

平成 26 年度 修士論文

圧電デバイスを用いた  
振動発電システム実用化に関する研究

指導教員 橋本 誠司 准教授

群馬大学大学院 理工学府 理工学専攻  
電子情報数理教育プログラム

氏名: 淡路 創介

## 目次

第1章	序論	
1.1	研究背景	4
1.2	研究目的	6
第2章	ステップ入力試験に対する発電特性試験	
2.1	PZT に関して	7
2.2	発電特性基礎試験	11
2.3	無負荷試験結果	13
2.4	入力依存性の検証	15
2.5	定抵抗負荷試験	17
2.6	素子形状・厚さ比較	21
2.7	インピーダンス整合試験	27
第3章	錘吊り下げ試験に対するエネルギー回生効率実試験	
3.1	発電特性試験方法	31
3.2	無負荷試験	33
3.3	負荷試験	34
3.4	インピーダンス整合試験	35
3.5	錘依存性の検証	36
第4章	一質点系発電特性	
4.1	インピーダンス整合試験	49
4.2	重心位置依存性	60
4.3	システム同定試験	63
4.4	一質点強制加振試験	68
第5章	衝撃荷重試験	
5.1	衝撃荷重試験	73
5.2	入力加速度依存試験	75
5.3	抵抗値依存試験	80
5.4	衝突箇所依存試験	82
第6章	単一モードと多モードシステムに対する実用化検討	
6.1	曲げ荷重と衝撃荷重の合成に関する検討	89
6.2	荷重合成の可能性検討	95
6.3	単一周波数による実用化検討	100
6.4	自動車振動による実用化検討	104

第7章 結言	
まとめ.....	108
質疑応答.....	111
参考文献.....	112
発表論文.....	114
謝辞.....	114

# 第 1 章 序論

## 1.1 研究背景

世界的な経済の発展に伴い今後 25 年間に、世界の一次エネルギー需要は 60% 近く増加すると推定されている<sup>[1]</sup>。この先、世界のエネルギー需要の 8 割程度が化石燃料によって賄われると予測され、将来、大気中の温室効果ガス濃度の大幅な上昇を引き起こすことが懸念されている。昨今、地球温暖化による環境問題が顕在化してきている。地球温暖化問題については、エネルギー供給と利用における幅広い分野に渡る技術面および政策面での対策により、温室効果ガスの排出が少ない低炭素化社会の構築に向けた様々なアプローチが取られている。エネルギー問題は地球温暖化や資源枯渇などの地球規模の問題と深く関わっており、その科学技術的解決法は人文社会的な方法とともに極めて重要である。

資源の安定供給についても、リサイクル技術の開発推進等を通して循環型社会の構築を目指しており、近年では炭酸ガス削減を目的とし、核融合（原子力）エネルギーに加え、太陽光エネルギー、風力エネルギーが着目されている。太陽光発電と風力発電技術に関しては、以前から注目されており研究開発も積極的に行われている。対して振動発電技術の研究はまだ始まったばかりであり研究は発展途上である。地球上の資源は限られており、しかもそのうちの人類が採掘可能な資源量はさらに限定される。地球温暖化問題や在来型石油資源の枯渇などの環境と資源の両面における地球規模の有限性のもとで、持続可能なエネルギーシステムの構築が求められている。

各種再生可能エネルギー、原子力及び核融合などの非化石エネルギー技術の開発によって低炭素化を進めると共に世界全体として化石資源利用の効率化・高度化を図りエネルギー供給力の持続性を高めることが基本的課題である。加えて、他国ではなく日本がこの技術の先頭に立つことの意義は非常に大きい。他国には天然資源が豊富に存在する。しかし、それらの天然資源も枯渇が騒がれており、いつか枯渇してしまうのは間違いない。天然資源を他国に比べ持たない日本が再生可能エネルギー技術を確立することの意味合いは今後の日本の展望を明るくし、国力を高めるなどの価値が高いことが明らかである。

現在、世界は圧倒的に天然資源依存型の産業・社会構造である<sup>[2]</sup>。日本のように国際的資源獲得競争に対する立場が弱くなりつつある現状では、自国の資源を持たない国にとっては、循環資源は純国産資源として資源セキュリティの観点からも重要な意味を持つてくる。今、世界的に既存の基幹エネルギー源に加え、新エネルギー開拓への機運が高まりを見せている。地球温暖化やエネルギー問題の解決策として再生可能エネルギーや原子力等に関する新しい科学技術開発が急務である。地球温暖化の原因であると考えられている CO<sub>2</sub> の排出量を 2050 年には約 50% にまで抑えるという政策のため社会ではエネルギーハーベスティング技術に注目が集まっている。

以上より、本稿では振動発電技術を確立させるため、圧電デバイスを用いた振動発電システムの実用化に関して行った研究の報告を行う。本研究では、他の計器などのシステムに悪影響を及ぼさないために磁場を介さない発電システムを提案している。エネルギーの大部分が熱として散逸する振動を用いたエネルギーハーベスティング技術を確立させ、クリーンエネルギーを生成することで地球温暖化抑制に貢献する。開発するシステムは、振動源を有する多くの場所で利用可能であり、IoT など今後発展することが考えられる情報技術の分野でも独立電源として有用な技術になる<sup>[3]</sup>。加えて、天然資源の少ない我が国がグリーンテクノロジーの先駆者として世界に貢献できるという可能性を陽に内包している。

また現在、我が国のエネルギー供給システムのほとんどが集中型のエネルギー供給システムであり、分散型のエネルギー資源の活用の推進も必要である。この自動車振動を用いた振動発電技術は分散型のエネルギー資源であり、実用化に至れば災害などによるリスクの分散も出来るというメリットも考えられる。

このような環境重視、低炭素化社会、省エネルギー社会の実現に向けて本研究課題に着目し、研究開発を進めることでエネルギー問題に対するアプローチの一つとして研究を行うに至った。

## 1.2 研究目的

エネルギーハーベスティング技術，振動発電の重要性に関しては研究背景において記した通りである。太陽光発電，風力発電は実用化が進んでいる。一方，少ない発電量，効率的な発電可能周波数の狭さに起因して，振動発電に関しては，社会実験などによる試験的な試みとして一部利用されている程度である<sup>[4][5]</sup>。

圧電素子を用いた振動発電全般の課題として，まず効率的に発電可能な周波数帯域が狭く，素子形状が限定されてしまうことが挙げられる。これに対しては，広帯域発電デバイスの作製，効率的な振動伝達構造の提案，振幅の大きさや軸方向の異なる振動を回生・制御できるデバイス構成にする必要がある。次の課題として，発電能力が低いコストを上回る発電量が得られないことが挙げられる。現状の発電デバイスの出力は 5mW 程度であり，エネルギー回生を行うためには出力レベルの向上，そして恒久的な発電性能を持たせることが必要となる。また，圧電素子は脆性材料のため，耐久性が低いという点も課題となってくる。上述より，圧電素子の基礎特性評価に始まり，上記課題を解決していくことが，本研究の目的である。以上の点を考慮し，効率良く振動エネルギーを電気エネルギーとして回生できる圧電デバイスを用いた振動発電システムを考案・評価し，実用化可能であるかを検討ならびに結果報告する。

本研究では，まず圧電デバイスの出力の低さに注目し，出力を改善するための構造・形状・入力量などについて様々な視点から解析を行った。理由としては帯域の問題も非常に重要であるがアプリケーションを稼働させるエネルギー出力が得られていれば，限定的にでも振動発電システムに活躍の場を作ることが可能であるからである。

