関数を有する超弾性を持つ物質である。超弾性体の振動については運動方程式により解くことができる。運動方程式は Duffing 方程式と呼ばれ [43]、式(2-1)で表される。

$$\ddot{x} + 2\zeta\omega_n\dot{x} + \omega_n^2(x + \beta x^3) = \frac{f}{m} \quad (2-1)$$

この式を解き、振幅 A について解くと式(2-2)となる。

$$A(\omega) = \sqrt{\frac{4\left\{\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2 - 1\right\}}{3\beta}} \quad (2-2)$$

この振動特性は線形ばねを用いた場合に比べて広帯域の特性を示す。この手法は振動の広帯域化技術として多く用いられており、系の復元力に非線形性を持たせた手法の代表的なものとしては磁石を用いるもの [34, 43]や、PDMS 等の超弾性材料を用いるもの [33]等がある。

また、PZT 等の圧電セラミクスを用いる場合、ヤング率が高いため共振を下げるのが難しい場合がある。そこで、柔らかい材料を用いることで共振周波数を低下させることが可能であるため、柔らかい材料を取り入れた振動発電手法の研究もおこなわれている [44]。

一方、この手法を用いた場合に残る課題として、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。広帯域特性の振動の伝達に、接触や磁力による力の相互作用が必要となり、同様に構造が複雑化する。近年よく用いられている圧電材料であるジルコン酸チタン酸鉛(PZT)やチタン酸バリウム(BaTiO₃)は圧電セラミクスであり、脆性破壊が起きやすいことが実用上の課題となっており [45]、複雑な構造や摺動部分を用いた構造は圧電材料の破壊につながるため適していない。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。

2.2.2 流体による振動の伝達

流体が移動するとき，流れ方向に向かって規則正しく流れる層流と様々な方向に不規則に流れる乱流が存在する．流れが層流になるか乱流になるかはレイノルズ数 Re によって計算することができ，レイノルズ数が大きいと乱流になり，小さいと層流になる．レイノルズ数 Re は流体の移動距離 L ，構造に対する流体の平均速度 U ，流体密度 ρ ，粘性係数 μ を用いて式(2-3)で定義される．

$$Re = \frac{\rho * L * U}{\mu} \quad (2-3)$$

層流と乱流では，構造と干渉する際の壁面での挙動が異なる．流体が構造に接触して流れる際には流体の速度勾配に対応した摩擦力が働く．流れが層流の場合には，ストークスの抵抗法則に従って流速に比例した粘性抵抗が働く．一方，流れが乱流の場合には，次式で示すニュートンの粘性法則に従って流速の2乗に比例した粘性抵抗が働く．

本研究が対象とする手法では，超弾性材料から圧電材料への振動の伝達を液体によって行うことで，前項で述べた課題を解決することが可能である．液体を薄膜で封止し，内部に圧電材料の片持ち梁を配置した構造にすることで，流体の粘性抵抗によって広帯域の特性を持つ超弾性薄膜の振動を伝達する．液体を用いることで，構造による伝達と比較して簡易な構造になり，また，梁等の構造のみによって作られる機構と比較して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．

2.3 シミュレーションによる動作の検証

2.3.1 有限要素法を用いた3次元モデルによるシミュレーション

液体を薄膜で封止した構造の振動発電機構について、有限要素法を用いたシミュレーションで出力の推定を行う。

1. 有限要素法

有限要素法では、連続体をメッシュ状の要素に分割し、これらの節点において微分方程式について数値計算を行うことで変形をシミュレーションする。従って、有限要素法の具体的な手順としては、解析対象の設定→解析対象のモデル化→メッシュの作製→境界条件の設定→材料物性の入力→解析結果の検証・分析となる。

2. 流体シミュレーション

本研究がシミュレーションで計算を行う流体の移動について、あらかじめ本研究が対象とする形状で流体解析を行ったところ、乱流が発生することが分かったため、モデルとして、乱流をシミュレーション可能であるレイノルズ平均モデル(RANS: Reynolds Averaged Navier-Stokes)を用いた。RANSは乱流の渦運動を時間で平均化することでマクロに扱うシミュレーションモデルである。その中でもよく確立されているため工学の分野で多く用いられており、有効性が広く確認されている k - ϵ モデルを使用した。 k - ϵ モデルはRANSでシミュレーションする際に必要となる渦粘性係数を、乱流エネルギー k と消散率 ϵ の輸送方程式から算出するモデルである。 k - ϵ モデルでは渦粘性係数は式(2-4)で求められる。 C_μ はモデル定数であり、標準 k - ϵ モデルでは $C_\mu = 0.09$ となる。

$$\mu_t = \frac{\rho C_\mu k^2}{\epsilon} \quad (2-4)$$

また、本研究のシミュレーションでは流体と構造を含んだ構造について、加振した際の周波数応答を計算したい。構造においては複素固有値解析を行うことで減衰を含む系で周波数応答を計算することが可能であるが、流体を含む系においては周波数応答を計算する手法が確立されていない。そこで、本研究では、各加振周波数において時間領域で計算し、出力を計算する直接時間積分法を実行することで周波数応答を得る。シミュレーションのイメージを図 2-1 に示す。

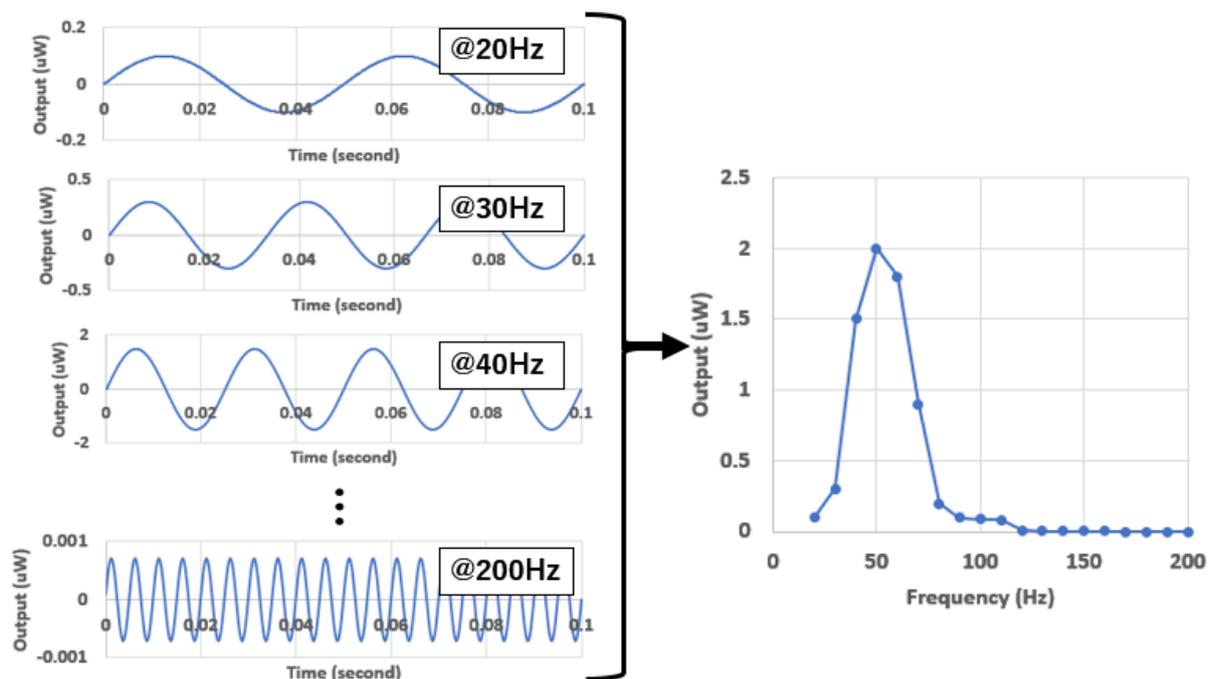


図 2-1 シミュレーションのイメージ図.

3. 連成解析

有限要素法による解析では、ANSYS や ABAQUS 等の汎用解析シミュレーターが存在するが、それぞれが扱える現象には限りがある。本研究では構造、流体、電気の 3 種類の現象について解析を行う必要がある。その際に、順番に各現象について解析を行い、結果をソルバー間で渡す方法を取ることができる。今回の場合だと、流体解析の結果を構造解析に用い、構造解析の結果を電気解析に用いることで解析を行うことができる。しかし、実際には流体と構造においては流れ場の中で構造が変形し、その結果として流れが影響を受ける上に、構造と電気においては、圧電効果によって機械電気間で結合しており相互作用が働くため、それぞれ双方向での結果の受け渡しが必要とされているため正確な解析とは言えない。

そこで、より正確な解析手法として、複数の現象を同時に解析する連成解析が取られる場合が多い。連成解析には主に弱連成法と強連成法が存在する。弱連成法は、先に述べたように各現象についてそれぞれのソルバーを用いて数値計算を行い、かつそれぞれのソルバーの出力結果を更新しながら計算を行う手法であり、強連成法は、複数の現象の支配方程式をあらかじめ統合して計算を行う手法である。一般的には強連成法が精度と安定性の良い手法とされている。特に流体構造連成解析においては、流体と構造の相互依存性が強く、非線形性が強いいため、強連成法が有効な解析方法とされている。

2.3.2 シミュレーション結果

本研究では COMSOL Multiphysics ソフトウェアを用いてシミュレーションを行う。計算に使用した PC の仕様を表 2-1 に示す。

表 2-1 計算に使用した PC の仕様.

CPU	Intel® Core™i7-4790 CPU @3.6GHz
DRAM	16GB
OS	Microsoft Windows 10 Education
COMSOL 使用モジュール	COMSOL Multiphysics 5.4 CFD module, MEMS module

まず、用いた圧電カンチレバーのモデルを作成する。構造解析を 3 次元モデルで行う場合には、物性として密度、ヤング率が必要である。また、減衰を考慮したモード解析を行う場合には減衰係数を導入する必要がある。これらの値は、片持ち梁を加振試験した結果から算出した。空気中で片持ち梁に加振試験を行った際の共振周波数 ω_n は次式で求められる。従ってヤング率は実験値より逆算することが可能である。

また、空気中で加振した際に片持ち梁に発生する減衰力は式(2-5)で表される。右辺の第 1 項が空気減衰、第 2 項が内部構造減衰、第 3 項が支持部減衰を表す。各変数は、空気密度: ρ_a 、カンチレバー長さ: l 、カンチレバー幅: b 、カンチレバー高さ: h 、カンチレバー密度 ρ_b 、共振周波数: ω_n 、構造減衰係数: μ である。

$$\zeta = \frac{3\pi\mu + \frac{3}{4}\pi b\sqrt{2\rho_a\mu\omega_n}}{2\rho_b h b \omega_n} + \frac{\eta}{2} + \frac{0.23h^3}{l^3} \quad (2-5)$$

カンチレバーの共振周波数は材料工学的に定まる。空気中で加振を行う場合の 1 次モード共振周波数 ω_n は式(2-6)で求められる。

$$\omega_n = \frac{1.875^2}{l^2} \sqrt{\frac{EI}{\rho A}} \quad (2-6)$$

液体中で加振する際には、空気中での加振実験で得られた減衰係数から空気減衰を引いた値を用いる。シミュレーションで用いた減衰係数 $\zeta_{Simulation}$ は、実験値 $\zeta_{Experiment}$ を用いて式(2-7)で求める。

$$\zeta_{Simulation} = \zeta_{Experiment} - \frac{3\pi\mu + \frac{3}{4}\pi b\sqrt{2\rho_a\mu\omega_n}}{2\rho_b h b \omega_n} \quad (2-7)$$

これらの式を用いて、実験で得られた共振周波数と品質係数からシミュレーションで用いる各パラメータを算出する。ただし、品質係数は周波数応答における半値幅 (FWHM: full width at half maximum) により半値幅法を用いて求められる。半値幅とは山

形関数の広がり程度を表す指標であり、特に本研究のような広帯域化を目的とする振動機構の評価に多く用いられる。半値幅は以下の通りに求められる。山形関数 $g(x)$ について、最大値を $g_{max} = g(x_{max})$ とすると、 $g(x) = g_{max}/2$ を満たす x が 2 つ存在する。それぞれを $x_1, x_2 (x_1 < x_2)$ とおくと半値幅は $x_2 - x_1$ で表せる。半値幅法を用いることで減衰係数 ζ は式(2-8)で表される。

$$\zeta = \frac{x_2 - x_1}{2x_{max}} \quad (2-8)$$

実験によって得られた周波数応答から算出したパラメータを表 2-2 に示す。また、片持ち梁の大きさは、実験で用いるセンサ素子と同等にした。センサ素子には PVDF(TE Connectivity 社 LDT1-028K)を用いた。

表 2-2 シミュレーションに用いる片持ち梁のパラメータ。

density	1448 kg/m ³
Young's modulus	2.93e9 Pa
Damping factor	0.12162132656
Length	17.26 mm
Width	16.26 mm
Height	0.23 mm

これらのパラメータを用いて 3 次元有限要素によりシミュレーションを行う。作成したメッシュの特性を下表に示す。

表 2-3 片持ち梁のメッシュの評価。

Number of elements	2050
Average element quality	0.9062
Element Volume ratio	0.4198
Mesh Volume	64.55 mm ³

作成した片持ち梁のモード解析の結果を図 2-2 に示す。実験により得られた共振周波数 211 Hz で品質係数が 6.03 のモデルを作成した。

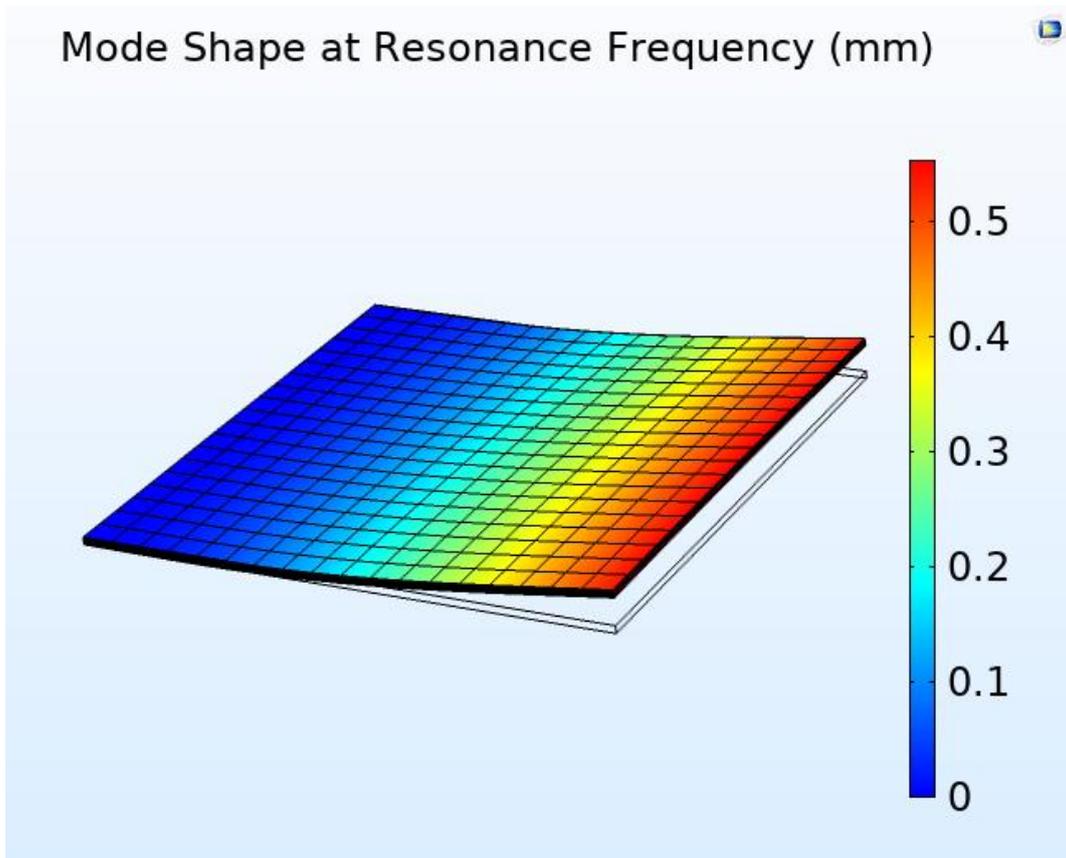


図 2-2 片持ち梁のモード解析の結果.

ここまでで作製した片持ち梁のモデルを用いて流体構造連成解析を行う。作成した流体部分の寸法は、流体が片持ち梁と筐体の隙間が 1 mm となるように設定した。また、高さは片持ち梁の上部と下部がそれぞれ 5 mm とした。これは、次章でデバイスを実際に作成するとき作成可能な寸法に設定した。作成したメッシュの評価を表 2-4 に示し、図 2-3 に示す。

表 2-4 流体構造連成解析のメッシュの評価.

	Fluid part	Total
Number of elements	8035	17781
Average element quality	0.6034	0.4917
Element Volume ratio	7.332E-6	1.119E-7
Mesh Volume	3193 mm ³	5768mm ³

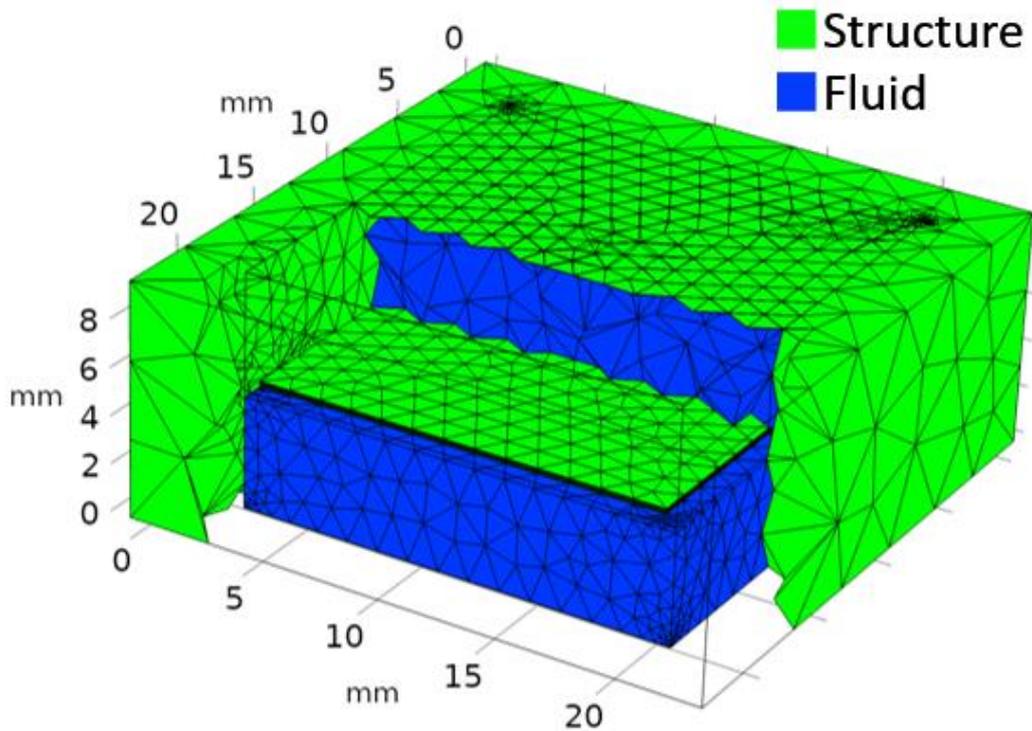


図 2-3 有限要素法による流体構造連成解析のメッシュ.