著者が所属する研究チームにおける最終的な製品化目標は自己完結型セルフパワー用途に加え，大電力を必要とするバッテリーなどへのエネルギー回生までを目標としている。

上述より，本稿ではファーストステップとして圧電デバイスを用いた振動発電システム実用化について検討することを目的とし，現状の発電デバイスの 10 倍相当となる 13mW/cm<sup>3</sup>（太陽電池相当）を目標としている。

本論文の構成は以下のようになる。

2 章で，PZT 特性と piezo 素子の発電特性を述べ，3 章で，荷重に対する発電特性・効率を示す。4 章では一質点デバイスに触れ，より発電量が大きくなるための条件検証を行う。5 章では，衝撃荷重方式発電について述べ，6 章で，実用化に関して検証を行う。

以上から，高出力化を図り，実際にアプリケーションの電力を振動発電システムにより賄い，実用化可能であるか検討し，7 章で本稿結言を述べる。

## 第 2 章 発電特性試験概要

### 2.1 振動発電用 PZT に関して

まず始めに振動発電システムの実用化に関しての議論に先立ち、使用するピエゾ素子つまり圧電デバイスの元となる PZT という材料に関して述べていく。この章では、ピエゾ素子の特性を詳細に理解することで振動発電システムへ最大限に活かすことを目的としている。

PZT(チタン酸ジルコン酸鉛)とは、圧電セラミックスの一種であり、ペロブスカイト構造をもつ結晶族の一種である。圧電セラミックス最大の特徴は電気エネルギーと機械エネルギーの可逆性をもっている点である。具体的には力を印加するとデバイス内に応力による歪が生じ、結晶内の電子や正負のイオンが変位することで分極変化を生じ、電気エネルギーを発生させる圧電効果。逆のプロセスとして、電気エネルギーを与えると電子や正負のイオンが反対方向に変位する力を発生させる逆圧電効果である。身近なものとしてライトー、スピーカーなどがあり、既に生活の中で身回りに溢れている材料である。

振動発電における PZT のメリットとしては以下のようなものがある。磁場を介さないため、使用場所を選ばない。圧電セラミックスのなかでもとりわけ巨大な誘電率、圧電性、強誘電性を持ち、原料が比較的安価なため大量生産することができる。比較的分極を引き起こしやすいために好感度かつ電気結合係数が大きい。使用したバイモルフ型では電界に対し変位が大きいという長所を持っている。加えて、ジルコン酸鉛とチタン酸鉛という二つの成分を調整することで、Q 値(共振の鋭さ)をカスタマイズできるという特徴もある。物性に関する特性は様々な良書が発行されているので譲ることにする<sup>[6][7][8]</sup>。対し、PZT のデメリットは以下の三点である。一点目は発電効率の良い帯域が狭く、扱いが限定的になってしまうことである。だが、システムモニターなど単一周波数にカスタマイズすることで限定的に実用化することも可能である。次に二点目、PZT は脆性材料のため耐久性に欠ける点である。しかし、この問題点は PZT プレートの間にアルミ板(以降 SIM と呼称)を入れるなどして改善されている。脆性材料は変形をほとんどせず破断に至る。セラミックス全般に言えることであるが、ネガティブな特性だけでなく曲げ荷重に弱い一方で圧縮荷重に強いという面もある。最後に三点目の最も重大な問題点は発電電力が小さいことである。PZT は上述のように圧電セラミックスの中では非常に優秀であるが、それでも無線通信やエネルギー回生という用途から発電量を評価すると不十分である。そのため本稿では発電量の不足という問題点を補うべく、発電量を増加させるための条件検証を行う。圧電素子にはそれぞれ圧電材料のプレートが一枚のユニモルフ、プレートが二枚のバイモルフ、プレートが多数重ねられている積層型などの型があるが、本稿では全てバイモルフ型を使用している。本稿において圧電素子は PZT を含むすべての圧電性を有する材料でできている

素子のことであり、PZT を用いて作成した素子はピエゾ素子と呼ぶ。

図 2.1 には実験で使用したバイモルフ型ピエゾ素子を示し、サイズも合わせて記載する。表 2.1 にはそれぞれのバイモルフ型ピエゾ素子の具体的な仕様を併記している。ならびに、より詳細な特性を解析するために種々の形状・厚さのピエゾ素子を図 2.2, 2.3 に示し、その仕様に関しては表 2.2, 2.3 に示す。この節では、これらのデバイスに対し公称値だけに言及し、実測値に関しては後述する。図 2.1～2.3 に写っているピエゾ素子を挟んでいる灰色の棒は、平行キーという絶縁体の棒である。毎試験同じ位置をクランプし、測定ばらつきを抑制することで試験結果の妥当性を向上させるために導入した。

本節最後にデバイスそれぞれの特徴を記述し、次節からこれらのデバイスを使用した実験に関して言及する。PZT A：SIM の両面を PZT が挟んでおり、PZT の表面に緑の保護層がある構造になっている。そのため全ピエゾ素子の中で一番硬く、変位が生じにくい素子である。PZT B：全ピエゾ素子唯一 SIM を有していないため、PZT プレート を 2 枚重ねた構造をとっている。SIM をかまさないため PZT を補強しておらず、全素子の中で一番壊れやすい。PZT C, PZT D：特別注文した台形状と細長い形状のデバイスである。

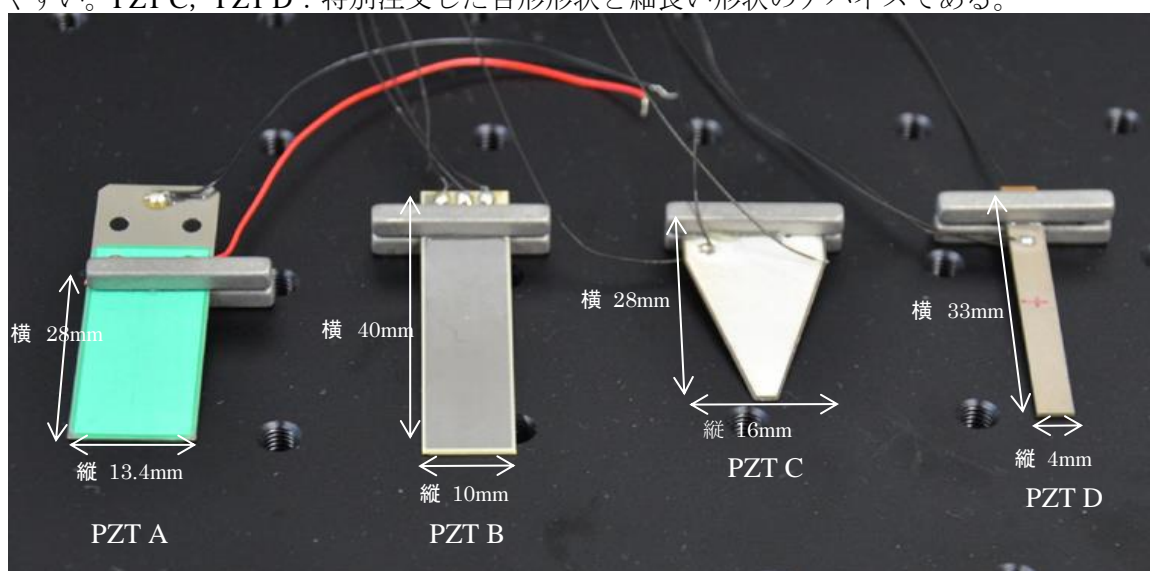


図 2.1：実験で使用した PZT

表 2.1：PZT の仕様

	PZT A	PZT B	PZT C	PZT D
有効面積 [mm <sup>2</sup> ]	250	299	263	114
メーカー	日本セラテック	日本セラテック	タムラ製作所	タムラ製作所
厚さ [mm]	0.6	0.55	0.4	0.8