このモデルを用いて加振シミュレーションを行う。シミュレーションは、筐体の外部に強制変位を与える。あらかじめシミュレーションを行って振動が収束する時間を調査し、シミュレーション時間を 200 ms に設定した。周波数は 20~200 Hz の間の各周波数において直接時間積分法を行う。30Hz と 100Hz でそれぞれ加振を開始して 200 ms のシミュレーションをした際の、カンチレバー先端の変位を図 2-4 に示す。

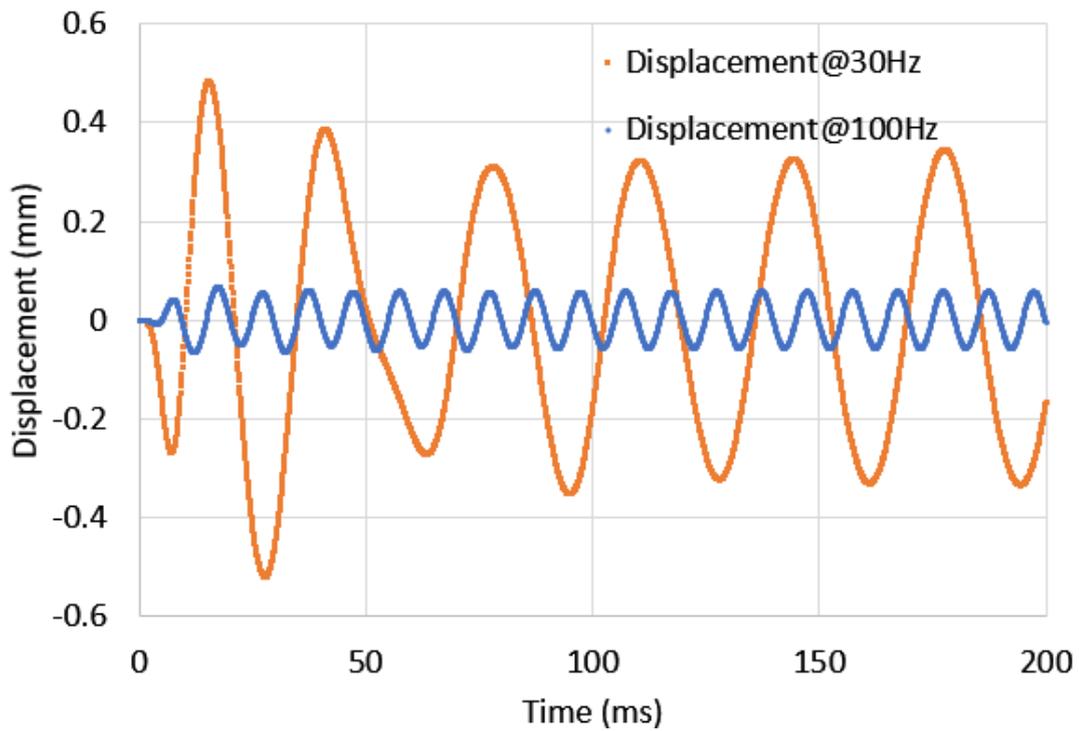


図 2-4 30, 100Hz における加振シミュレーション時の片持ち梁先端の変位.

各周波数で、100 ms 程度で振動が収束する．比較のため、片持ち梁に錘を付加することで共振周波数を同様に下げた場合の周波数特性をシミュレーションによって得る．それぞれのシミュレーション結果の周波数特性を図 2-5 に示す．

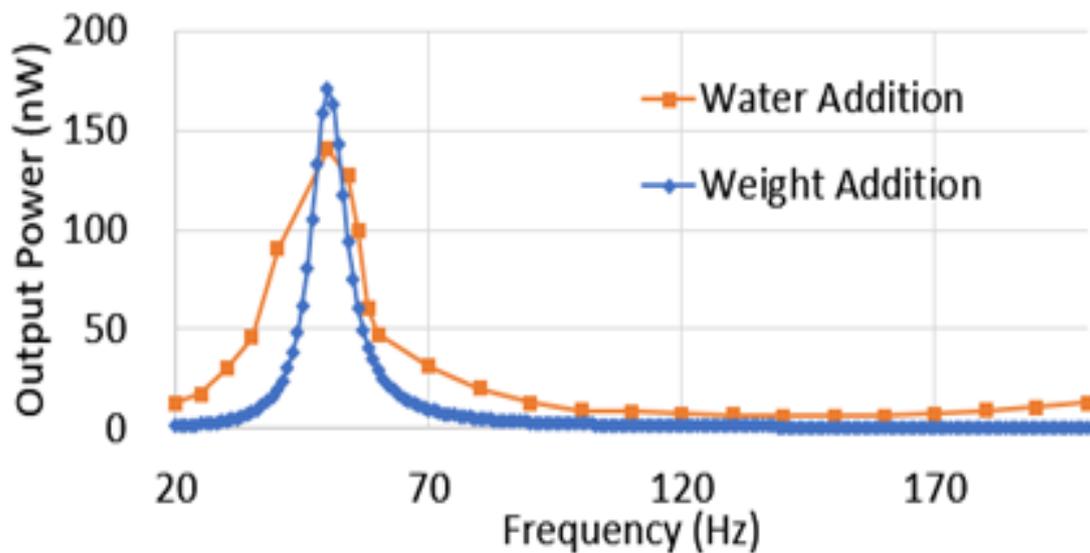


図 2-5 周波数応答のシミュレーション結果.

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、帯域の評価に関する半値幅は 18 Hz、品質係数 Q 値は 2.78 となった。一方、比較のために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 1.8 倍に増加した。

次に、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によって比較を行う。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図 2-6 に示す。

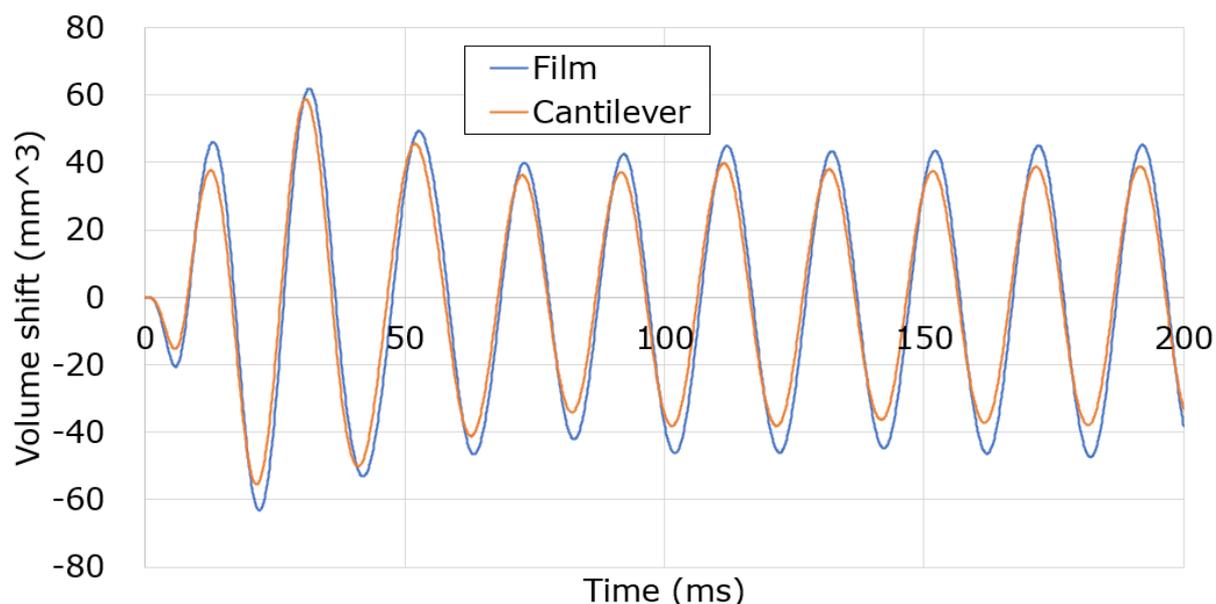


図 2-6 液体を封止した際の共振時の加振シミュレーションでの薄膜と片持ち梁の変位の面積積分結果。

振動は 150 ms 程度で収束していることが分かる。また、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と何も封止しない場合についてシミュレーションを行った。空気を封止した際に出力が最大となった 190 Hz で加振した際のシミュレーション結果を図 2-7 に示す。

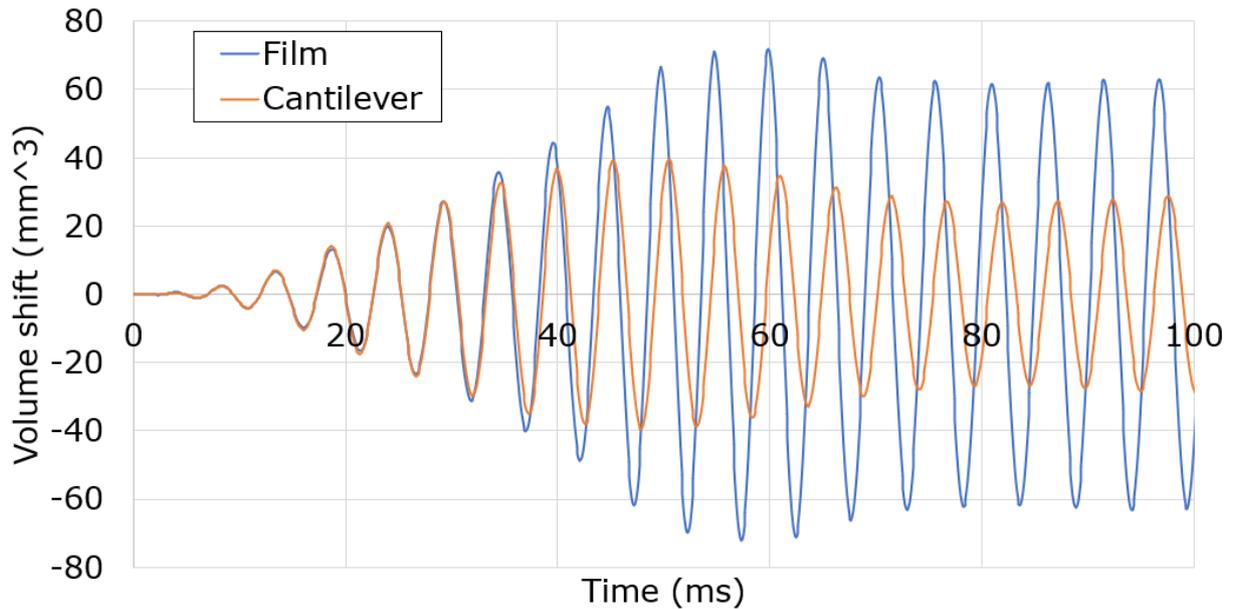


図 2-7 空気を封止した際の共振時の加振シミュレーションでの薄膜と片持ち梁の変位の面積積分結果.

それぞれのシミュレーションで薄膜が共振した場合において、薄膜の振動に対する片持ち梁の振動に対して空気を封止した場合には 47.5 %，何も封止しない場合には 11.2 %の振動が片持ち梁で発生した。ただし，内部に何も封止していない場合は薄膜と片持ち梁の振動は互いに影響せず，それぞれで独立の振動が発生している。この結果より，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。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いる。

2.4 おわりに

本章では，液体を薄膜で封止した構造の広帯域化の原理を明らかにした．構造の広帯域化の原理を整理し，有限要素法による流体構造連成解析により液体の広帯域化への寄与を明らかにした．

超弾性材料の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，接触部分や摺動部分のない簡易な構造で振動特性を広帯域化し，同時に衝撃や劣化による破壊が起きにくい構造を達成している．

出力特性の推定においては，3次元モデルを有限要素法によって解析することで，推定を行った．本研究で使用する PVDF 素子(TE Connectivity 社 LDT1-028K)をモデル化し，流体を 3.3 g (18.26mm × 18.26mm × 10.0mm)封止したモデルを作成し，シミュレーションを行った．その結果，錘を用いた構造と比較して半値幅は 8 Hz に対して 18 Hz と 1.8 に増加することを示した．

また，構造内部に空気を封止した場合や何も封止しない場合に比べて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り，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伝達効率は約 1.8 倍となった．流体を用いた手法の効果が確認された．

第3章 デバイスの試作と評価

3.1 はじめに.....	30
3.2 デバイスの製作方法.....	31
3.3 発電機構の評価方法.....	34
3.3.1 加振実験.....	34
3.3.2 インピーダンス整合.....	35
3.4 流体を用いた手法の出力特性の調査.....	37
3.4.1 出力の周波数特性の調査(錘付加時の周波数特性との比較).....	37
3.4.2 インピーダンス整合と出力電力の測定.....	38
3.5 設計パラメータの出力への影響の調査.....	40
3.5.1 液体質量による影響.....	40
3.5.2 液体粘度による影響.....	42
3.5.3 薄膜による影響.....	44
3.6 おわりに.....	46

3.1 はじめに

本章では、液体を薄膜で封止した構造の振動発電構造を製作し、その評価を行う。本章は大きく 6 つに分かれている。3.2 ではデバイスの製作方法について述べる。3.3 では製作したデバイスの評価に必要な計測の方法を述べる。3.4 ではデバイスの製作を行い、出力特性の評価を行う。3.5 ではデバイスの設計パラメータの出力への影響を実験により調査する。

3.2 デバイスの製作方法

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 15~100 μm の PU フィルムを用いた。筐体にはアクリル樹脂とポリカーボネート樹脂を用いた。液体は 1~1000 $\text{mPa}\cdot\text{s}$ の粘度の液体を用いた。1 $\text{mPa}\cdot\text{s}$ の液体を用い、50~1000 $\text{mPa}\cdot\text{s}$ の液体としてシリコンオイルを用いた。

作製は以下のように製作した。

1. 筐体パーツの作製

発電機構の筐体部分の4つのパーツを CAD によって設計し、圧電材料を固定するパーツ2つを、ポリカーボネート板を CNC フライスで切削することで作り、薄膜を固定するパーツ2つを、アクリル板をレーザー加工機によってレーザー加工することで作る。

2. 筐体パーツの組立

圧電材料と、圧電材料を固定するパーツは接着剤を用いて接着した。図に示すように圧電材料を挟み込むようにパーツを配置して接着する。

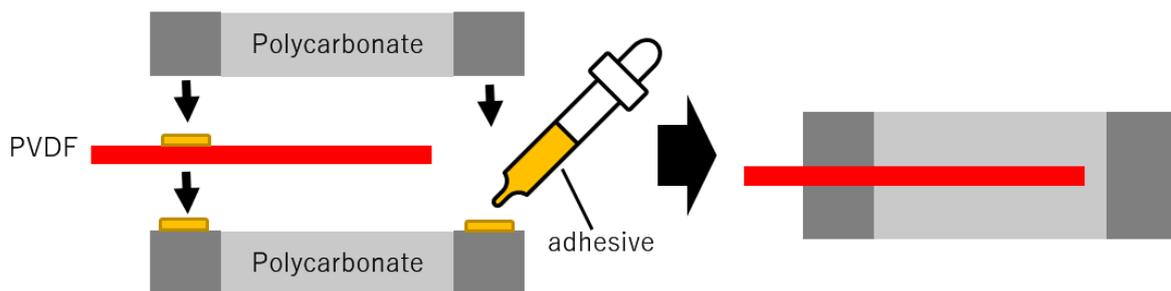


図 3-1 圧電材料の接着方法。

次に、薄膜と薄膜を固定するパーツは、シート状の接着剤を用いて接着を行った。図に示すようにして同じパーツを2つ作製した。また、このパーツは薄膜の種類を変更して複数作成を行った。

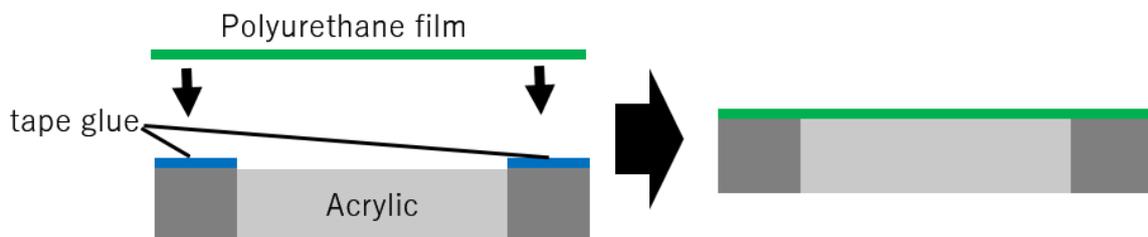


図 3-2 フィルムの接着方法。

3. 液体の封止

液体を薄膜で封止する際に、筐体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発電パーツと薄膜パーツ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筐体内部に液体を満たし、上方向から薄膜パーツを固定することで液体を内部に封止する。

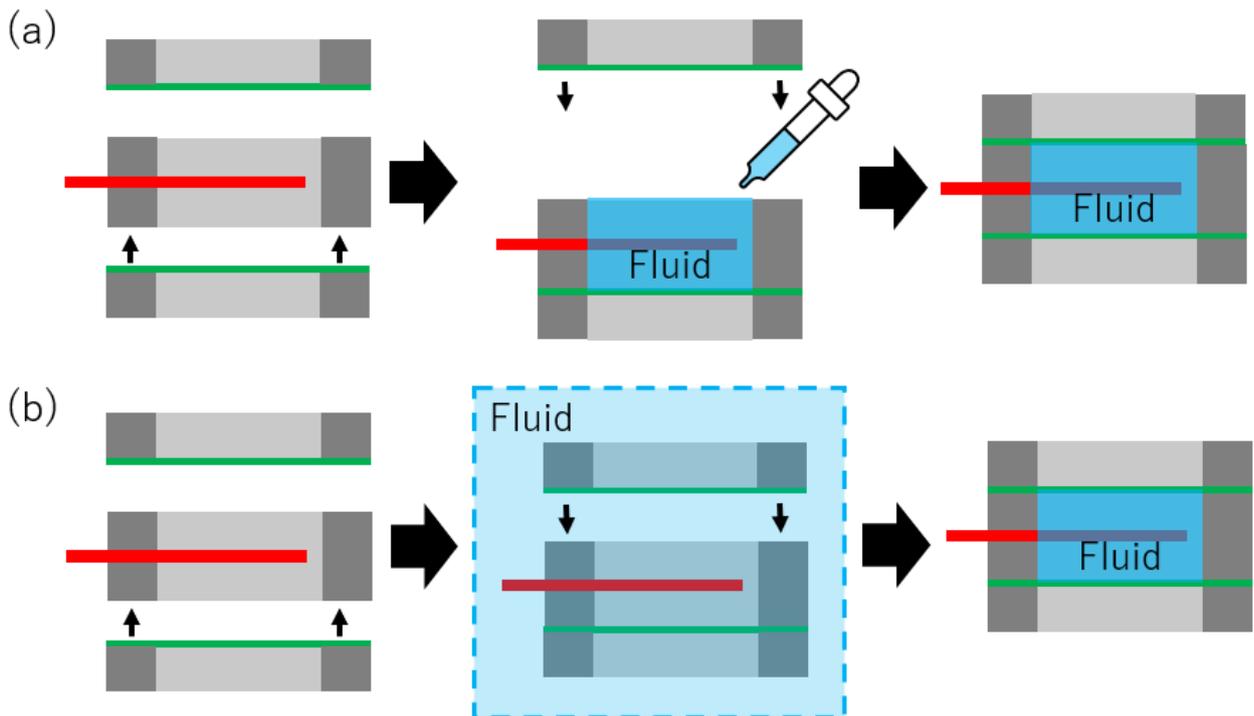


図 3-3(a)粘度の高い液体の封止方法. (b)粘度の低い液体の封止方法.

以上の方法によって構造内部に流体を封止した。本研究ではあらかじめ試作を行ったところ、粘度が $1 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ 以下の流体を用いた場合に気泡が構造内部に混入した。これは、封止の際に上部から薄膜パーツを固定するとき、接触時の振動で液体が外部に流れ出すことが原因と考えられる。そのため、粘度が $1 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ 以下の流体を用いる場合には低粘度の流体の封止方法で封止を行い、 $1 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ より大きい流体を用いる場合には後年度の流体の封止方法で封止を行った。作成したデバイスの例を図 3-4 に示す。

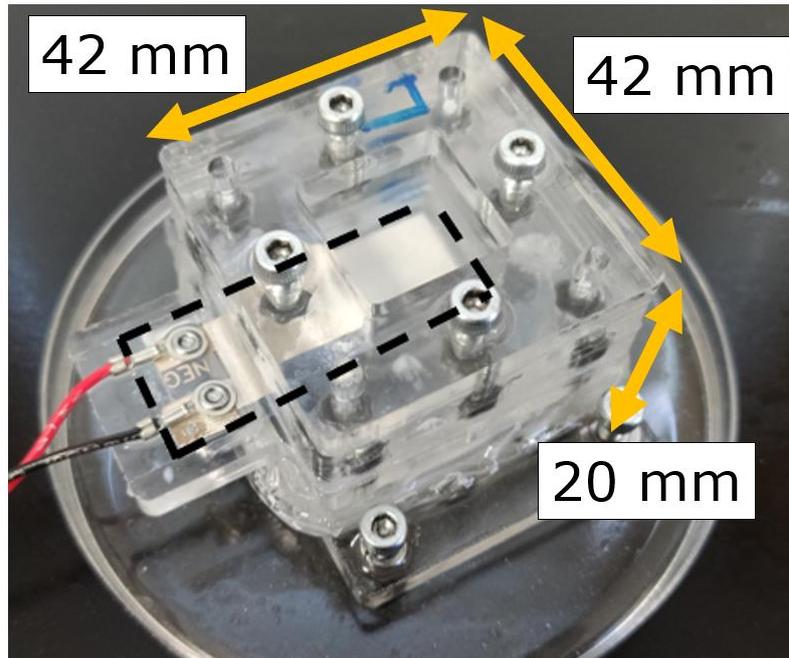


図 3-4 試作したデバイスの例.

3.3 発電機構の評価方法

3.3.1 加振実験

作製した発電機構の評価は，デバイスに振動を与えた際の出力によって行う．その際の，デバイスに振動を与える手法について述べる．本研究ではファンクションジェネレータ (AFG 31051, Tektronix) から発生させた信号を加振機 (Portable Vibration Calibrator Model 8100, 昭和測器株式会社) に入力して振動を発生させた．その際，条件を変えた際に加振加速度を一定に保つため，加振機の振動台の上に加速度センサ (圧電式加速度ピックアップ PV-91CH, リオン株式会社) を載せて加速度の測定を行った．加速度センサは磁力によって振動台に吸着している．加振機にファンクションジェネレータを接続して加振実験を行う場合の実験器具の配置を図に示す．

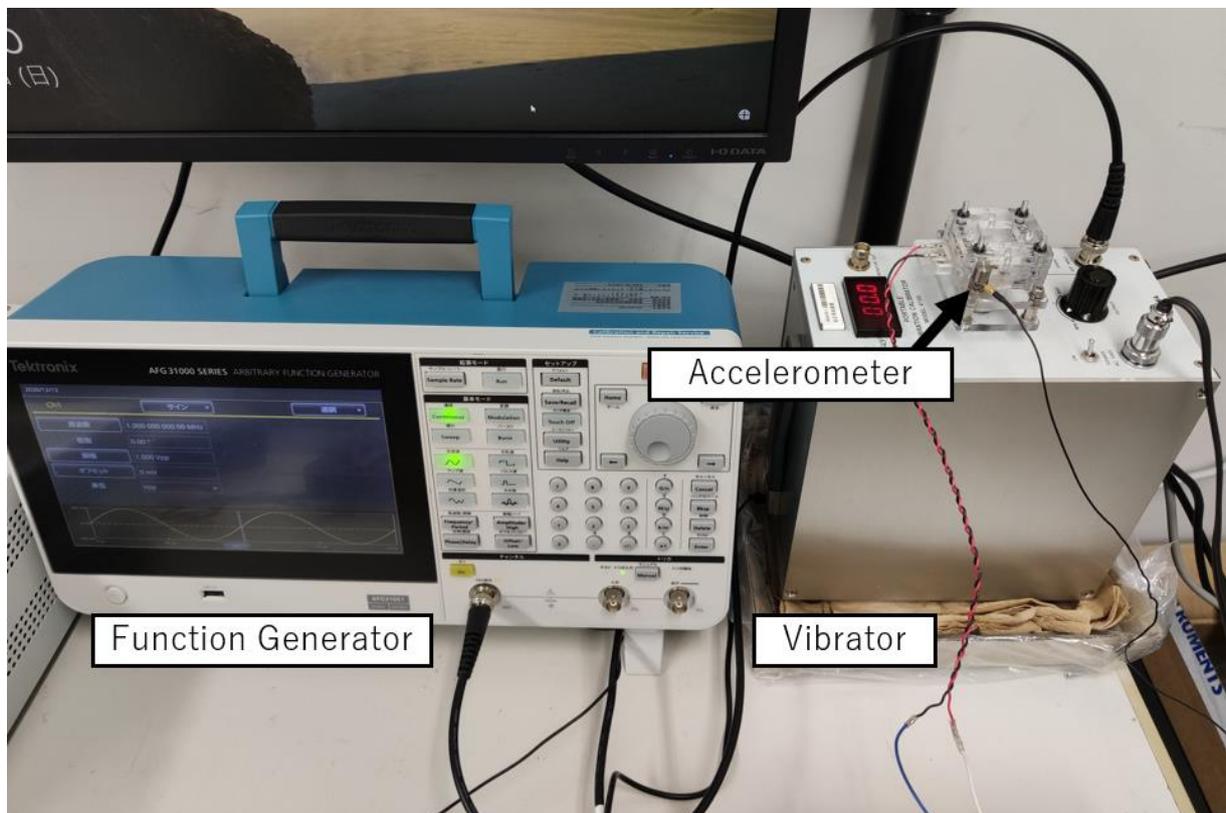


図 3-5 ファンクションジェネレータと加振機と加速度センサの外観.

加速度センサは電圧入力モジュール (NI-9229, National Instruments) に接続して測定結果を得る．また，本研究では National Instruments の測定モジュールを複数用いるが，それぞれのモジュールは専用のシャーシ (CompactDAQ Chassis cDAQ-9178, National Instruments) に接続することによって PC との通信を行っている．加速度の指定は LabVIEW を用いた P 制御によって行う．加速度センサから得られた加速度を元に，

ファンクションジェネレータから出力される電圧を操作した。振動発電機構の加振実験に用いるシステムを図に示す。

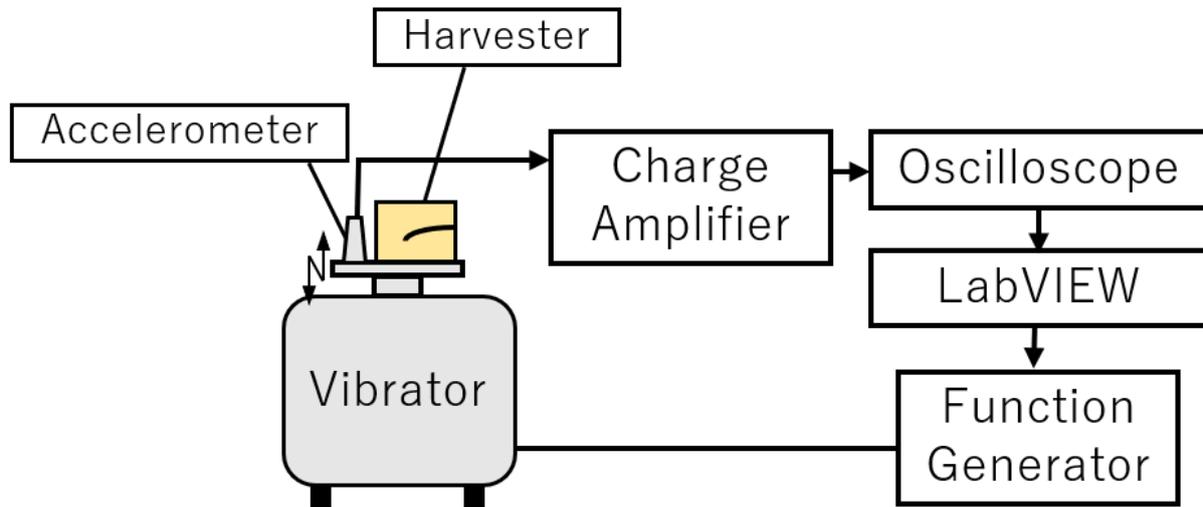


図 3-6 加振実験で加速度を指定するときのブロック図

3.3.2 インピーダンス整合

圧電材料が加振によって振動した場合、その出力電力を得るためには外部抵抗を接続し、インピーダンス整合を行う必要がある。その際、圧電材料のインピーダンスには周波数依存性がある。圧電材料は電圧源、抵抗、コンデンサの直列に接続した等価回路で表され、それぞれを V_{oc} 、 R_s 、 C として、周波数を ω とすると、インピーダンス Z は式(3-1)で表される [46]。

$$Z = R_s + \frac{j}{\omega C}, \quad |Z| = \sqrt{R_s^2 + \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2} \quad (3-1)$$

あらかじめ圧電材料片持ち梁に抵抗を接続し、本研究が扱う低周波数の範囲である 20~200 Hz の範囲でインピーダンス整合が取れる範囲を調べ、接続する抵抗値の範囲を 0.05~10 MOhm とした。付加抵抗値をスイッチングするシステムを図に示す。抵抗値は 0.05, 0.1, 0.2, 0.5, 1.0, 2.0, 4.0, 10.0 MOhm の 8 つの抵抗をリレーモジュール (NI-9485, National Instruments)によって抵抗を順番に接続することでスイッチングを行う。

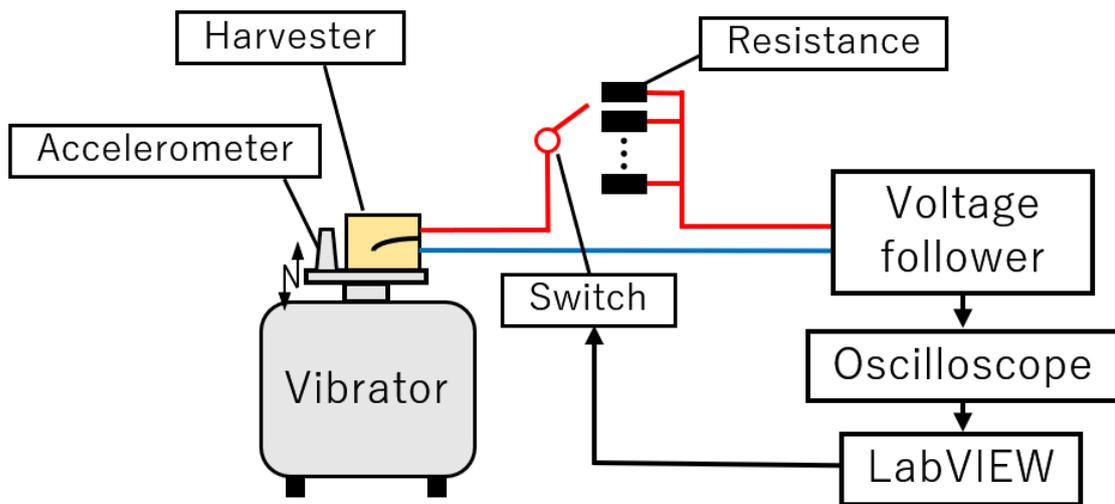


図 3-7 加振実験で抵抗値をスイッチングするシステムのブロック線図.

3.4 流体を用いた手法の出力特性の調査

3.4.1 出力の周波数特性の調査(錘付加時の周波数特性との比較)

流体を薄膜で封止した構造は、振動発電手法の広帯域化を目的としている。デバイスの試作を行い、出力電圧の測定を行うことで、出力の周波数特性を調査した。また、金属の錘を付加した場合との周波数特性との比較を行う。

圧電素子にはセンサ用の PVDF フィルム(LDT1-028K)を用い、液体にはシリコンオイル (KF-96-50cs, 信越シリコン)を用い、上下のフィルムには厚さ7 μm の医療用フィルム(サージンフィルム7ミクロン, リバテープ製薬株式会社)を用いた。

まず液体の質量が 2.9 g の場合について、 30 m/s^2 で加振機によってデバイスを振動させ、20~500 Hz において圧電素子からの出力のピーク間の電圧(peak to peak)をオシロスコープによって測定した。その際、錘を付加して共振周波数を下げた場合と比較するため、液体を用いた際の共振周波数と同じになるように錘を付加して共振周波数を低下させ、その時の出力を測定した。

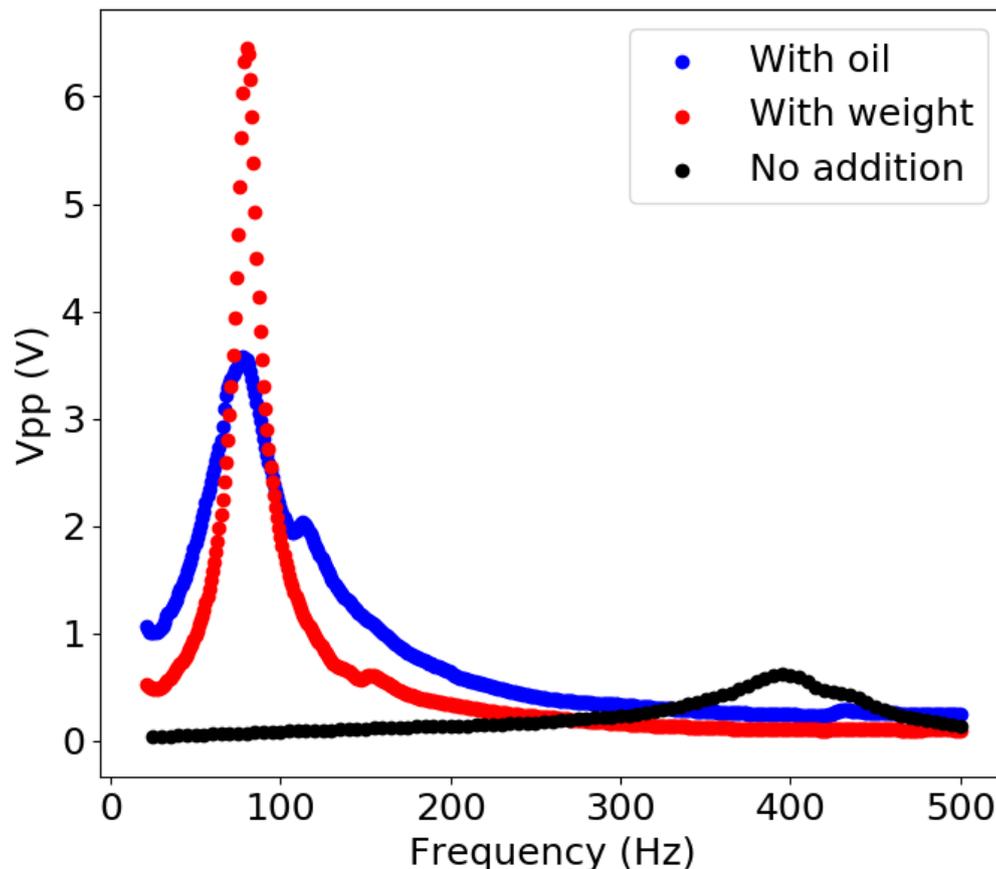


図 3-8 液体の有無と錘付加時の出力電圧の周波数特性.

液体を入れることにより、液体を入れていない場合と比べて最大出力は 0.6 V から

3.58 V に増加し、共振周波数は 395 Hz から 80 Hz に低下し、Q 値は 6.077 から 2.364 に低下した。また、0.64 g の錘をカンチレバーの先端に付加したものの結果として、共振周波数は 78 Hz に下がった。最大出力は 6.4 V に増加し、Q 値は 7.273 に増加した。その結果をまとめたものを表に示す。

表 3-1 液体の有無と錘付加時の出力特性の変化。

	Resonance Frequency	Quality Factor	Maximum Output
No addition	395 Hz	6.077	0.6 V
With Oil	80 Hz	2.364	3.58 V
With Weight	78 Hz	7.273	6.4 V

3.4.2 インピーダンス整合と出力電力の測定

前節では解放電圧を測定し、周波数特性の調査を行った。しかし、実際に発電を行う場合には外部抵抗を接続し、インピーダンス整合を行う必要がある。まず、デバイスで加振試験を行い、インピーダンス整合をした。その上で出力電力の測定を行った。50 Hz で加振試験を行った際のインピーダンスマッチングの結果を図 3-9 に示す。この時、1.5 MΩ でインピーダンス整合が取れてその時の出力は 0.32 μW となった。また、測定周波数に対するインピーダンスマッチングの結果と理論式でフィッティングした結果を図 3-10 に示す。おおよそ理論式にフィッティングされていることが分かる。

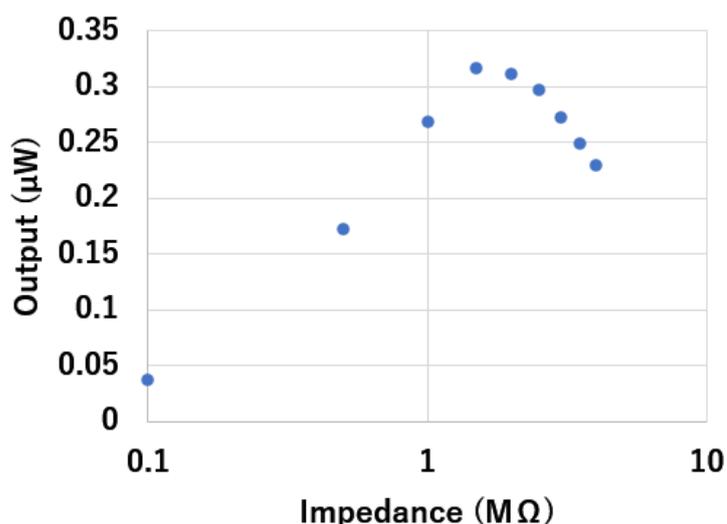


図 3-9 50 Hz での加振実験でのインピーダンス整合の結果。

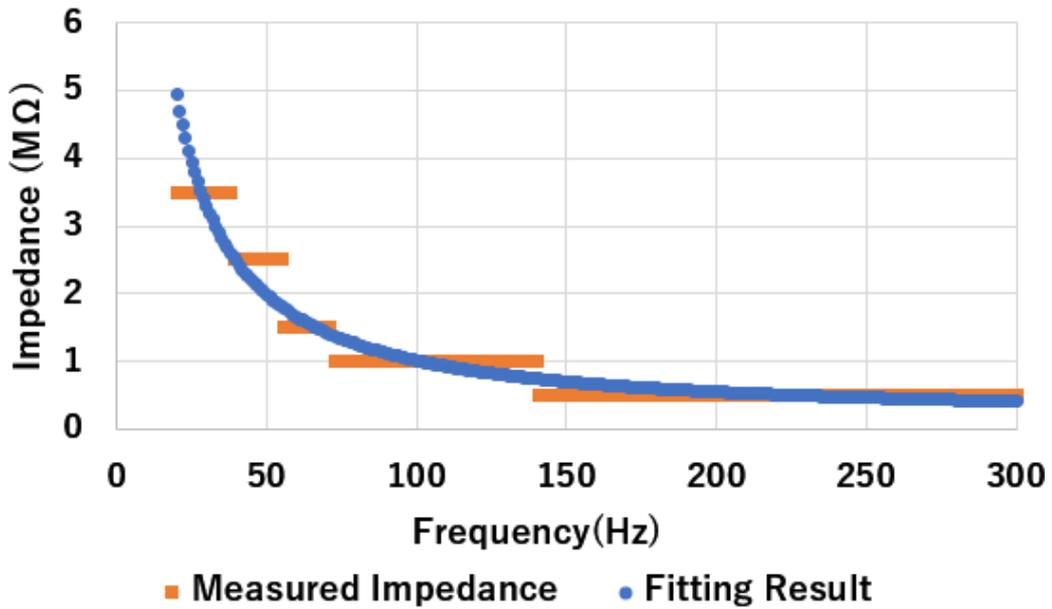


図 3-10 加振周波数に対するインピーダンスと理論式とのフィッティング結果.