図 2.2, 表 2.2 に PZTE~G を示した。それぞれは同じサイズのピエゾ素子であり、違いはピエゾ素子の厚さである。PZTE~G は 0.2~0.4mm の厚さとなっている。中国の企業に形状を依頼し作成したピエゾ素子であり、厚さによる出力特性や振動特性などを解析するために試作した。これら PZTE~G は PZTC を模した素子であり、三角形状になるように設計されている。正確には台形の形をしているが、ほぼ三角形になるように製作した PZT の材料は全て同じものを使用している。平行キーは図に対して、上底 5mm の位置をクランプしている。SIM はリン青銅を用いた。表に記載されている有効面積とは発電に寄与する面積であり、クランプした部分より下の面積になる。有効面積と異なり、PZT プレーットの全面積を総面積と以下呼称する。

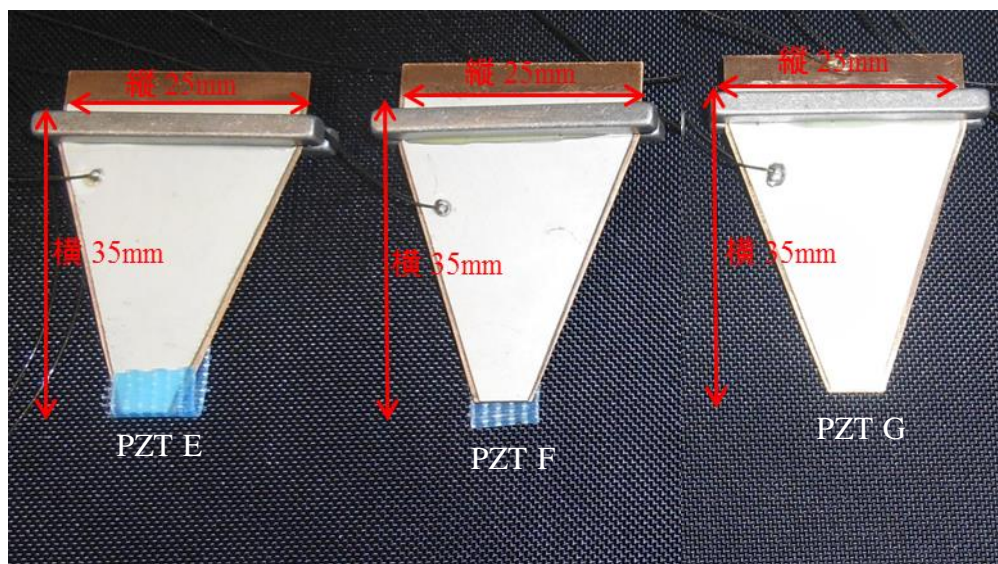


図 2.2 : 実験で使用した PZT

表 2.2 : PZT の仕様

	PZTE	PZTF	PZTG
有効面積 [mm <sup>2</sup> ]	542.5	542.5	542.5
メーカー	中国製	中国製	中国製
厚さ [mm]	0.2	0.3	0.4

図 2.3, 表 2.3 に PZT H~J を示した。それぞれ異なる形状を有しており, 前ページ PZT E と合わせて形状による効果を解析する目的で作成した。PZT E は台形形状, PZT H は正方形, PZT I は長方形形状, PZT J は台形形状で PZTE に比べて大きいピエゾ素子になっている。形状による特性を評価するため, それぞれ厚さ 0.2mm 共通になっている。次節にて, 各形状に対して変位(振動)特性や出力特性を解析する。PZT E~G と同様に SIM はリン青銅である。

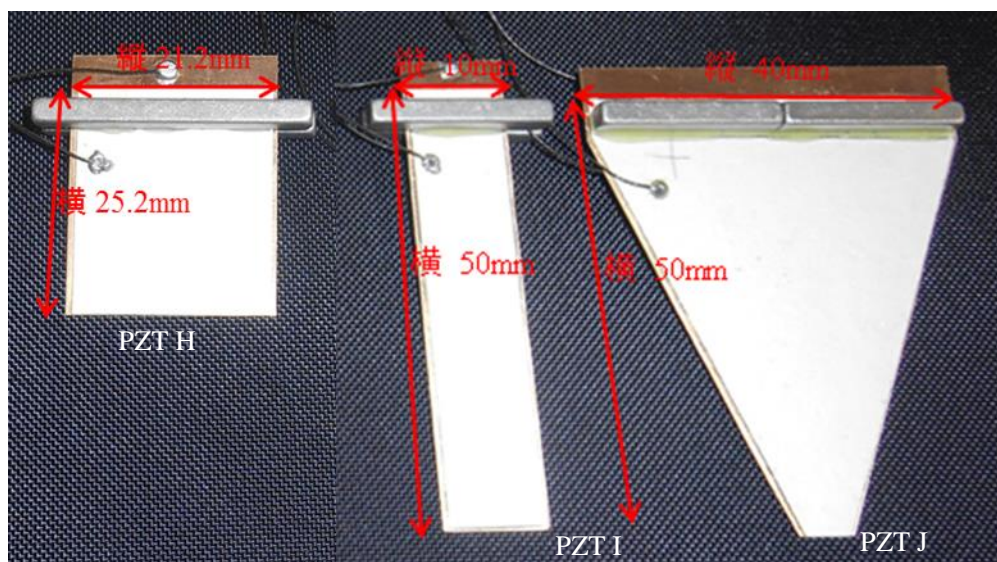


図 2.3 : 実験で使した PZT

表 2.3 : PZT の仕様

	PZT H	PZT I	PZT J
有効面積 [mm <sup>2</sup> ]	428.2	450	1150
メーカー	中国製	中国製	中国製
厚さ [mm]	0.2	0.2	0.2

## 2.2 発電特性基礎試験概要

次に、PZT A~PZT D の発電特性を詳しく検証することで、最も振動発電に適した piezo 素子を選定し、実用化を目指す。

発電特性基礎試験構成について以下に説明する。piezo 素子を図 2.4 のように平行キーの位置でクランプし、piezo 素子先端を変位量としてレーザー変位計を用いて変位量を測定した。この実験構成は片持ち梁の構造である。図 2.4 のフラップ棒はハイトゲージに固定されており、ハイトゲージが XY ステージに搭載されているため 0.1mm という単位で動かすことができる。piezo 素子を初期位置からステップ加振として、XY ステージを用いて、0.1, 0.2, 0.3mm などの任意の入力量を押し込む。その後、フラップ棒を引く、これによって、各 piezo 素子は固有振動数において機械振動し、piezo 素子の圧電効果により電圧出力が発生する。電圧出力と同時に変位入力を解析することで piezo 素子の機械特性や電気特性を解析する。piezo 素子の電圧出力測定に関しては WAVE LOGGER (KEYENCE 製) を用いた。以上のはじき試験を PZT に負荷抵抗をつけた場合と負荷抵抗を付けない場合で比較検証した。実験で解析した解析量に関しては次のページに示した。平行キーに関しては MISUMI 製で、レーザー変位計は KEYENCE 製 IL-1000 と IL-S100 で分解能は 1 $\mu$ m である。

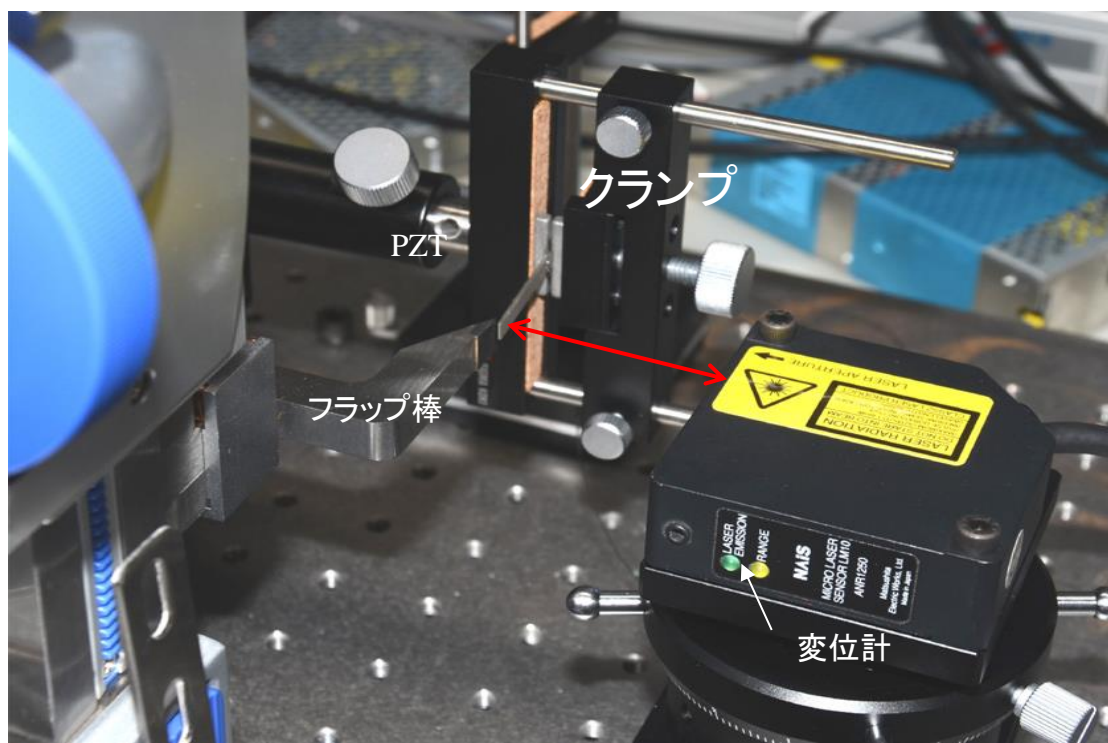


図 2.4: 実験構成写真

以下に示した解析量が実験で評価した値である。それぞれの式に関して簡潔に説明すると、まず始めに(1)式の最大電圧は先程も述べたようにピエゾ素子に変位入力としてステップ加振を加え、発生した電圧出力の最大値になる。(2)式の積分値は電圧出力の絶対値を取り、任意の時間までの積分値を使用した。次に、(3)式の実効値は電圧出力の2乗したものを時間積分し、サンプリング時間で割った値の平方根をとったものになる。(4)式で示した $P$ :最大電力については(1)式で求めた電圧波形の最大値の2乗をし、その値を負荷抵抗値 $R$ で割ったものになる。(5)式の出力エネルギーは $V^2/R$ で求めた電力波形の時間積分したものになっている。時間積分の範囲は電力波形が0になるような十分時間が経過するまでを範囲としている。(6)式の単位エネルギーに関しては出力エネルギー値を先ほど表で示したそれぞれのピエゾ素子の有効面積で割ったものとなる。

## 解析量

$$\text{最大電圧:} \quad V_{max} [\text{V}] \quad (1)$$

$$\text{積分値:} \quad \int_0^t |V(t)| dt, \quad t = 1, 2, 3 [\text{V}] \quad (2)$$

$$\text{実効値:} \quad \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^t V(t)^2 dt}, \quad t = 1, 2, 3 [\text{V}] \quad (3)$$

$$\text{最大電力:} \quad P_{max} [\text{W}] = \frac{V^2}{R} \quad (4)$$

$R$ : 負荷抵抗

$$\text{出力エネルギー:} \quad W_o [\text{J}] = \frac{1}{R} \int V^2 dt \quad (5)$$

$R$ : 負荷抵抗

$$\text{単位エネルギー:} \quad D [\text{J}/\text{mm}^2] = \frac{E}{A} \quad (6)$$

$A$ : 有効面積

## 2.3 無負荷試験結果

まず初めに PZT A~D に対し無負荷試験を行った。試験の概要と取得パラメータは前述したとおりである。

図 2.5 と表 2.4, 2.5, 2.6 は 4 種類の PZT に対し、負荷抵抗を付けずに 0.3mm のステップ加振を加えた場合の波形とそれぞれの数値を示したものである。横軸が時間軸、縦軸が電圧を示した図となる。計測開始時間までフラップ棒により初期変位を与えておき、0.05 秒程度でフラップ棒を引くことによって piezo 素子の出力電圧が振動しながら定常値に戻っていく様子を示した波形である。

それぞれの素子の特性が出ており、同じ入力変位を与えた時 PZT A が最も電圧が大きい。他の波形を調べると PZT B の電圧波形の電圧値は低いが減衰が小さく、他のものに比べ長い時間電圧が出力されていることが図から読み取れる。加えて、他の波形よりそれぞれの波形に機械振動に起因する細かい振動が含まれていることがわかる。この図では PZT B において非常に顕著に出ていると確認できる。

次に表のパラメータから見てわかる通り電圧の最大値は PZT A が大きいことがわかる。絶対値積分値に関してはそれぞれ評価する秒数に依存する結果となっている。PZT A の電圧値は 4 種類の中では一番大きいため完全に減するまでの時間という制限においては図より PZT B の波形は減衰が少なく、一定電圧出力のような波形になっている。そのために制限時間を増やしていくと PZT B が最大値となることが考えられる。

最後に実効値に関しては 3 秒という、上述同様完全に減衰するまでの時間制限において PZT A の値が大きいことがわかる。そもそも実効値とは交流電圧を抵抗負荷に加えた場合と、ある直流電圧を加えた場合とで交流電圧の 1 周期における平均電力が等しくなるときに、この交流電圧は先の直流電圧と同じ値の実効値をもつと定義されるものなので仕事の量、つまり電圧の 2 乗 (電力  $P=V^2/R$ ) として扱う。そのために定義に立ち返ってみた時に PZT A が一番を大きいのではないかという結果が図 2.5 より考えられる。