インピーダンスマッチングを行い，出力を測定した結果を図 3-11 に示す．出力は最大で 153 nW となり，そのときの共振周波数は 56 Hz となった．また，半値幅は 13 Hz となった．

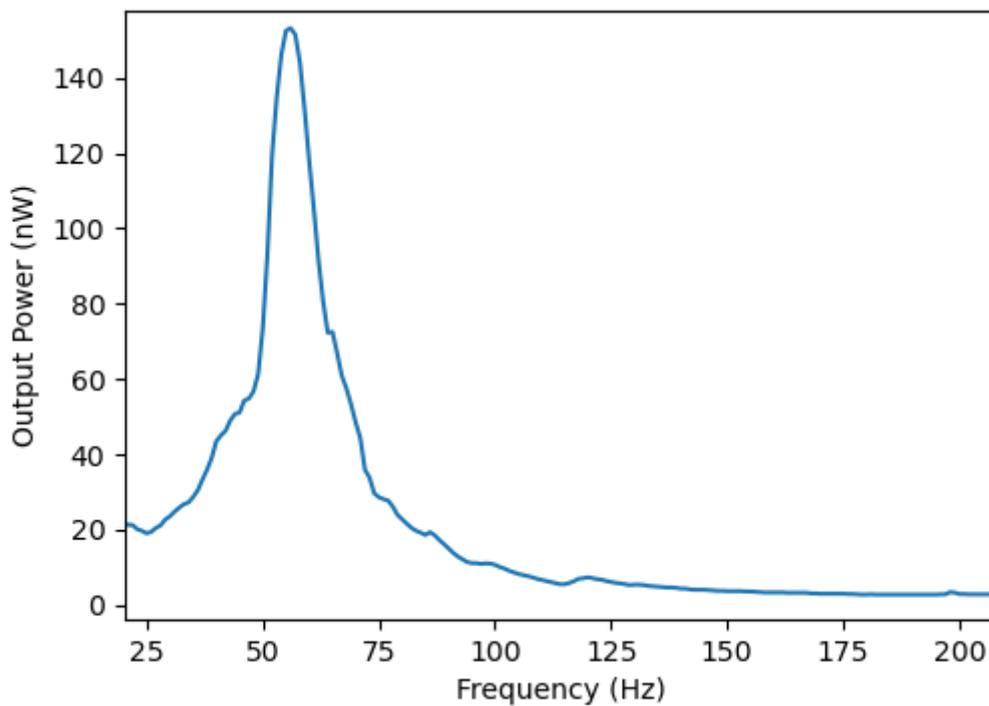


図 3-11 出力電力の測定結果.

3.5 設計パラメータの出力への影響の調査

3.5.1 液体質量による影響

本項では、設計時に設定するパラメータの一つである液体質量を変化させた際の出力への影響を調査し、より広帯域で高出力にするための方法を提案する。圧電素子には PVDF を用いたセンサ(LDT1-028K, TE Connectivity)を用いた。液体は水を用い、薄膜には 15 μm の TPU フィルム(シルクロン, 大倉工業株式会社)を用いた。液体質量は 3.3, 6.6, 9.9, 13.3 g の 4 段階でデバイスを作製した。加振加速度は 10 m/s^2 とし、共振周波数が含まれる 20~200 Hz の範囲を 1 Hz 刻みで測定した。出力電力の周波数特性の測定結果を図 3-12 に示す。

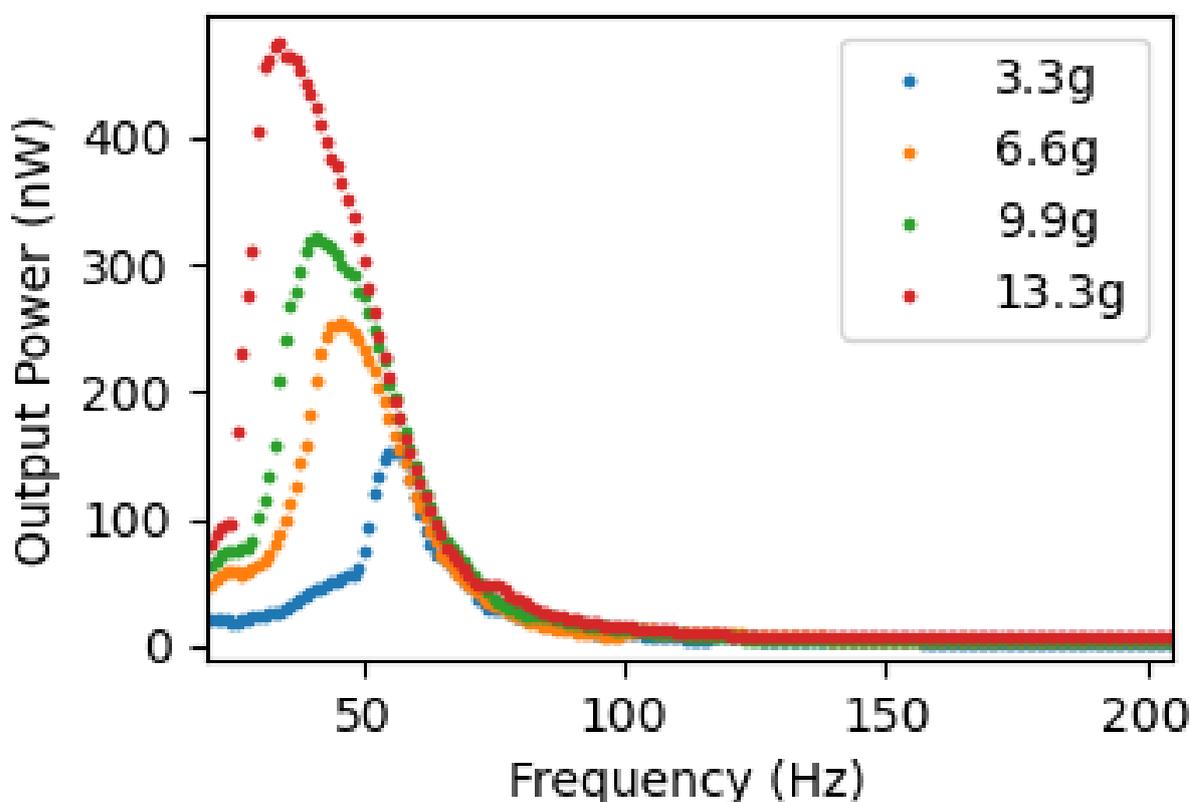


図 3-12 液体質量を変化させたときの出力電力の周波数特性の測定結果。

ハーベスタ内の液体の質量の増加に伴い、最大出力が増加し共振周波数が低下することが分かる。この結果より、広帯域化の指標となる半値幅と最大出力を図 3-13 に示す。グラフより、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。

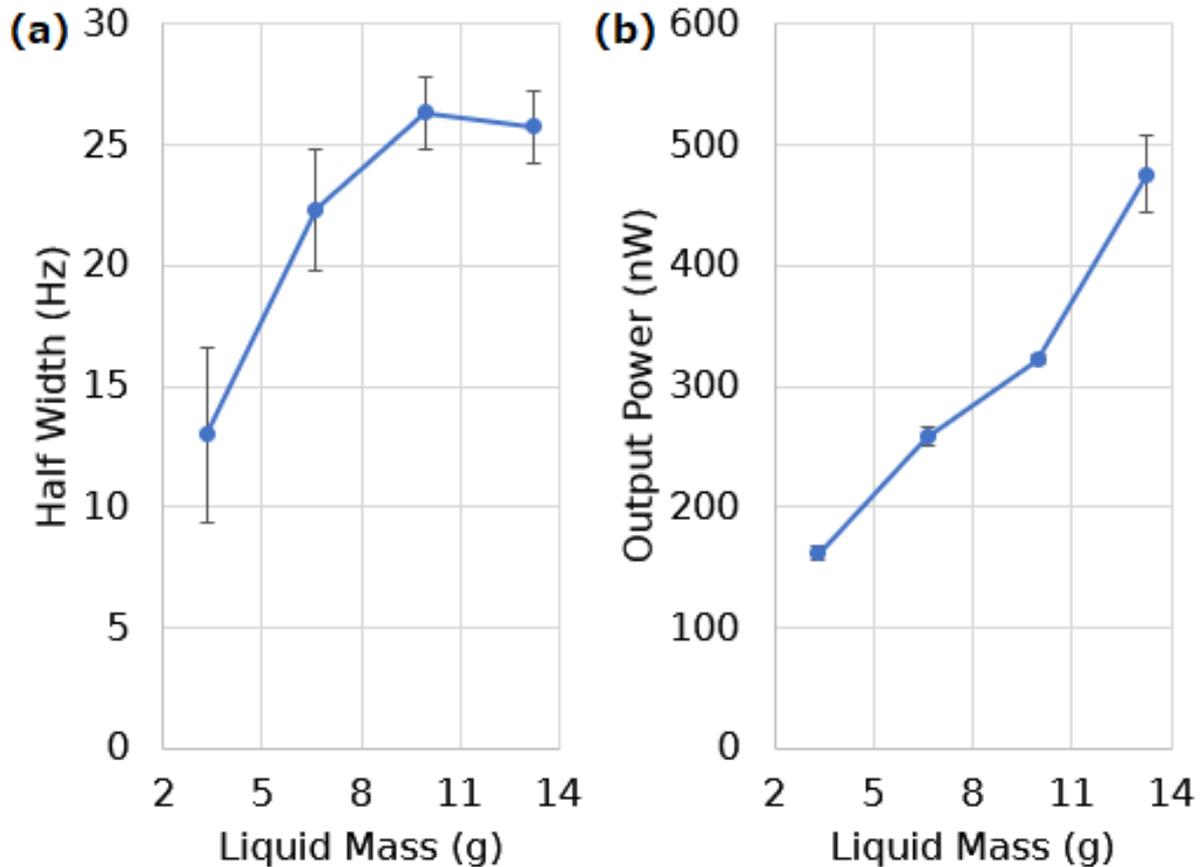


図 3-13 (a)液体質量を変化させたときの半値幅の変化(b)液体質量を変化させたときの最大出力の変化.

片持ち梁の振動はバネマスダンパ系で表せ、運動方程式は式(3-2)となる.

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = f(t) \quad (3-2)$$

そのとき、品質係数 Q は式(3-3)で表される.

$$Q = \frac{\sqrt{mk}}{c} \quad (3-3)$$

従って、錘の付加によって共振周波数を下げた場合、 Q 値は増加するが、本手法では共振周波数を低下させると同時に Q 値が低下する結果を示した。これは、液体体積の増加により、管体内部と流体が接触する面積が増加するため、内部減衰が大きくなったことが原因として考えられる。

3.5.2 液体粘度による影響

本項では、設計時に設定するパラメータの一つである液体の粘度を変化させた際の出力への影響を調査し、より広帯域で高出力にするための方法を提案する。圧電素子には PVDF を用いたセンサ(LDT1-028K, TE Connectivity)を用いた。液体は粘度が 50, 300, 1000cSt の液体(それぞれシリコンオイル KF-96-50cs, シリコンオイル KF-96-300cs, シリコンオイル KF-96-1000cs)を用いた [47]。薄膜には 100 μm の PU フィルムを用いた。液体質量は 3.3 g でデバイスを作製した。加振加速度は 10 m/s^2 とし、共振周波数が含まれる 20~200 Hz の範囲を 1 Hz 刻みで測定した。出力電力の周波数特性の測定結果を図 3-14 に示す。また、測定結果より得られる広帯域化の指標となる半値幅と最大出力を図 3-15 に示す。

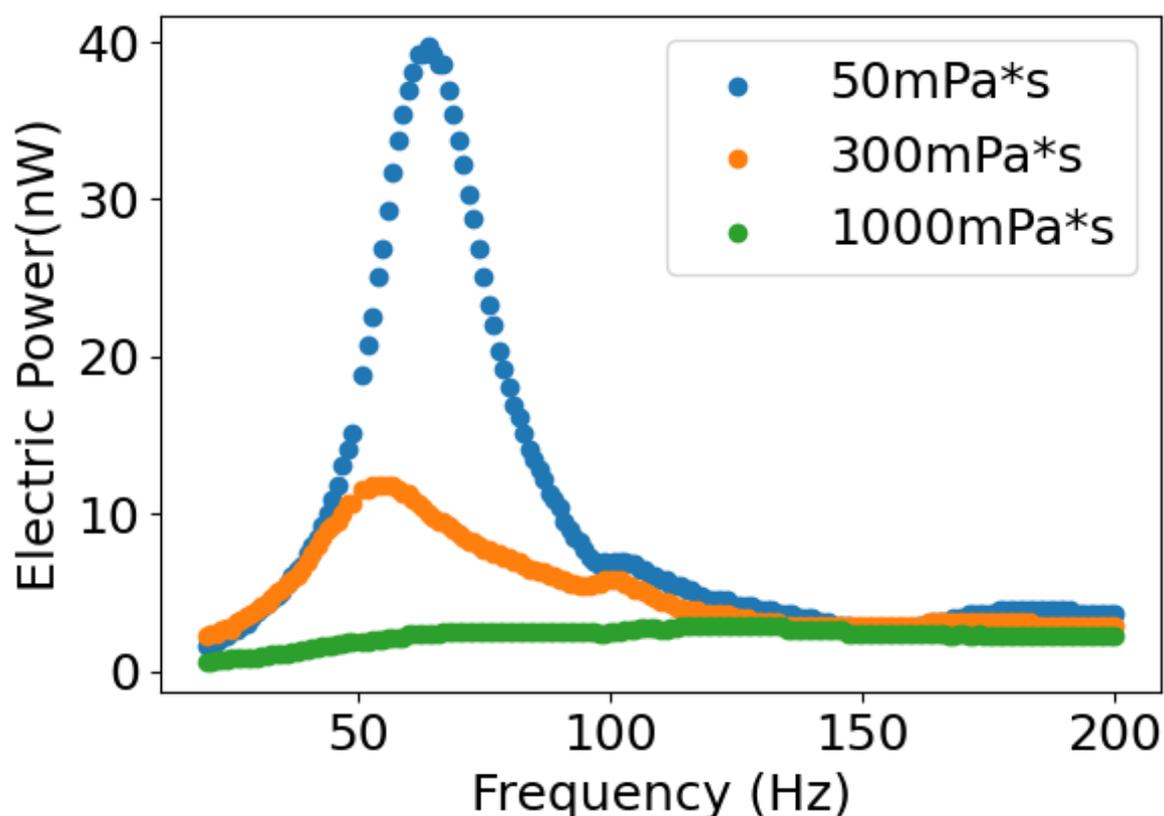


図 3-14 粘度を変化させたときの出力電力の周波数特性の測定結果。

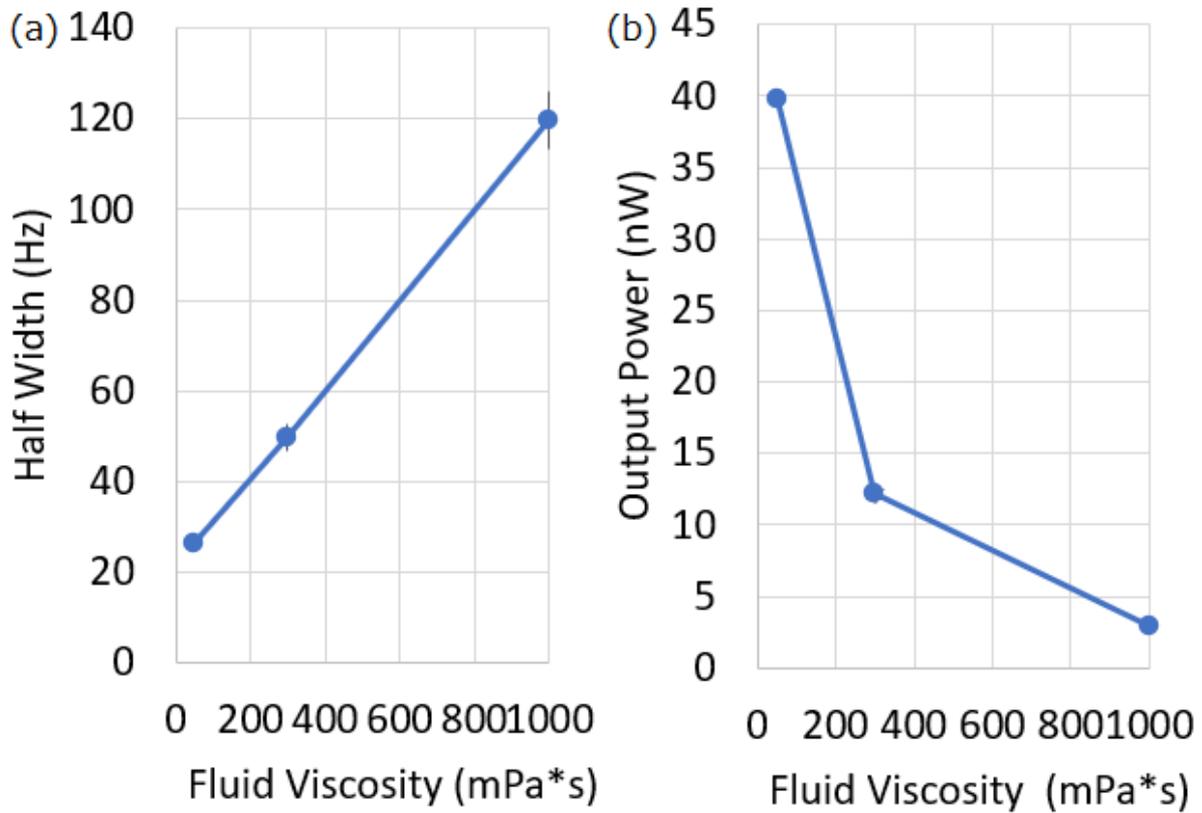


図 3-15(a)液体粘度を変化させたときの半値幅の変化(b)液体粘度を変化させたときの最大出力の変化.