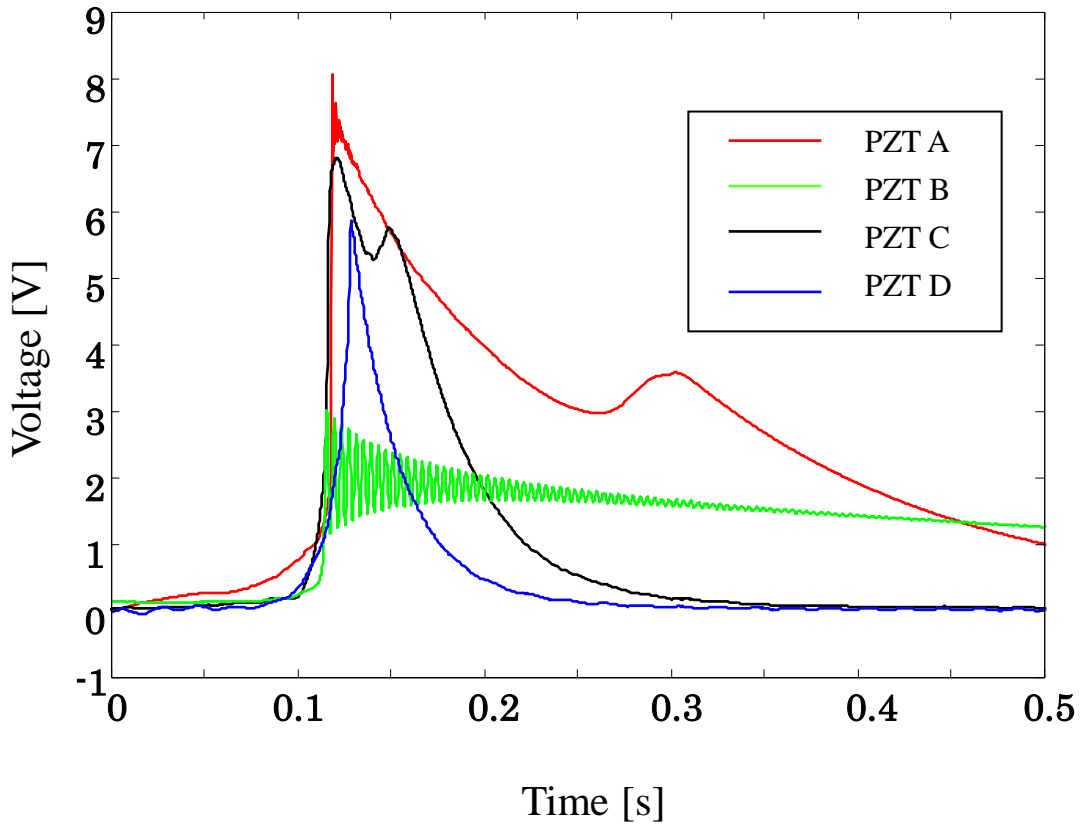


図 2.5 : 無負荷試験電圧波形

表 2.4 : 最大電圧

種類 \ 値	PZT A	PZT B	PZT C	PZT D
$V_{\max}$ [V]	8.06	3.02	6.81	5.85

表 2.5 : 絶対値積分

種類 \ 値	PZT A	PZT B	PZT C	PZT D
0~3s	1.44	1.63	0.538	0.240

表 2.6 : 実効値

種類 \ 値	PZT A	PZT B	PZT C	PZT D
0~3s	1.25	0.751	0.818	0.44

## 2.4 入力依存性の検証

本実験は前述した実験概要の写真と同じ実験構成をとり、前節で0.3mmのステップ加振のみを入力したが、本実験においては0.1, 0.2, 0.3, 0.4mmと入力量を変化させながらステップ加振を行った場合の特性を検証する実験である。対象としてはPZT A~Dの4種全てを対象として行った。

図2.7, 図2.8そして図2.9をよりピエゾ素子による出力の最大電圧値, 絶対積分値, 実効値は線形性を有しており, 変位である入力量に比例するということが確認できる。



図 2.6 : 実験概要

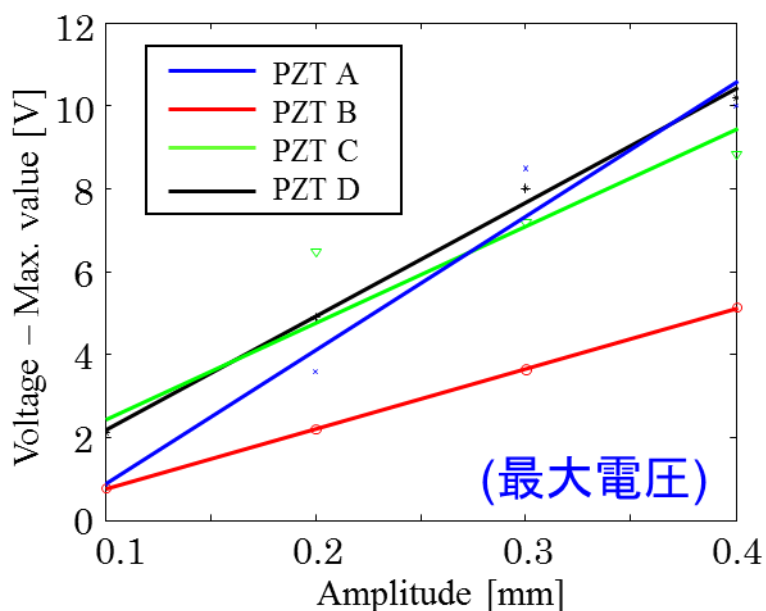


図 2.7 : 入力特性(最大電圧値)

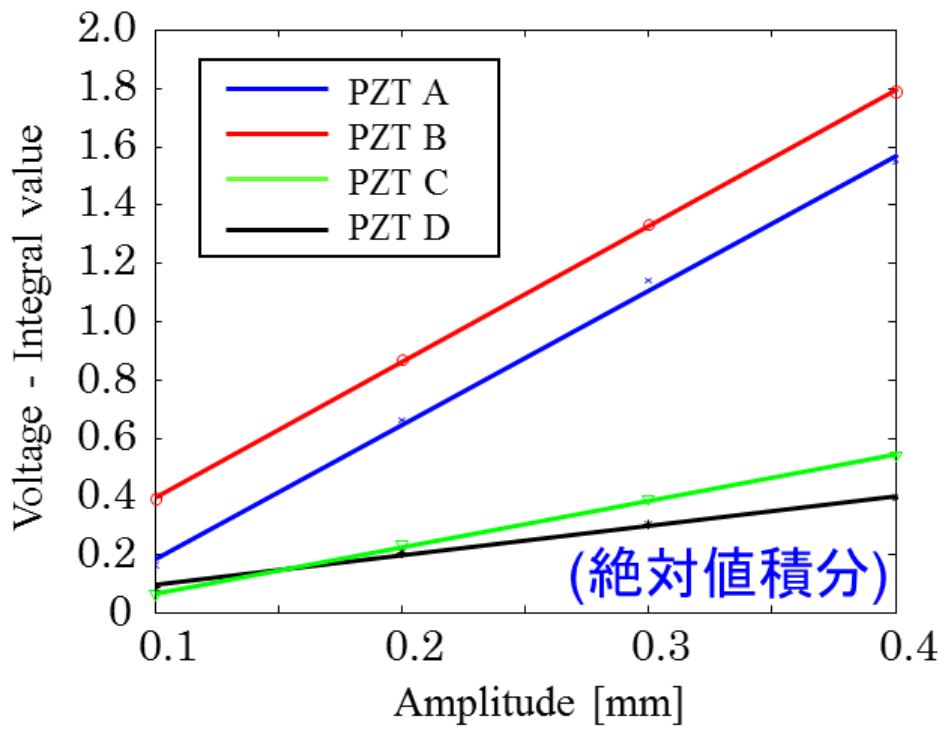


図 2.8 : 入力特性(絶対積分値)