ハーベスタ内の液体の粘度の増加に伴い、半値幅は広がり広帯域化の特性を示すが出力電力は大きく低下する。これは流体の壁面との摩擦が大きくなるため流体部分の変位が小さくなるためと考えられる。

3.5.3 薄膜による影響

本項では、設計時に設定するパラメータの一つである薄膜を変化させた際の出力への影響を調査する。圧電素子には PVDF を用いたセンサ(LDT1-028K, TE Connectivity)を用いた。液体は粘度が $1 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ の液体である水を用いる。両端に固定する薄膜は 15 , $50 \mu\text{m}$ の PU 薄膜, $100 \mu\text{m}$ の PET 薄膜, $3000 \mu\text{m}$ のアクリル板の 4 種類を用いて比較を行う。液体質量は 3.3 g でデバイスを作製した。加振加速度は 10 m/s^2 とし、共振周波数が含まれる $20\sim 250 \text{ Hz}$ の範囲を 1 Hz 刻みで測定した。出力電力の周波数特性の測定結果を図 3-16 に示す。

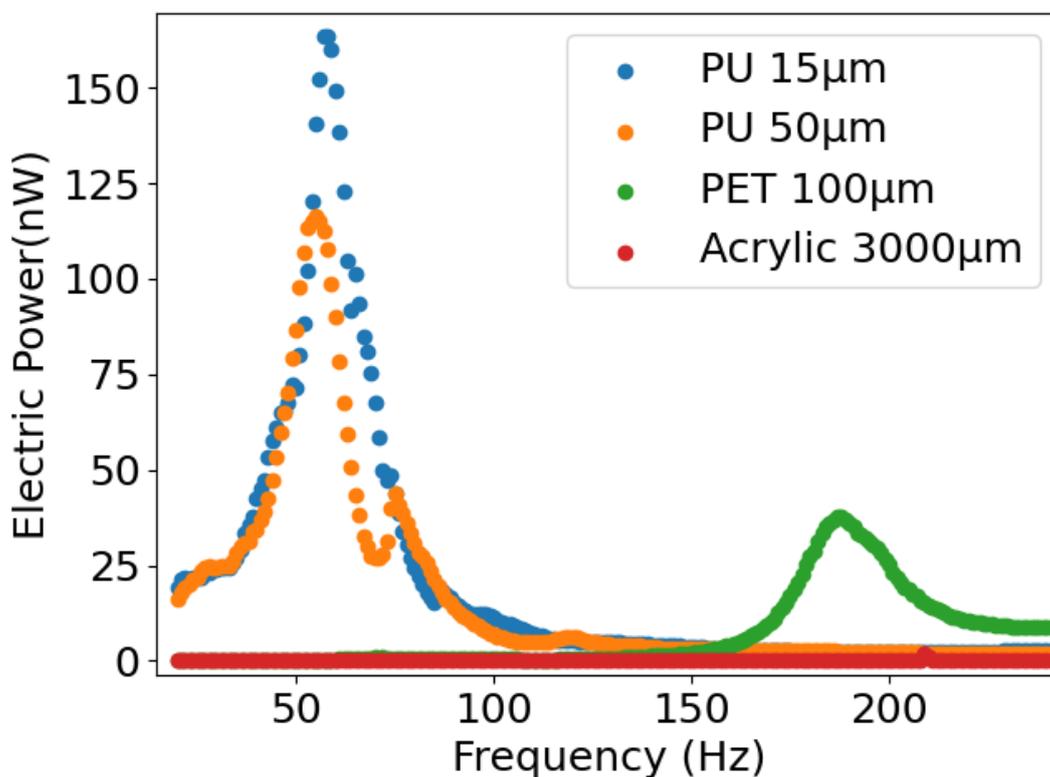


図 3-16 構造の薄膜を変化させたときの出力電力の周波数特性の測定結果。

4 種類の薄膜を用いることで、出力の周波数特性が変化する。薄膜の物性値 [48] と厚みによって薄膜のばね定数を算出した。もっとも変形が大きいと考えられる $15 \mu\text{m}$ の薄膜で封止した場合には、共振周波数は 57 Hz となり、その際の出力は 163 nW となった。一方、最も変形しにくいと考えられる $3000 \mu\text{m}$ の厚みのアクリル板によって封止した場合には、共振周波数は 233 Hz となり、その際の出力は 1.04 nW と小さい値になった。

それぞれの薄膜使用時のばね定数を求め、半値幅と最大出力の関係について図 3-17 に示す。

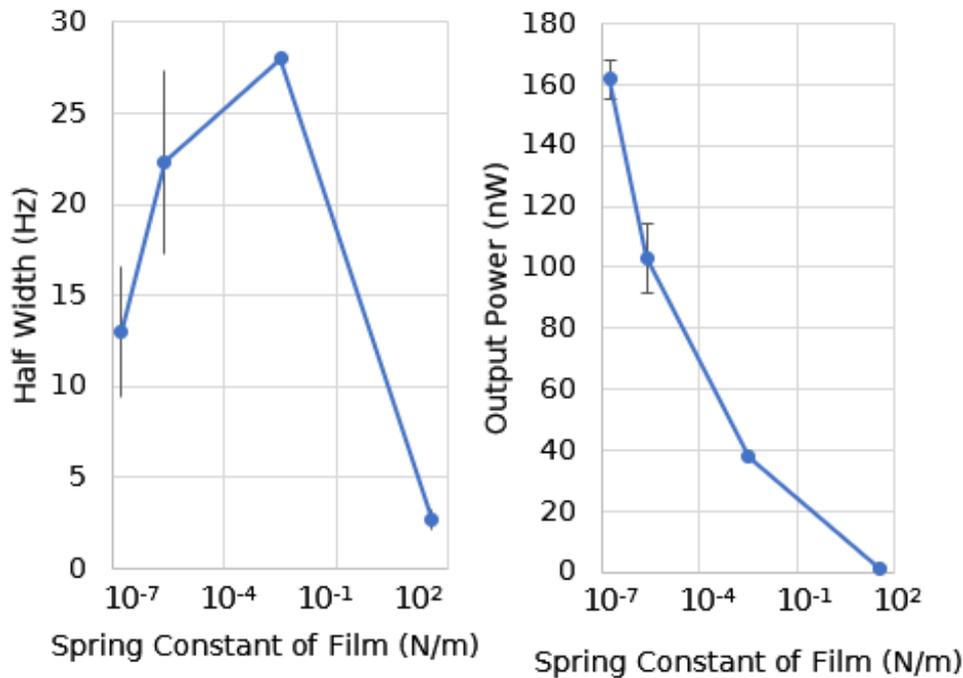


図 3-17(a)薄膜を変化させたときの半値幅の変化(b)薄膜を変化させたときの最大出力の変化。

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。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。

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、流速がある程度大きい場合には、流れが乱流になるため速度の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。

3.6 おわりに

本章では、デバイスの試作、評価を行った。デバイスの試作を行い、インピーダンス整合を行って出力電力の測定を行い、設計パラメータを変更して作製してデバイスを作成して、出力に与える影響を実験的に調査した。

構造への流体の封止方法については、粘度が大きい流体(50 mPa*s 以上)の場合には構造内部に流体を入れて、上部から薄膜を固定することで内部に流体を封止した。一方、低粘度の流体においては、液体中で筐体と薄膜を固定することで、気泡の発生を防ぎ、封止液体量が均一になるように流体を内部に封止可能である。

試作したデバイスで 10 m/s^2 の加振条件で出力を測定したところ、 $1 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ の流体を 13.3 g 封止した場合に最大出力 $0.5 \mu\text{W}$ 、半値幅 26 Hz の出力が得られた。

設計パラメータについて、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ことが分かった。

第4章 2 質点系モデルによるシミュレーション

4.1 はじめに.....	48
4.2 質点系によるモデルの作製.....	49
4.2.1 2質点系モデルのシミュレーション方法.....	49
4.2.2 各係数のシミュレーションによる算出.....	50
4.2.3 Simulink によるモデルの作製.....	51
4.3 シミュレーション結果.....	53
4.3.1 各係数のシミュレーション結果.....	53
4.3.2 加振シミュレーション結果.....	58
4.3.3 出力増加方法の検討.....	64
4.4 おわりに.....	66

4.1 はじめに

本章では 3 次元有限要素法によりパラメータの算出をして，2 質点系モデルを用いることでシミュレーションを行う．作製したモデルを用いて，より出力を増加する構造を検討する．4.2 で既存の 2 質点系モデルを用いる方法を示し，4.3 で作成したモデルを用いて出力の推定を行う．また，出力を増加するための構造について検討する．

4.2 2質点系によるモデルの作製

4.2.1 2質点系モデルのシミュレーション方法

本研究が対象とする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、1.4で示した通り、先行研究により2質点系モデルによって簡易なモデルが作成されている [19]。一方、モデルのパラメータについては、質量やばね定数を除く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ることができるが、デバイスを製作する前に推定して出力を予測することは未だできていない。本研究ではデバイスの作製前に有限要素法を用いたシミュレーションにより出力の推定を行ったが、この手法は3次元モデルにおける流体構造連成解析を、直接時間積分法を用いて計算しているため、計算量が大きくデバイスの形状を変えた時等の出力特性の推定を行うことは難しい。

従って、先行研究で使用されている計算量の少ない2質点系モデルを使用し、有限要素法による3次元モデル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。

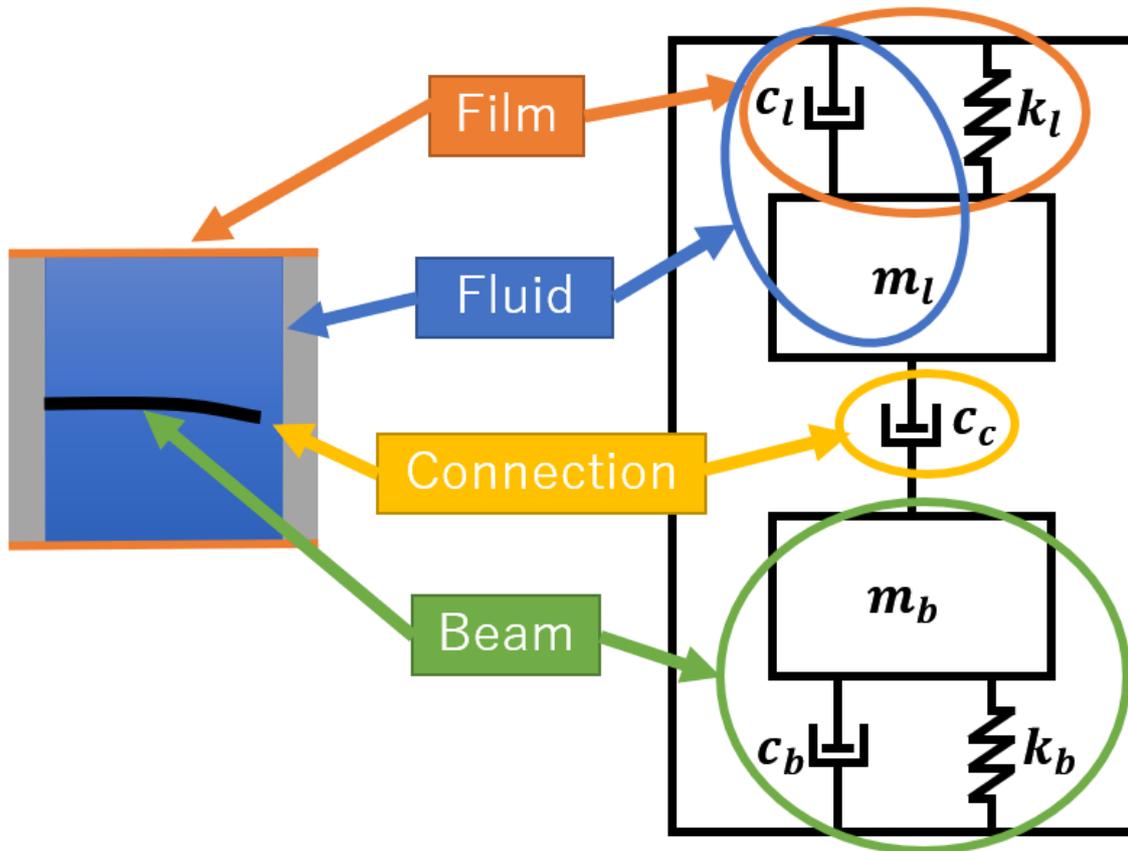


図 4-1 2質点系モデルで表した各係数と構造の対応関係。

特に、片持ち梁は1質点系で表されることが分かっており、物性や実験結果から m_b , c_b , k_b は計算することができる。同様に、材料力学を用いることで薄膜部分のばね定数である k_l も物性や実験結果から計算することができる。一方、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。各係数の計算方法については次項で述べる。

各係数を算出し、その値を用いてシミュレーションを行う。シミュレーションは3次元モデルを用いた時と同様に、各周波数において時間領域でシミュレーションを行うことで出力を推定する。シミュレーションはSimulinkによって行う。

4.2.2 各係数のシミュレーションによる算出

前項で述べた c_l と c_c の2つの係数を、流体構造連成解析によって算出する。

流体と構造に接触して流れる場合には抵抗力が発生する。流体と構造にはたらく抵抗力はストークスの抵抗則とニュートンの抵抗則の2つの抵抗則によって決まる。また、それぞれの抵抗則の適用範囲はレイノルズ数によって決定される。

ストークスの抵抗則はレイノルズ数の小さな流れの場合に適用される。抵抗力は流体の速度と粘性係数に比例した力となる。抵抗係数を C_S 、粘性係数を μ として、流体の速度が v 、流体と構造の接触面積が S のとき、抵抗 F は式(4-1)で表される。

$$F = C_S \mu v S \quad (4-1)$$

一方、ニュートンの抵抗則はレイノルズ数の大きな流れの場合に適用される。抵抗力は速度の2乗に比例し、流体の密度に比例した力となる。抵抗係数を C_N 、流体密度を ρ として、流体の速度が v 、流体と構造の接触面積が S のとき、抵抗 F は式(4-2)で表される。

$$F = C_N \frac{\rho v^2}{2} S \quad (4-2)$$

従って流体と構造の間には速度や流体の物性に依存した抵抗力が働くが、その関係はレイノルズ数に依存している。本研究で扱う筐体に片持ち梁を設置したような複雑な構造においては、流れを解析的に求めることが難しい。そこで、本研究では流体と構造の間に発生する抵抗力を、流体構造連成解析を用いて数値的に求める。

● c_l のシミュレーションによる算出

c_l は流体と筐体間に発生する抵抗力である。片持ち梁を含まない筐体について、流体に荷重をかけた定常解析を行う。定常解析を行うことで、流体部分に与えられた荷重と流体と構造間に発生する抵抗力が平衡になる力を求め、 c_l を求める。

● c_c のシミュレーションによる算出

c_c は流体と片持ち梁間に発生する抵抗力である。片持ち梁を含む筐体について、流体に荷重をかけた定常解析を行う。 c_l を求めたシミュレーションを用いて、流体と筐体間に発生する抵抗力を差し引く。片持ち梁の変形から、流体が片持ち梁に与える抵抗力を求め、 c_c を求める。

4.2.3 Simulink によるモデルの作製

Simulink はブロック線図モデルからコードを生成し、シミュレーションを行うソフトウェアである。MATLAB から Simulink にパラメータを設定してシミュレーションを実行し、結果にアクセスすることでシミュレーション結果を得ている。シミュレーションに用いた PC の仕様を表 4-1 に示す。

表 4-1 計算に使用した PC の仕様

CPU	Intel® Core™i7-7700K CPU @4.2GHz
DRAM	16GB
OS	Microsoft Windows 10 Education
MATLAB	R2020b 9.9
Simulink	R2020b 10.2

流体に関連する係数である c_l , c_c を、それぞれ速度 v の関数としてそれぞれ $c_l(v)$, $c_c(v)$ と表し、流体の変位を x_l , 片持ち梁の変位を x_b とすると、運動方程式は式(4-3)で表せる。

$$\begin{cases} m_l \ddot{x}_l + c_l(\dot{x}_l) + k_l x_l + c_c(\dot{x}_l - \dot{x}_b) = m_l a \cos(\omega t) \\ m_b \ddot{x}_b + c_c(\dot{x}_b - \dot{x}_l) + c_b \dot{x}_b + k_b x_b = m_b a \cos(\omega t) \end{cases} \quad (4-3)$$

運動方程式から Simulink で作成したブロック線図を図 4-2 に示す。1/s のブロックは積分要素を示し、三角の形状のブロックは比例要素を示す。Input から周波数入力を行い、片持ち梁の変位をシミュレーションする。 $c_l(v)$ と $c_c(v)$ はそれぞれ前項で示した流体による摩擦係数であり、速度に依存した数値であるため、有限要素法による連成解析で得られた値を用いる。

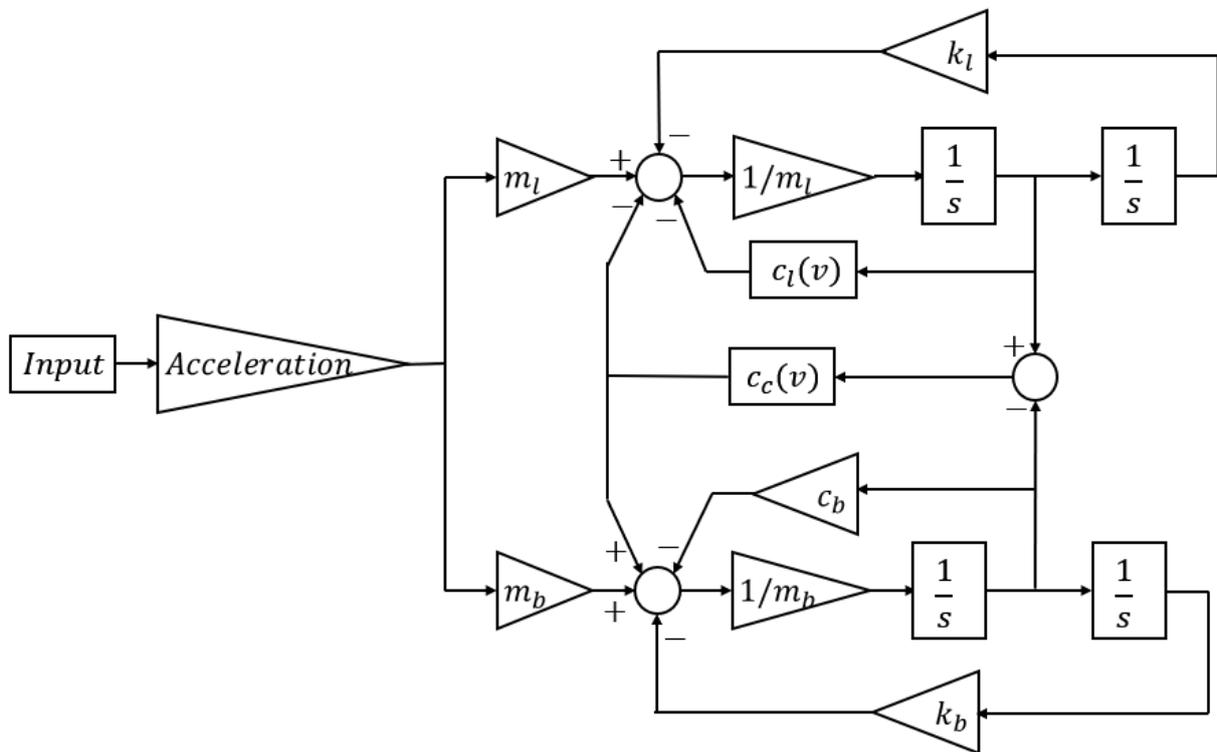


図 4-2 Simulink で作成したブロック線図

4.3 シミュレーション結果

4.3.1 各係数のシミュレーション結果

- c_l のシミュレーションによる算出

c_l は流体と筐体間に発生する抵抗力である。片持ち梁を含まない筐体について、流体に荷重をかけた定常解析を行った。荷重付加時の流速のシミュレーション結果の例を図 4-3 に示す。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。