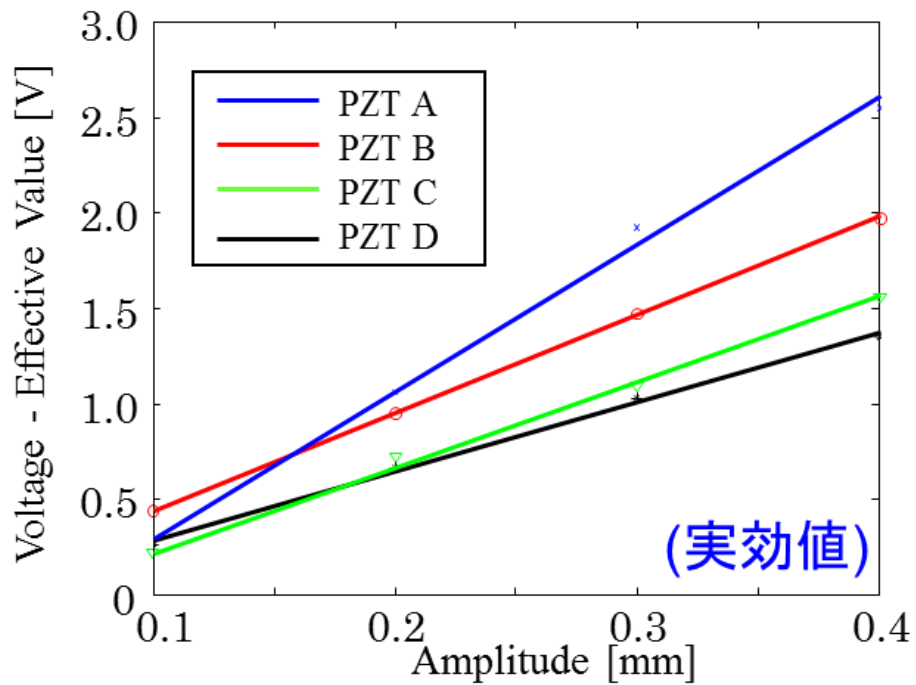


図 2.9 : 入力特性(実効値)



## 2.5 定抵抗負荷試験結果

本実験では先程の無負荷試験との比較としてピエゾ素子に負荷抵抗をつなぎ、0.3mmのステップ加振を印加するという負荷試験を行う。実験構成は前節と同様である。実験結果を以下に示す。

実験波形は負荷抵抗として1k $\Omega$ を負荷したものであるが、今回の図2.10の波形を見ると無負荷の場合と同様にPZT Aの出力電圧が最も大きいことがわかる。顕著な違いといえるのは負荷抵抗をつなぐことにより無負荷の場合と比べて、波形の形が変化するという点である。無負荷の場合の波形ではオフセットを持つような波形であった。一方で、1k $\Omega$ を負荷した場合の波形は、単一モードで振動していることが図2.10よりわかる。PZT Aに関しては包絡していく過渡状態に大きな変化は見られないが、無負荷試験では一番減衰が小さかったPZT Bには無負荷試験と比べ、減衰が少し大きくなっている様子が見られる。

1k $\Omega$ を負荷した結果として、最大電圧値は全て1桁小さくなっている事を確認した。先ほど異なりPZT Aがどの時間制限の範囲に関しても最も大きいことがわかる。実効値に関しても同様でPZT Aがどの条件に対しても大きいことがわかる。これらの結果より、PZTの電圧は負荷抵抗に依存することがわかる。そのため電源、電圧源とならないことを確認した。

図2.10と表2.7, 2.8, 2.9より電力最大値、エネルギー、単位面積エネルギー共にPZT Aが最もよい結果となった。PZT A, PZT B, PZT C, PZT Dすべてにおいて共振周波数を確認することが出来た。

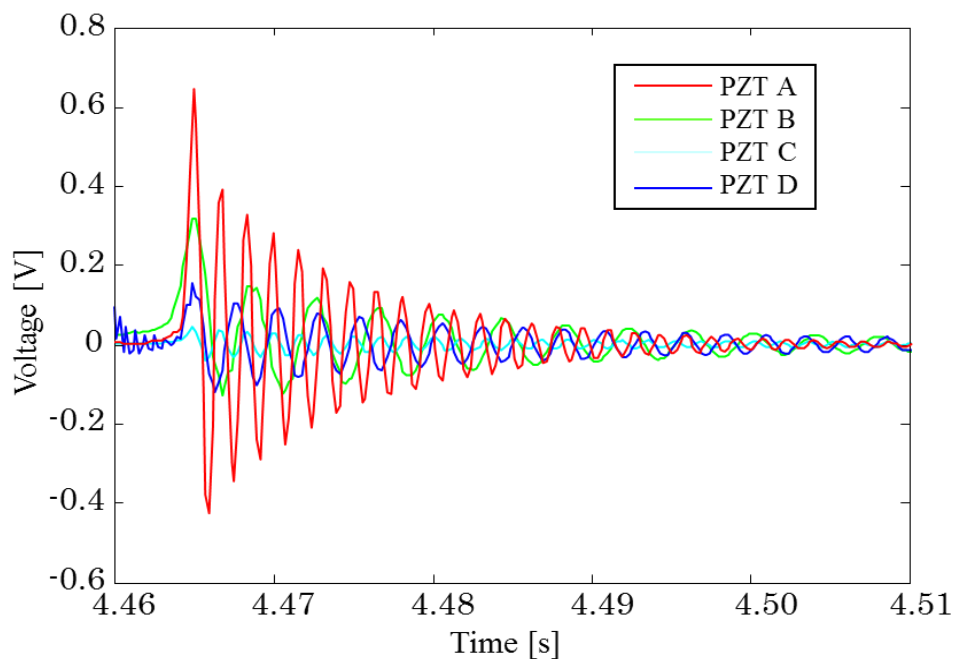


図 2.10 : 4つのPZTの負荷試験結果

表 2.7 : 最大電圧

種類 \ 値	PZT A	PZT B	PZT C	PZT D
$V_{\max}$ [V]	0.65	0.32	0.044	0.15

表 2.8 : 絶対値積分

種類 \ 値	PZT A	PZT B	PZT C	PZT D
0~3s	0.0044	0.0040	0.0016	0.0030

表 2.9 : 実効値

種類 \ 値	PZT A	PZT B	PZT C	PZT D
0~3s	0.015	0.009	0.0017	0.0055

次に電圧出力より解析した電力波形と各種導出量を図 2.10 と表 2.10~2.12 に示す。加えて、表 2.13 に定抵抗試験より導出した共振周波数を示す。以下の表より、電力最大値、出力エネルギー、単位面積エネルギーの全てのパラメータにおいて PZT A の出力が大きいことを定量的に確認した。PZT A に関しては共振周波数を二つ持つことが確認でき、二つの共振周波数に関しては後述する。

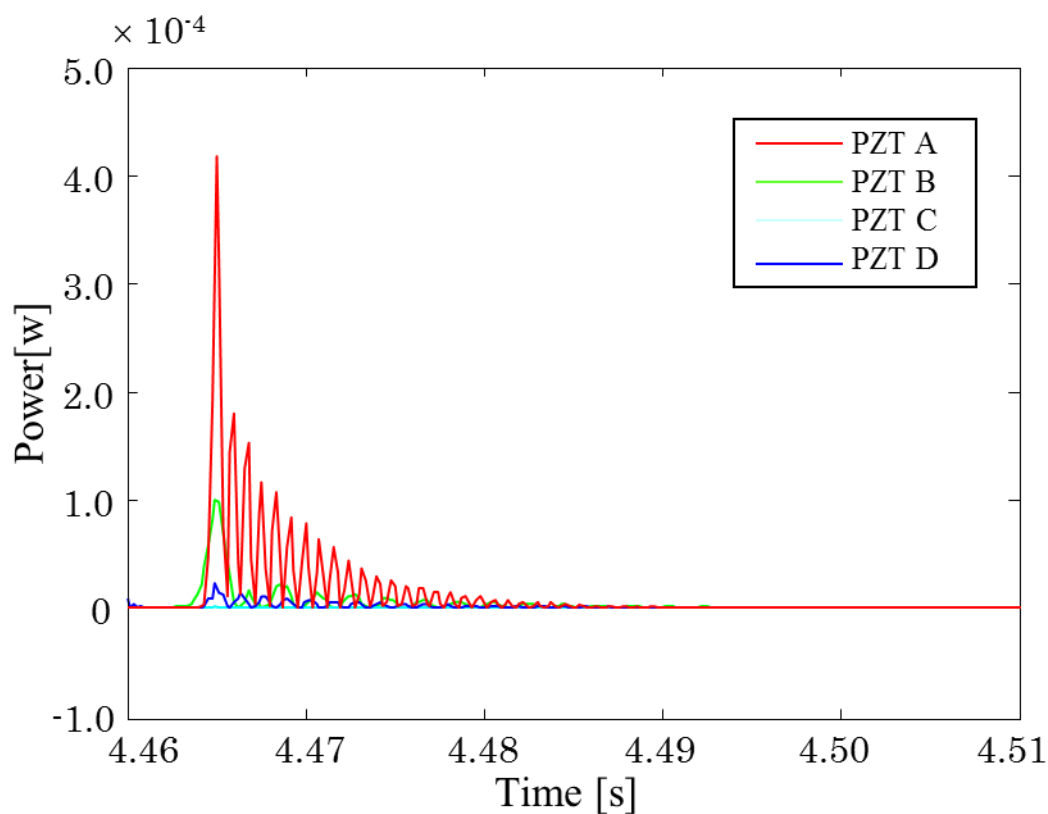


図 2.10 : 4 つのピエゾ素子に対する電力評価

表 2.10 : 電力最大値 (  $P_{\max} [\text{W}] = v_{\max} i_{\max}$  )

種類 値	PZT A	PZT B	PZT C	PZT D
$W_{\max} [\text{V}]$	4.2E-4	1.0E-4	2.4E-5	1.9E-6

表 2.11 : 出力エネルギー(  $W_o [J] = \int_0^t v(t)idt$  )

種類 値	PZT A	PZT B	PZT C	PZT D
0~3s	6.92E-7	2.37E-7	8.30E-9	8.94E-8

表 2.12 : 単位面積エネルギー(  $D [J/mm^2] = E/A$  )

種類 値	PZT A	PZT B	PZT C	PZT D
0~3s	2.77E-9	7.94E-10	3.16E-11	7.84E-10

表 2.13 : 共振周波数

種類 値	PZT A	PZTB	PZT C	PZT D
共振周波数[Hz]	39, 586	275	550	404

## 2.6 素子厚さ・形状比較

本節では図 2.2, 図 2.3 に示した piezo 素子群に対しステップ入力を行い, それぞれの形状・厚さの違いに起因する特性について解析する。図 2.2, 図 2.3 の piezo 素子群は同一の PZT を使用しており, SIM も全てリン青銅で統一している。そのため同条件で形状や厚さの影響を比較することができる。ステップ入力の変位量は 0.5mm で固定している。実験構成などは前節と同様のため割愛する。

まずは厚さ違いのデバイス PZT E~G 群に試験を行った。同一振幅入力による変位, 出力電圧は図 2.11, 次ページ図 2.12 のとおりである。図 2.11 は上記デバイス群の固有振動における機械振動波形を示しており, 記載している凡例 PZT1-0.2, PZT1-0.3, PZT1-0.4 はそれぞれ PZT E, PZT F, PZT G に相当する。

図 2.11 より厚さが薄いモノほど減衰が小さく, 機械振動が持続している。対し, 厚いものほど減衰が大きく, 0.4mm の時, 最も早く機械振動が小さくなっていることが確認できる。図 2.11 からは確認できないが, 同一振幅の入力という条件において比較すると機械振動が完全に減衰するまでの時間は 0.4mm の時に最も早く, 次いで 0.3mm, 最も機械振動が持続するものは 0.2mm の時である。

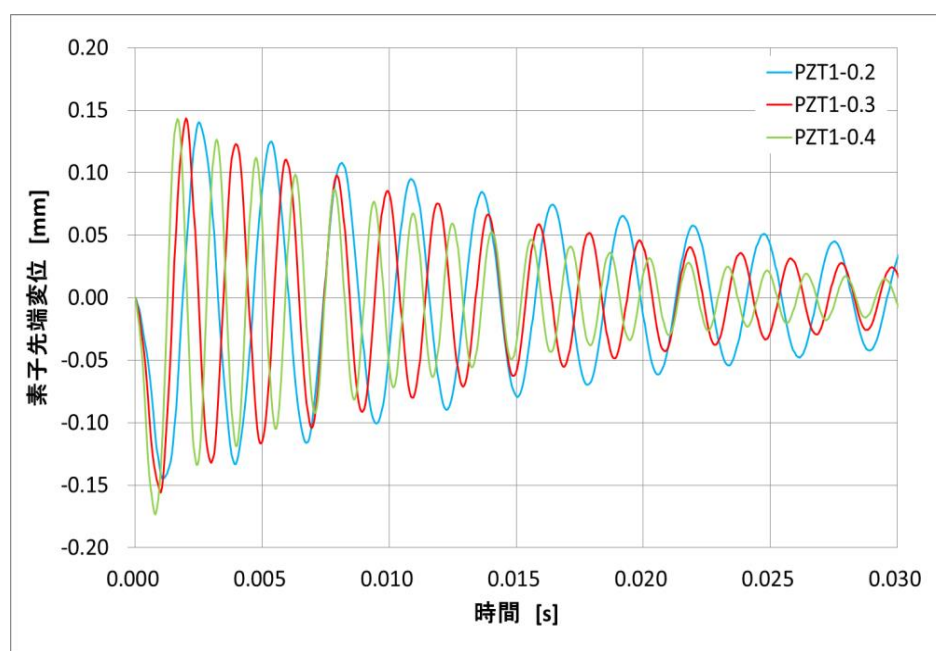


図 2.11 : PZT E, PZT F, PZT G の piezo 素子変位波形-厚さ違いの比較

図 2.12 は図 2.11 で示した piezo 素子群に同一振幅の入力変位を与え、固有振動で振動した時の電圧波形を示している。図 2.12 から同一振幅の入力変位を与えた場合、厚い piezo 素子のもので出力電圧の最大値が大きくなる傾向にある。これに対して、薄くなるにつれ電圧出力振動が持続する傾向にある。図 2.13 に図 2.12 で示した piezo 素子群の電圧出力の PSD を重ねて示した。最大電力で比較した際、図 2.18 より明らかなとおり厚いものから順に大きい傾向であることを確認した。出力エネルギーで考慮すると厚さ 0.3mm の piezo 素子が最大で最小は 0.2mm の素子になる。最大電力と振動の持続とのトレードオフの関係であることがわかる。