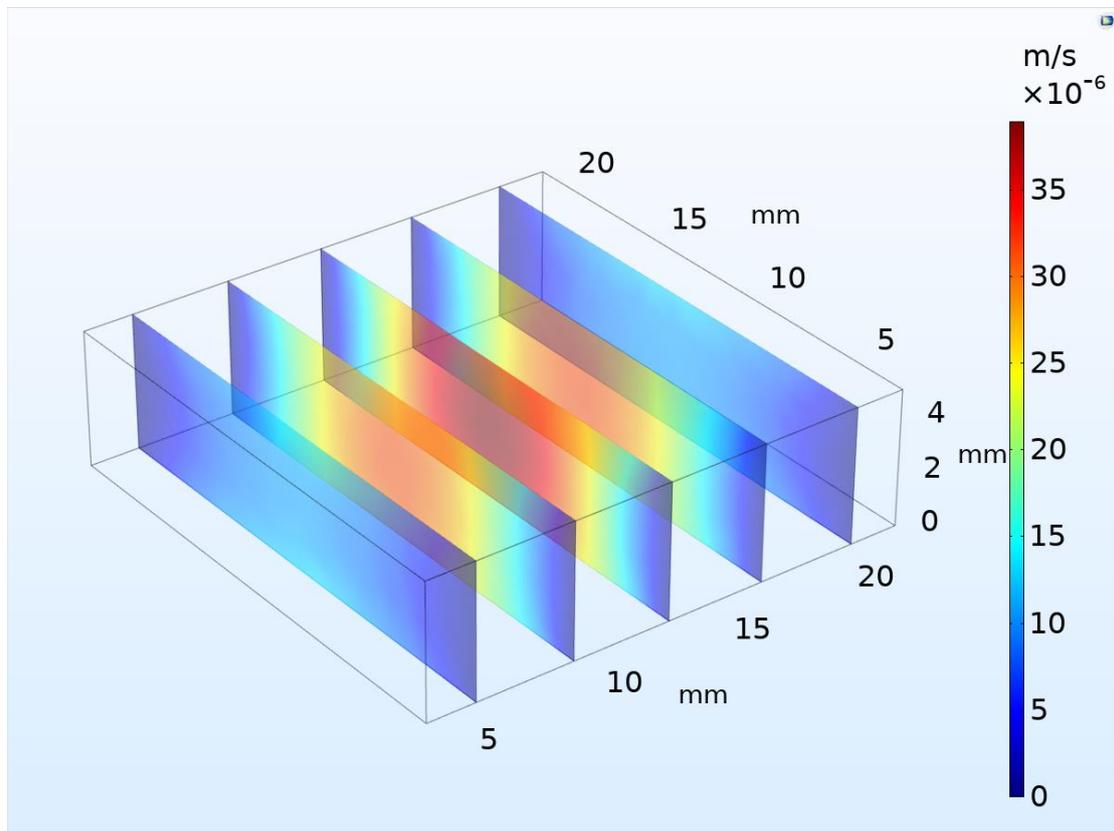


図 4-3 荷重付加時の流速のシミュレーション結果.

流体にかける荷重を変化させてシミュレーションを行う。今回は流体の粘度、流体部分の質量、流体の密度を変化させた場合の流速と摩擦力の関係についてパラメトリック解析を行った。流体粘度については本研究で用いた範囲である 1~1000 mPa*s のものを用い、流体部分の質量も同様に 3.3~13.3 g で変化させた。また、流体密度は本研究の実験では 1000 kg/m³ 程度のものを用いたが、シミュレーションでは 1000~4000 kg/m³ の範囲で変化させた。

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図 4-4 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く。

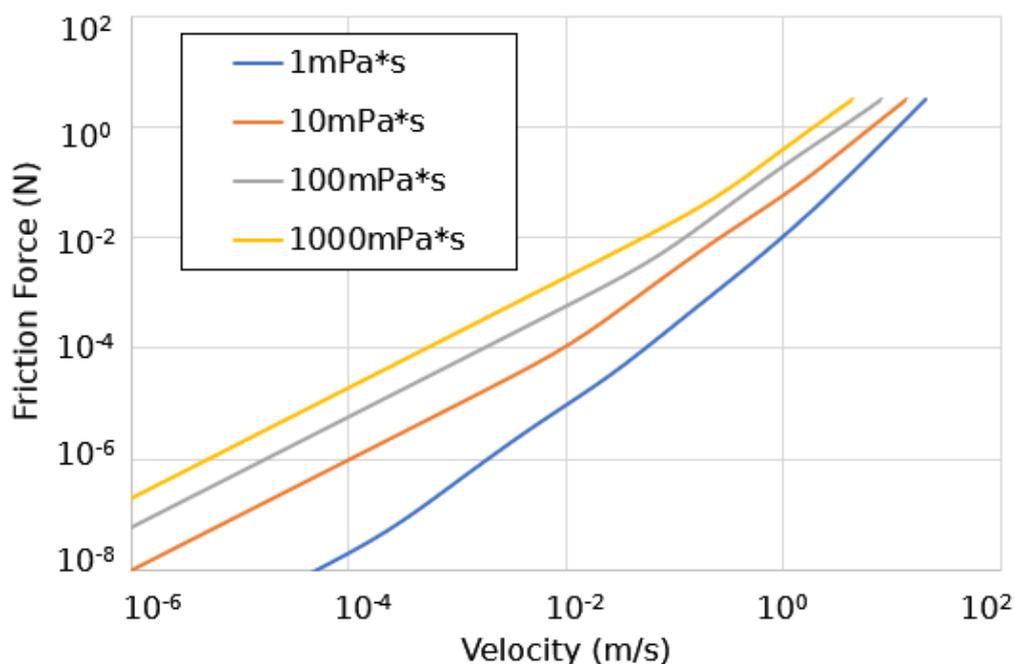


図 4-4 流速と摩擦力についての、液体粘度のパラメトリック解析の結果。

液体質量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図 4-5 に示す。それぞれの質量において、流速が小さい領域では流体速度に比例した摩擦力が働き、流速が大きい領域では流速の 2 乗に比例した力が大きくなる。また、流速に対する摩擦力は流速の領域によらず流体質量にほぼ比例している。

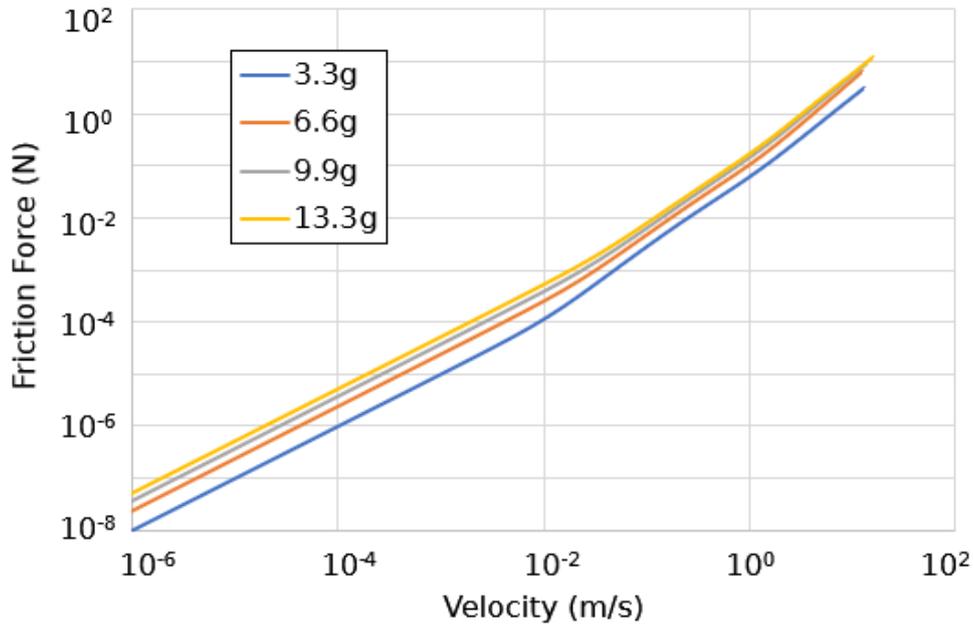


図 4-5 流速と摩擦力についての、流体質量のパラメトリック解析の結果.

液体密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図 4-6 に示す. それぞれの密度において、流速が小さい領域では流体速度に比例した摩擦力が働き、流速が大きい領域では流速の 2 乗に比例した力が大きくなる. 流体密度は流速が大きい領域で影響し、2 乗項の係数に比例する.

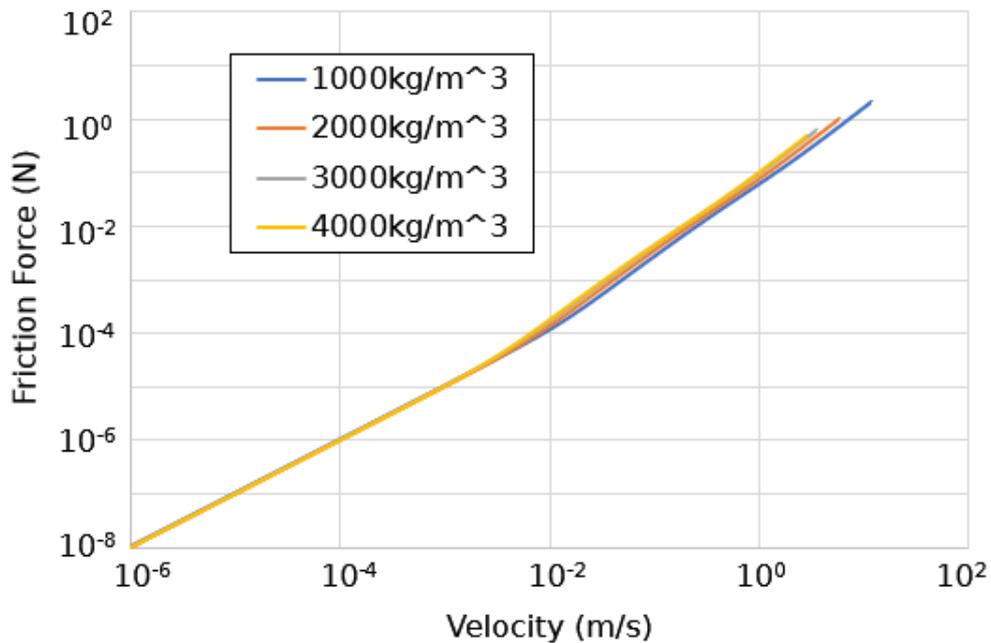


図 4-6 流速と摩擦力についての、流体密度のパラメトリック解析の結果.

● c_c のシミュレーションによる算出

c_c は流体と片持ち梁の間に発生する抵抗力である。片持ち梁を含む筐体について、流体に荷重をかけた定常解析を行う。 c_l を求めたシミュレーションを用いて、流体と筐体の間に発生する抵抗力を差し引く。片持ち梁の変形から、流体が片持ち梁に与える抵抗力を求め、 c_c を求める。

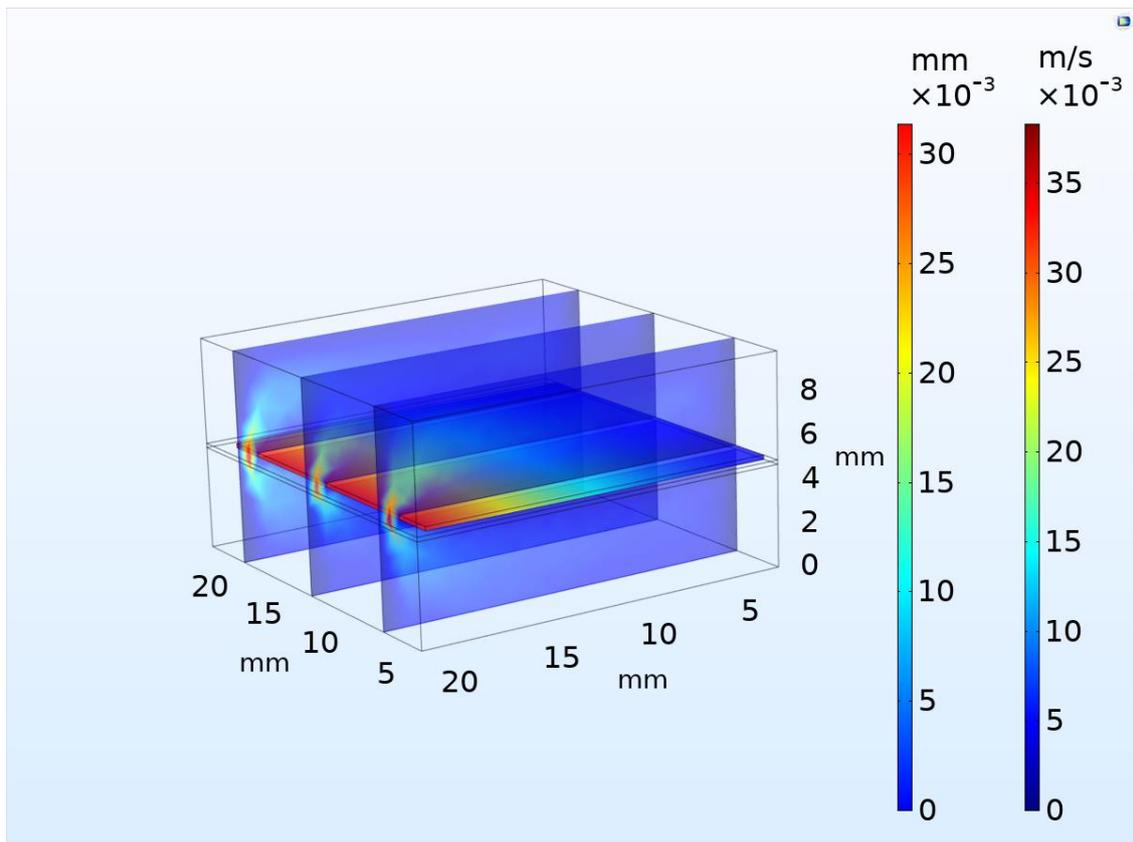


図 4-7 荷重付加時の流速と片持ち梁の変形のシミュレーション結果.

粘度を変化させて流体速度に対して発生する摩擦力の関係を図 4-8 に示す。粘度が大きいほど、同じ流速の時に片持ち梁に与えられる抵抗力が大きくなる。また、速度に比例する領域と速度の 2 乗に比例する領域があり、速度に比例する領域において、抵抗力は粘度にほぼ比例した抵抗力が発生する。これは、流速が大きくなるに従い流れが層流から乱流に代わり、流体と構造の間に発生する抵抗力が変化するためと考えられる。

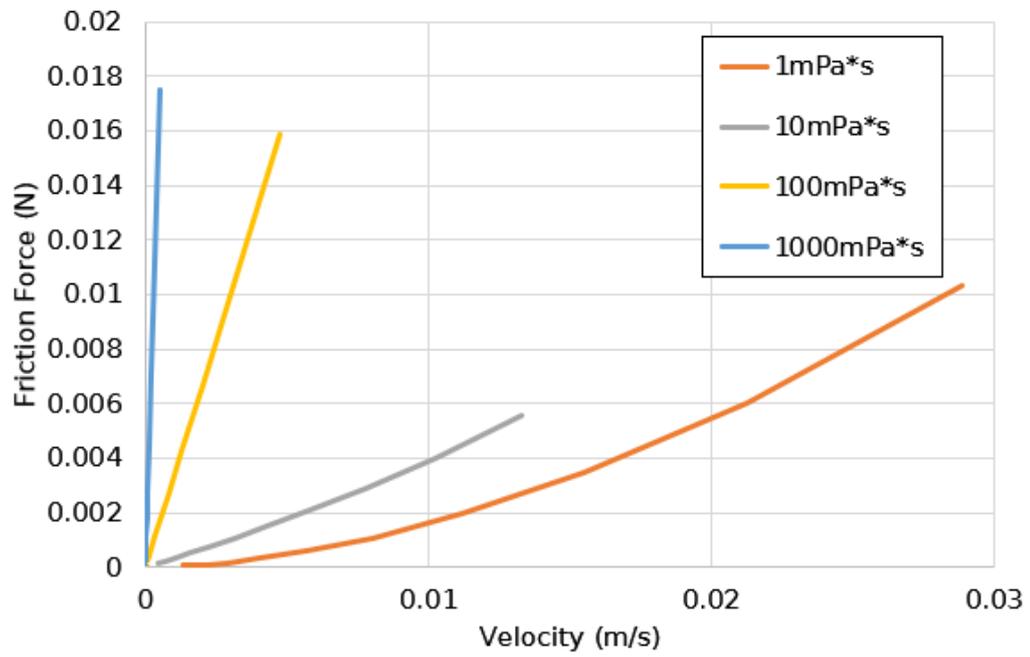


図 4-8 流速と片持ち梁に与えられる抵抗力の、粘度のパラメトリック解析結果.

4.3.2 加振シミュレーション結果

前項で求めた，流体と管体間に発生する抵抗係数 c_l と流体と片持ち梁間に発生する抵抗係数 c_c 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/s^2 とし，共振周波数が含まれる $20\sim 300 \text{ Hz}$ の範囲を 1 Hz 刻みでシミュレーションを行う．

まず，粘度を $1\sim 1000 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ で変化させた場合のシミュレーションを行う．流体粘度が $1 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ ， $50 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ ， $1000 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ の場合における，共振時の片持ち梁の変位と流体の変位を図 4-9 に示す．

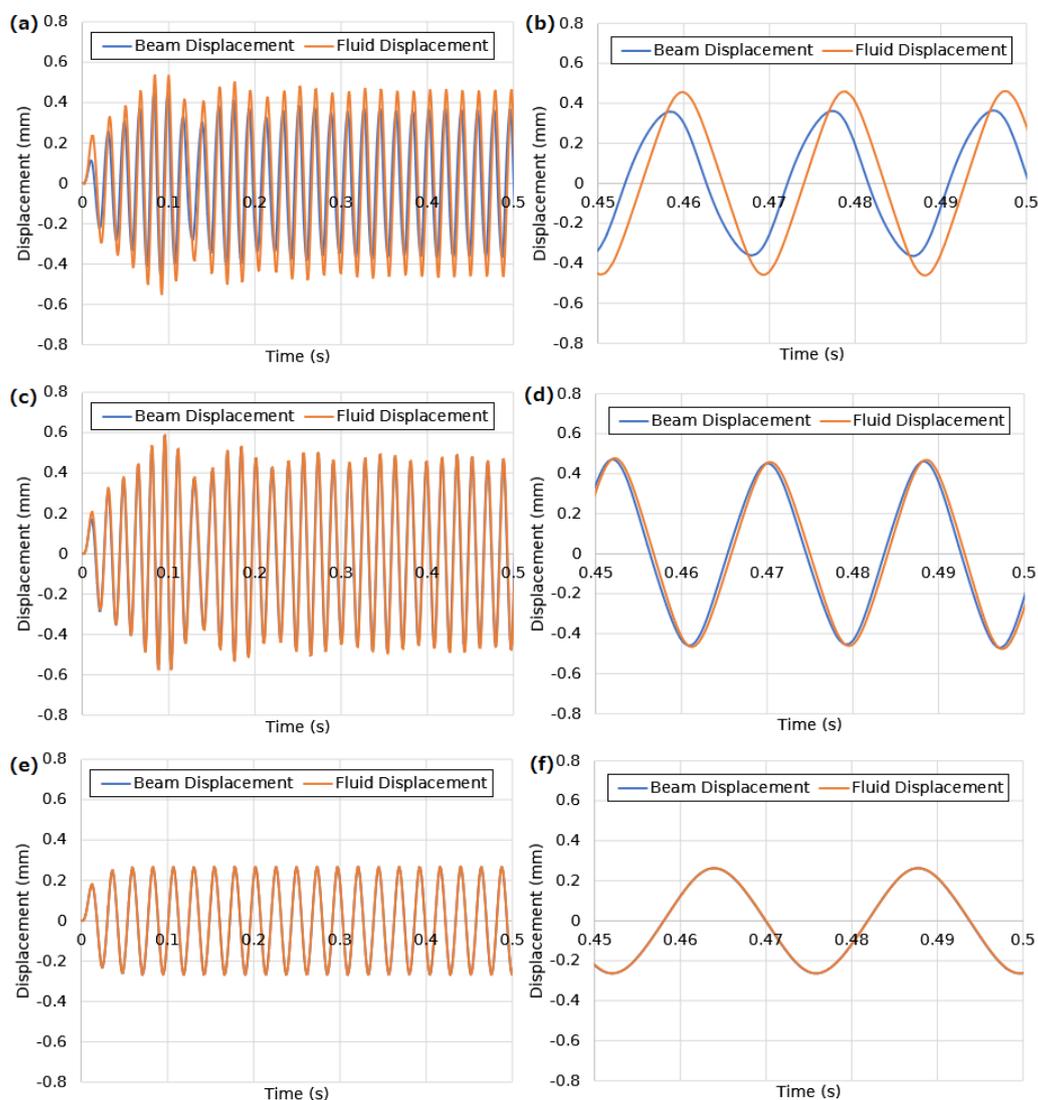


図 4-9 (a)流体粘度が $1 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ のときのシミュレーション結果と(b)その拡大図．(c)流体粘度が $50 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ のときのシミュレーション結果と(d)その拡大図．(e)流体粘度が $1000 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ のときのシミュレーション結果と(f)その拡大図．

加振シミュレーション結果の周波数応答を図 4-10 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、変位がより伝達されている。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。

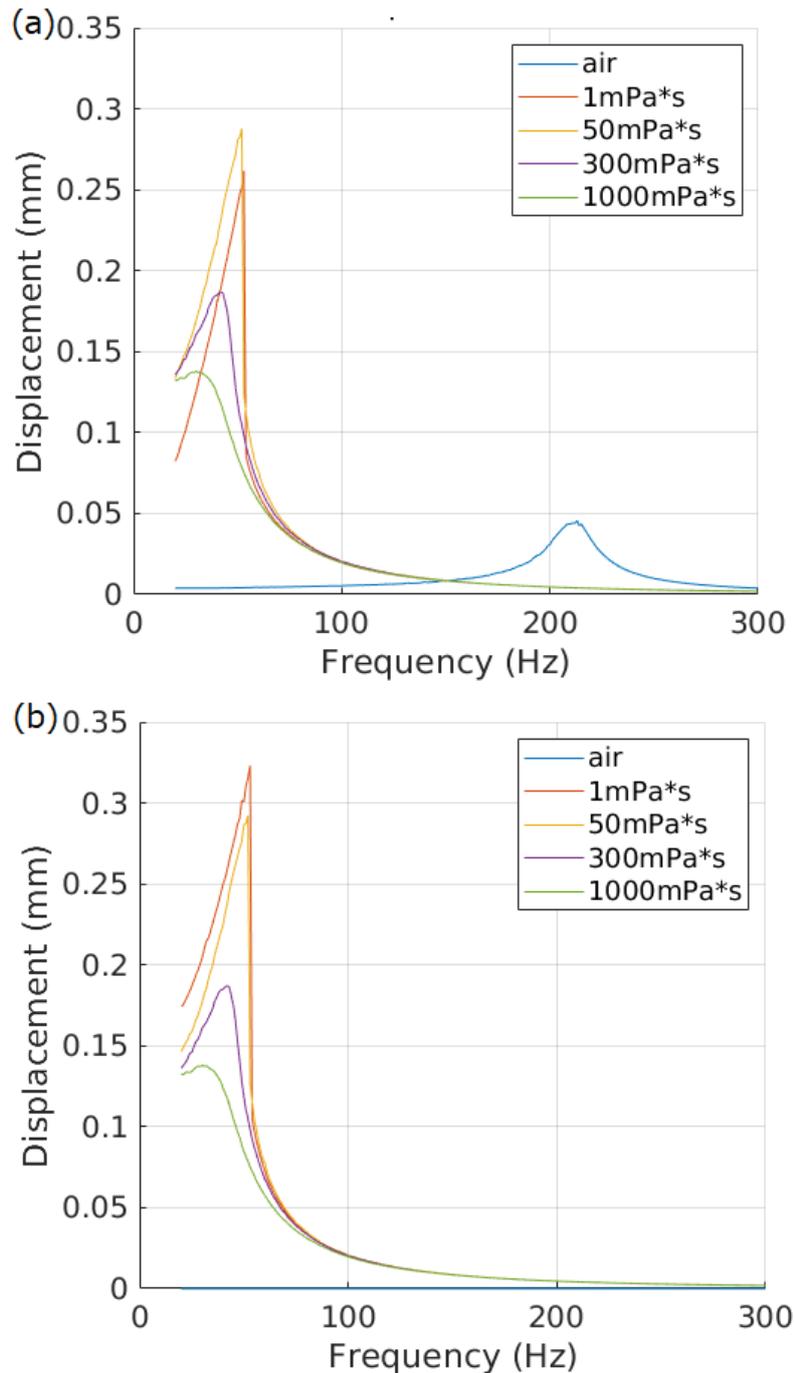


図 4-10 流体粘度を変化させた場合の(a)片持ち梁変位の周波数応答のシミュレーション結果と(b)流体変位の周波数応答のシミュレーション結果。

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図 4-11 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 100%に近い値の振動振幅で振動が発生する。

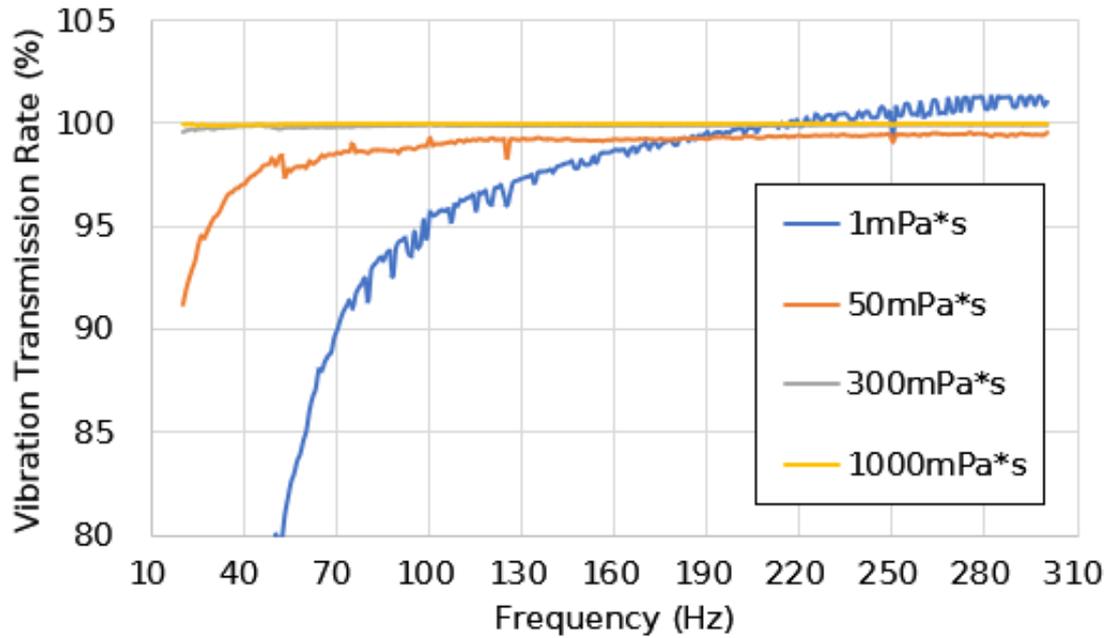


図 4-11 流体粘度を変化させた場合の流体の振動に対する片持ち梁の振動の割合のシミュレーション結果.

次に、流体質量を変更した場合のシミュレーション結果を図に示す。液体質量は 3.3g, 6.6g, 9.9g, 13.3g の 4 種類とし、流体粘度は 50 mPa*s としてシミュレーションを行った。流体質量が 3.3g, 6.6g, 9.9g の場合における、共振時の片持ち梁の変位と流体の変位を図 4-12 に示す。質量の増加に伴い、共振周波数が低下して振動振幅が増加する。一方、粘度は一定であるため、流体の振動振幅に対する片持ち梁の振動振幅の割合は同程度になっている。

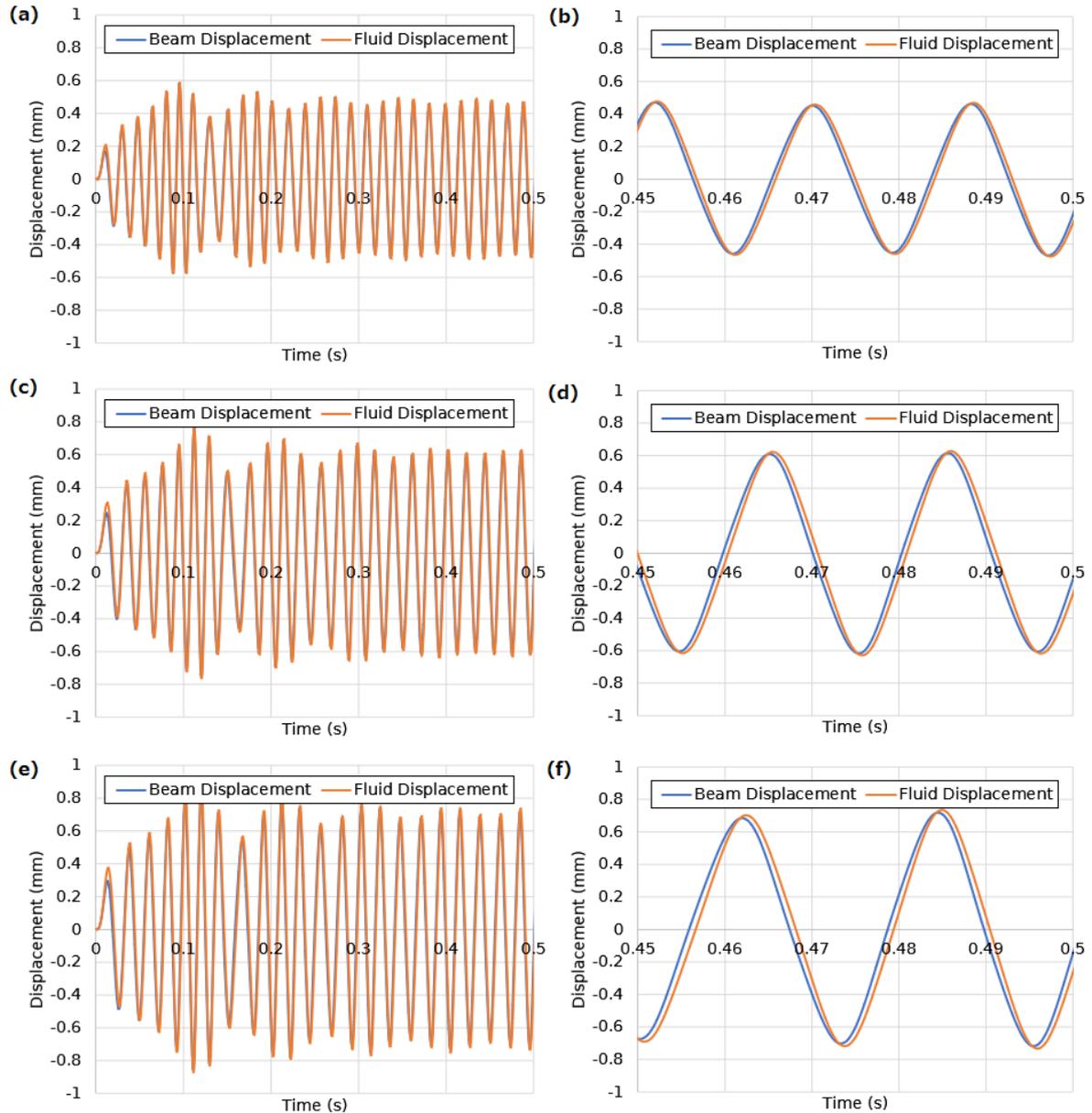


図 4-12 (a)流体質量が 3.3g のときのシミュレーション結果と(b)その拡大図. (c) 流体質量が 6.6g のときのシミュレーション結果と(d)その拡大図. (e) 流体質量が 9.9g のときのシミュレーション結果と(f)その拡大図.

加振シミュレーション結果の周波数応答を図 4-13 に示す。質量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、変位がより伝達されている。

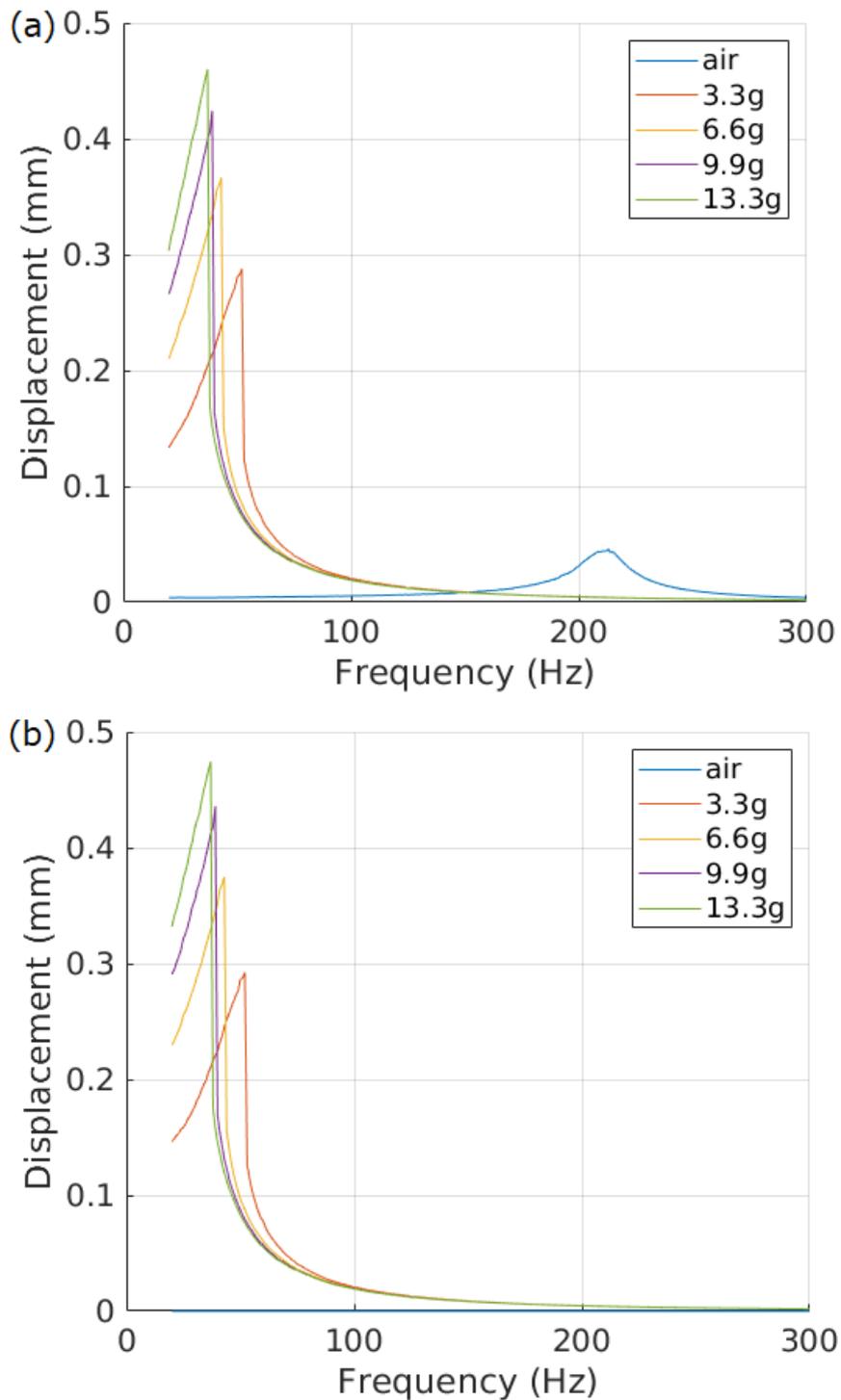


図 4-13 流体質量を変化させた場合の(a)片持ち梁変位の周波数応答のシミュレーション結果と(b)流体変位の周波数応答のシミュレーション結果。

流体質量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図4-14に示す。流体の振動振幅によらず、周波数に依存した一定の割合となっている。また、低周波数において割合が低下するのは、粘度による影響と考えられる。

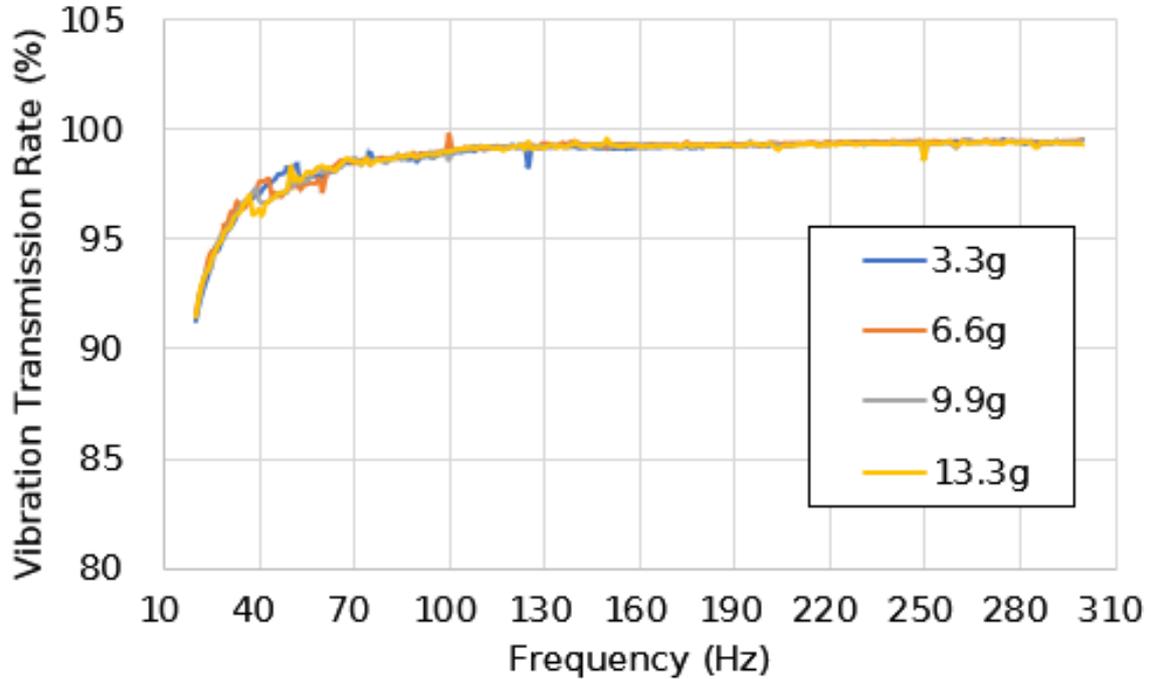


図 4-14 流体質量を変化させた場合の流体の振動に対する片持ち梁の振動の割合のシミュレーション結果.

4.3.3 出力増加方法の検討

前項より、流体の粘度を高めると流体部分の変位を片持ち梁に伝達しやすくなる一方、壁面との摩擦により振動が抑制されるため、出力はトレードオフの関係があることが分かった。また、液体質量を増加することによって出力が増加するが、同時に体積が増加し粘性抵抗によるエネルギー損失が増加することが分かった、

従って、よりエネルギー損失を減らして効率よく薄膜の振動を伝達するためには、流体と壁面での摩擦によるエネルギー損失を減らすことが必要となる。そのための提案として、流体体積を減らすことによって壁面との接触部分を減らすことや、円状などのより流体摩擦が少ない構造 [49]を取り入れることが有効である。また、得られた減衰の少ない振動を効率よく片持ち梁に伝達するためには、高い粘度の流体を用いることが有効である。流体体積を減らすことによって振動の減衰を減らした場合には、錘を薄膜に付加することで質量を補完することも有効であると考えられる。

錘として質量を補完したシミュレーションを行った。想定する構造のイメージを図 4-15 に示す。流体封止部分の高さを、実験で作成した 10 mm から 1 mm ずつ減少させたところ、4 mm まで減少することができ、そのときの流体質量は 1.3 g となった。

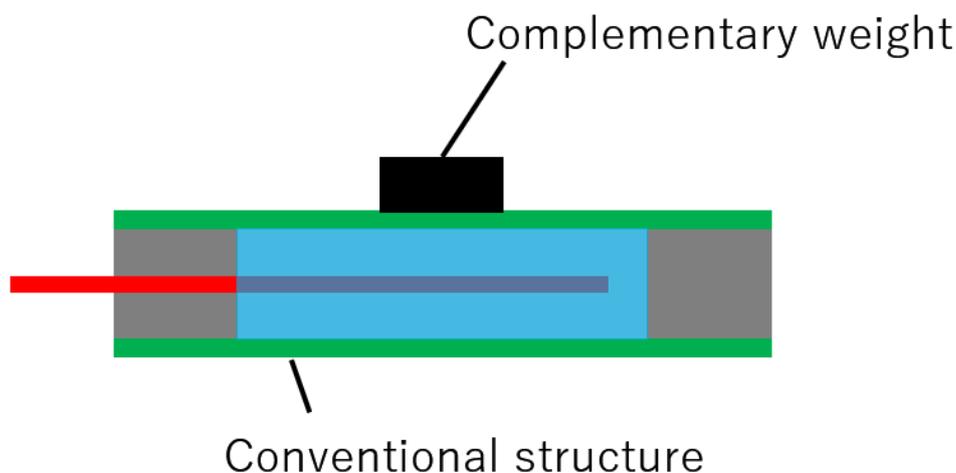


図 4-15 液体の封止量を封止して錘で質量を補完した構造のイメージ図。

シミュレーション結果を表 4-2 に示す。加振時の最大変位はピーク時で 1.5 倍に増加する。一方、半値幅は大きく変化せず、出力は周波数に依らず幅広い周波数で上回る結果を示した。変位が 1.5 倍となるため、最大出力は約 2.3 倍まで増加することがシミュレーションにより分かった。

表 4-2 液体質量を減らした場合の出力特性の変化.

	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

4.4 おわりに

本章では3次元有限要素法によりパラメータの算出をして、2質点系モデルを用いることでシミュレーションを行った。

モデルを作製し、より出力を増加する構造を検討するために、流体の粘度、封止量について変化させたシミュレーションを行った。

流体の粘度を高めると流体部分の変位を片持ち梁に伝達しやすくなる一方、壁面との摩擦により振動が抑制され、出力はトレードオフの関係があることが分かった。また、液体質量を増加することによって出力が増加するが、同時に体積が増加し粘性抵抗によるエネルギー損失が増加することが分かった。

従って、よりエネルギー損失を減らして効率よく薄膜の振動を伝達するためには、流体体積を減らすことで壁面との摩擦抵抗を減らすと同時に、高い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補完することが有効である。

第5章 結論

5.1 結論.....	68
5.2 今後の展望.....	69

5.1 結論

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。

1. 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 $1 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ 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 倍となった。
2. 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/s^2 の加振条件で出力を測定したところ、最大出力 $0.5 \mu\text{W}$ 、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。
3. 2 質点系モデルを用いて、出力を増加する方法を検討した。
 - 流体の粘度は、流体から片持ち梁への変位の伝達効率と、壁面との摩擦による振動減衰の 2 点に影響し、実験で作成した寸法において、 $50 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ の粘度で出力が最大になる。
 - 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。
 - 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 倍に増加し、出力は 2.3 倍に増加することが分かった。

5.2 今後の展望

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が明らかになった。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や構造のさらなる工夫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。

謝辞

本研究を進めるにあたり，学部 4 年生から修士課程 2 年までの 3 年間ご指導頂いた卒業指導教員の伊藤寿浩教授と人間環境モニタリング研究室の高松誠一准教授に心より御礼申し上げます。研究や実験の進め方を教えていただき，助言を多くいただきました。ありがとうございました。

博士課程学生の領木慎一様，山本道貴様には研究内容や学会発表など，多くの場面でご指導いただきました。ありがとうございました。

人間環境モニタリング研究室の皆様には，日常の議論を通じて多くの知識や示唆を頂き，日常生活でも様々な場面で大変お世話になりました。ありがとうございました。

参考文献

- [1] R. Ahmad , S. Kamaruddin, “ A review of condition-based maintenance decision-making,” *European J. Industrial Engineering*, Vol. 6, No. 5, 2012.
- [2] J. Medina-García, T. Sánchez-Rodríguez, J. A. G. Galán, A. Delgado, F. Gómez-Bravo , R. Jiménez, “A Wireless Sensor System for Real-Time Monitoring and Fault Detection of Motor Arrays,” *Sensors*, 2017.
- [3] Z. Chen , W. Li , “Multisensor Feature Fusion for Bearing Fault Diagnosis Using Sparse Autoencoder and Deep Belief Network, ” *IEEE TRANSACTIONS ON INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT*, VOL. 66, NO. 7, 2017.
- [4] M. Orman , . C. T. Pinto, “Acoustic analysis of electric motors in noisy industrial environment,” *New Perspectives in Measurements, Tools and Techniques for Industrial Applications*, 2013.
- [5] F. Al-Badour, M. Sunar , L. Cheded, “Vibration analysis of rotating machinery using time-frequency analysis and wavelet techniques,” *Mechanical Systems and Signal Processing* 25 ,2083-2101, 2011.
- [6] A. Soualhi, G. Clerc, H. Razik, M. E. badaoui , F. Guillet, “Hidden Markov Models for the Prediction of Impending Faults,” *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS*, VOL. 63, NO. 5, 2016.
- [7] F. W. J.-w. L. M. H. D.-h. G. Xin-yan Xiong, “Vibration monitoring system of ships using wireless sensor networks,” *IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*, 2014.
- [8] H. Sharma, A. Haque , Z. A. Jaffery, “Solar energy harvesting wireless sensor network nodes: A survey,” *JOURNAL OF RENEWABLE AND SUSTAINABLE ENERGY* 10, 023704, 2018.
- [9] H. Park, D. Lee, G. Park, S. Park, S. Khan, J. Kim , W. Kim, “Energy harvesting using thermoelectricity for IoT (Internet of Things) and E-skin sensors,” *Journal of Physics: Energy*, Volume 1, Number 4, 2019.
- [10] Y. Xin, X. Li, H. Tian, C. Guo, C. Qian, S. Wang , C. Wang, “Shoes-equipped piezoelectric transducer for energy harvesting: A brief review,” *FERROELECTRICS*, VOL. 493, 12-24, 2016.
- [11] N. Shenck , J. Paradiso, “Energy scavenging with shoe-mounted piezoelectrics,” *IEEE Micro*, Volume: 21 , Issue: 3 , 2001.
- [12] I. KANNO, “Electric Power Generation from Environmental Vibration (Vibration Energy Harvesting),” *Journal of The Surface Finishing Society of Japan*, Volume 67,

- Issue 7, 2016.
- [13] N. M. D. K. M. I. S. Hidetoshi Takahashi, “Differential pressure sensor using a piezoresistive cantilever,” *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Volume 22, Number 5, 2012.
- [14] L. E. C. Qing-Ming Wang, “Performance analysis of piezoelectric cantilever bending actuators,” *Ferroelectrics*, Vol. 215, pp. 187-213, 1998.
- [15] C. R. Bowen, H. A. Kim, P. M. Weaver, S. Dunn, “Piezoelectric and ferroelectric materials and structures for energy harvesting applications,” *Energy Environ. Sci.*, 2014, 7, 25-44, 2014.
- [16] T. Tsukamoto, Y. Umino, K. Hashikura, S. Shiomi, K. Yamada, T. Suzuki, “A Polymer-based Piezoelectric Vibration Energy Harvester with a 3D Meshed-Core Structure,” *J. Vis. Exp.* (144), e59067, doi:10.3791/59067, 2019.
- [17] C. Brown, H.A.Kim, P. Weaver, S. Dunn, “Piezoelectric and ferroelectric materials and structures for energy harvesting applications,” 2014.
- [18] H.-C. Song, P. Kumar, D. Maurya, M.-G. Kang, W. T. Reynolds, D.-Y. Jeong, C.-Y. Kang, S. Priya, “Ultra-Low Resonant Piezoelectric MEMS Energy Harvester With High Power Density,” *Journal of Microelectromechanical Systems*, Volume: 26, Issue: 6, 2017.
- [19] S. Ryoki, M. Yamamoto, K. Mochizuki, S. Takamatsu, T. Itoh, “Cantilever structure placed in liquid sandwiched between soft-thin membranes to realize wide bandwidth harvester,” *Appl. Phys. Lett.* 115, 183902, 2019.
- [20] A. K. Batra, A. Alomari, “Ambient Energy Sources: Mechanical, Light, and Thermal,” 著: *Power Harvesting via Smart Materials*, 2017.
- [21] Y. SUZUKI, “Electrostatic-induction-type MEMS Energy Harvester Using Electret,” *Journal of the Japan Society of Applied Electromagnetics and Mechanics*, Volume 22, Issue 3, 2014.
- [22] F. W. Fraim, P. V. Murphy, “Electrets in miniature microphones,” *The Journal of the Acoustical Society of America* 53, 1601, 2005.
- [23] B. Yang, C. Lee, W. L. Kee, S.-P. Lim, “Hybrid energy harvester based on piezoelectric and electromagnetic mechanisms,” *J. of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS*, 9(2), 023002, 2010.
- [24] A. E. G. S. T. J. G. X.-M. C. C. A. R. Wei-Ting Chen, “Introducing an extremely high output power and high temperature piezoelectric bimorph energy harvester technology based on the ferroelectric system Bi(Me)O₃-PbTiO₃,” *Journal of Applied Physics* 128,

- 144102, 2020.
- [25] L. K. A. M. Nathan Jackson, “Flexible-CMOS and biocompatible piezoelectric AlN material for MEMS applications,” *Smart Materials and Structures* 22, 2013.
- [26] B. Yen , J. Lang, “A variable-capacitance vibration-to-electric energy harvester,” *IEEE Transactions on Circuits and Systems*, 2006.
- [27] E. G. Adam M. Wickenheiser, “Power Optimization of Vibration Energy Harvesters Utilizing Passive and Active Circuits,” *JOURNAL OF INTELLIGENT MATERIAL SYSTEMS AND STRUCTURES*, Vol. 21, 2010.
- [28] L. D. Xingqiang Zhao, Zhengguo Shang, Guoxi Luo, “A vibration energy harvester using AlN piezoelectric cantilever array,” *Microelectronic Engineering*, Volume 142, 2015.
- [29] J. Q. Y. F. D. W. B. W. Z. W. Licheng Deng, “Design and optimization of a trapezoidal beam array energy harvester with operating wide speed rang for TPMS application,” *Microsystem Technologies*, 2019.
- [30] V. B. Nan Chen, “Modeling, Simulation and Optimization of Piezoelectric Bimorph Transducer for Broadband Vibration Energy Harvesting in MultiBeam and Trapezoidal Approach,” *Journal of Materials Science Research*; Vol. 7, No. 2, 2018.
- [31] G. R. P. L. Z. Wanlu Zhou, “An efficient vibration energy harvester with a multi-mode dynamic magnifier,” *Smart Materials and Structures*, 2012.
- [32] K. P. V. Meruane, “A Broadband Vibration-Based Energy Harvester Using an Array of Piezoelectric Beams Connected by Springs,” *Shock and Vibration*, Volume 2016 , 2015.
- [33] R. K. Gupta, Q. Shi, L. Dhakar, T. Wang, C. H. Heng , C. Lee, “Broadband Energy Harvester Using Non-linear Polymer Spring and Electromagnetic/Triboelectric Hybrid Mechanism,” *Scientific Reports* volume 7, Article number: 41396, 2017.
- [34] M. Ferrari, M. Baù, M. Guizzetti , V. Ferrari, “A single-magnet nonlinear piezoelectric converter for enhanced energy harvesting from random vibrations,” *Sensors and Actuators A: Physical*, Volume 172, Issue 1, December 2011, Pages 287-292, 2011.
- [35] S.-G. K. Arman Hajati, “Ultra-wide bandwidth piezoelectric energy harvesting,” *Applied Physics Letters*, Volume 99, Issue 8 , 2011.
- [36] P. H. A. E. D. J. I. A. F. Arrieta, “A piezoelectric bistable plate for nonlinear broadband energy harvesting,” *Applied Physics Letters*, Volume 97, Issue 10, 2010.
- [37] W.-M. Z. W.-B. L. K.-M. H. K.-X. W. Z.-K. P. G. M. Hong-Xiang Zou, “A broadband compressive-mode vibration energy harvester enhanced by magnetic force intervention approach,” *Applied Physics Letters*, Volume 110, Issue 16, 2017.

- [38] Y. Wu, A. Badel, F. Formosa, W. Liu, A. Agbossou, "Nonlinear vibration energy harvesting device integrating mechanical stoppers used as synchronous mechanical switches," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures* 2014, Vol. 25(14) 1658-1663, 2014.
- [39] D. G. E. L. C. R. A. BADEL, "Efficiency Enhancement of a Piezoelectric Energy Harvesting Device in Pulsed Operation by Synchronous Charge Inversion," *Journal of Intelligent Materials Systems and Structures*, Volume 16, issue 10, 2005.
- [40] Y. Takei, R. Aoki, T. Kaneko, K. Matsumoto, I. Shimoyama, "MEMS 心音センサの研究," *IEEJ Transactions on Sensors and Micromachines*, 2015.
- [41] X. C. S. G. A. W. N. L. A. F. A. Qing Ou, "An experimentally validated double-mass piezoelectric cantilever model for broadband vibration-based energy harvesting," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol 23, Issue 2, 2012.
- [42] M. Hara, L. V. Minh, H. Oguchi, H. Kuwano, "Power Estimation for Piezoelectric Energy Harvesters in Flexure Mode with Large Displacement Amplitude," *PowerMEMS* 2013, 2013.
- [43] H. K. D. G. B. D. Gael Sebald, "Experimental Duffing oscillator for broadband piezoelectric energy harvesting," *Smart Materials and Structures*, Volume 20, Number 10, 2011.
- [44] Y. H. B. J. J. L. B. Y. Zhiran Yi, "Broad bandwidth piezoelectric energy harvester by a flexible buckled bridge," *Applied Physics Letters*, Volume 113, Issue 18, 2018.
- [45] Y. C. T. T. M. S. S. A. Hiroki Takise, "塗布法により製膜可能な PVDF 圧電膜を用いた小型振動発電デバイスによる μW オーダーの発電," *IEEJ Transactions on Sensors and Micromachines*, Volume 137 Issue 5 Pages 140-145, 2017.
- [46] H. Kim, S. Priya, K. Uchino, "Modeling of Piezoelectric Energy Harvesting Using Cymbal Transducers," *Japanese Journal of Applied Physics* 45, 2006.
- [47] 信越シリコーン, "シリコーンオイル KF-96 性能試験結果," 3 2020. [オンライン]. Available: https://www.silicone.jp/catalog/pdf/kf96_j.pdf. [アクセス日: 21 1 2021].
- [48] 大倉工業株式会社, "ウレタンエラストマーフィルム シルクロン," 大倉工業株式会社, [オンライン]. Available: <https://www.okr-ind.co.jp/products/488/>. [アクセス日: 21 1 2021].
- [49] R. D. Blevins, *Applied Fluid Dynamics Handbook*, 1984.
- [50] A. Sabato, M. Feng, Y. Fukuda, D. L. Carní and G. Fortino, "A Novel Wireless Accelerometer Board for Measuring Low-Frequency and Low-Amplitude Structural Vibration," *IEEE Sensors journal*, 2016.

- [51] Y. H. B. J. J. L. B. Y. Zhiran Yi, “Broad bandwidth piezoelectric energy harvester by a flexible buckled bridge,” *Applied Physics Letters* > Volume 113, Issue 18 > 10.1063/1.5049852, 2018.