これらの試験は外部からの振動を動力源とするアプリケーションのために解析した結果と考えることもできる。その観点から考察すると、最大電力よりも出力エネルギーに重点が置かれる。なぜならば、一回のスイッチのはじき(ステップ入力)によって何らかのアプリケーションを起動させることを考慮すると、一瞬大きな電力が得られる素子よりも総エネルギーとして大きく回収できる素子を用いる方が実用化しやすいためである。一瞬が大きくても後段の回路などでエネルギーの総量を増加させることはできないためである。

上述の通り、図 2.13 には各 piezo 素子の電圧 PSD(Power Spectral Density)を掲載している。この PSD は各周波数のもつパワーを確認することができる。それぞれ厚さ 0.2mm の時 243Hz、厚さ 0.3mm の時 520Hz、厚さ 0.4mm の時 770Hz である。厚さ 0.2mm は低周波が支配的で、高周波のゲインは低いことがわかるが、厚さ 0.3mm になると共振周波数が高周波側にシフトし、高周波のゲインが大きくなっていくことが確認できる。最終的に最も厚い 0.4mm の場合、ほぼフラットなゲイン特性になっていることを確認した。先ほど厚さと電圧波形に関して言及したが、PSD における高周波の共振ほど最大電圧が大きい傾向にあり、加えて減衰が大きいため振動が持続しない傾向にあることがあることがわかる。対し、低周波の共振ほど、最大電圧は大きくないが振動が持続する傾向であることが電圧 PSD と電圧波形から確認できた。厚さ 0.4mm と 0.2mm の電圧波形においては単一モードだけではなく高次モードの影響も確認できる。厚さ 0.4mm と 0.2mm の電圧 PSD を確認すると 0.4mm はフラットな特性のため他の周波数の影響を受けやすいことが確認できると共に、0.2mm の piezo 素子では 2 次の共振が確認できるため電圧波形の妥当性が確認できる。

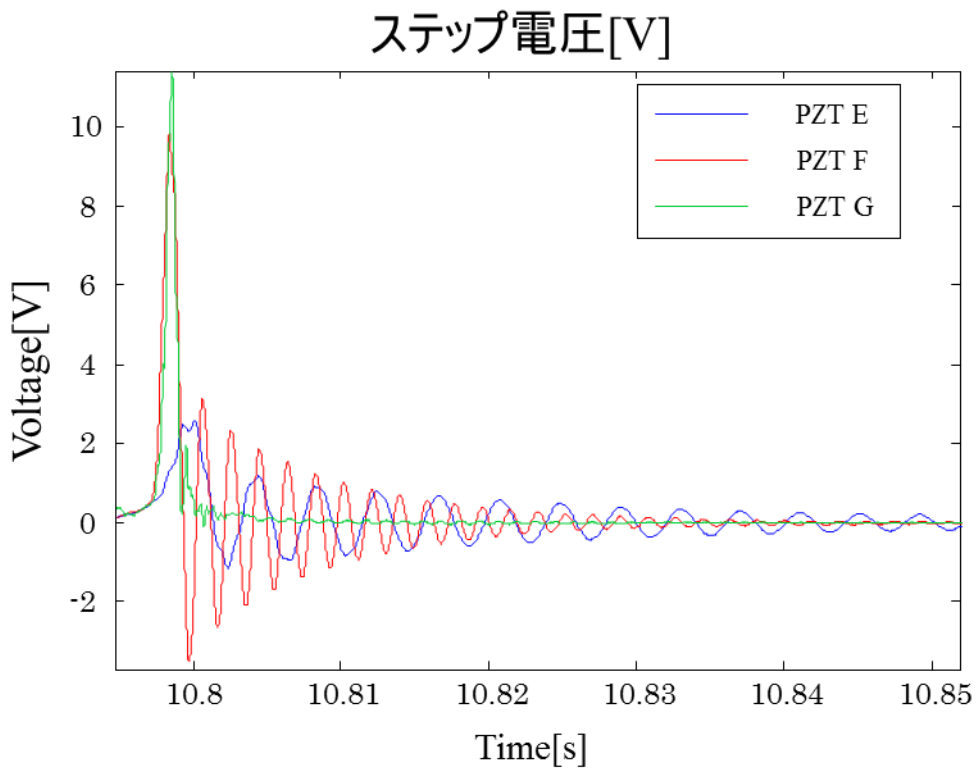


図 2.12 : PZT E, PZT F, PZT G の piezo素子電圧波形-厚さ違いの比較

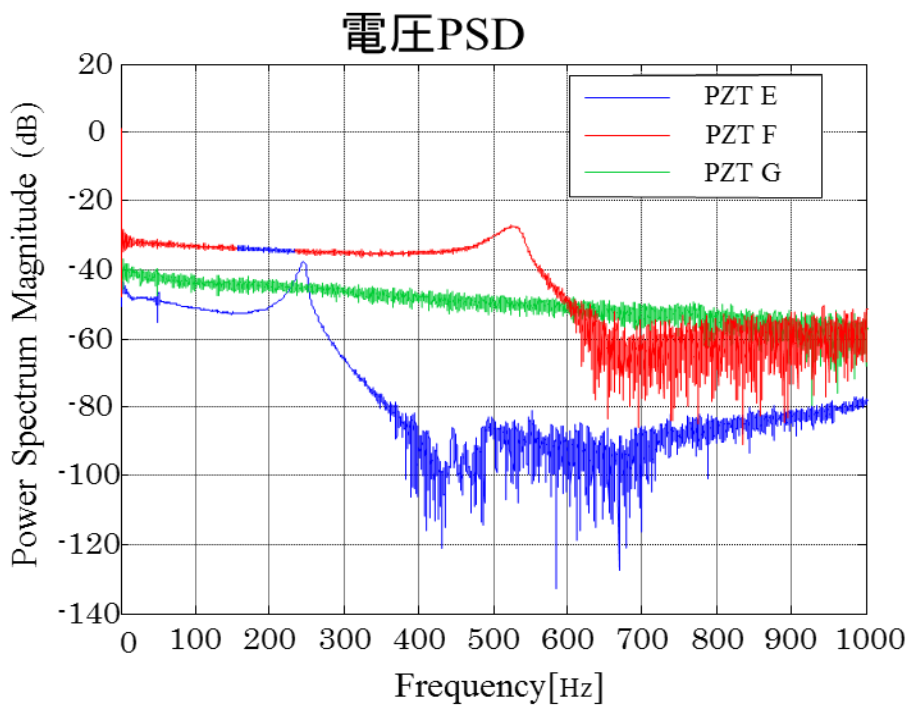


図 2.13 : PZT E, PZT F, PZT G の piezo素子電圧 PSD-厚さ違いの比較

次に図 2.3 に示した形状の違う piezo 素子 PZT E と PZT H~J に対し、インピーダンス整合試験を行った。以下にその時の各固有周波数で振動している機械振動波形と電圧波形を記載する。図 2.20 に示した固有周波数による機械振動波形の図にも図 2.11 同様本研究チームで呼称されている名前が記載されている。それぞれ PZT 1-0.2 は PZT E を表し、PZT 2 は長方形形状の PZT I を示し、PZT 3 は正方形形状の PZT H、PZT 4 は台形形状かつ面積最大の PZT J であることを注意されたい。それぞれの機械振動波形より、初期変位と素子の厚さは全て同一であるが、素子形状によって減衰の速度が形状によって異なり、それぞれ固有周波数が異なることが確認できる。ばね定数が大きいものほど減衰が早く、固有周波数が高い結果となっている。加えて、台形形状 (大) PZT J と台形形状 (小) PZT E の関係から形状を大きくすることより、固有周波数が低周波側にシフトし、ゆっくりとした振動変位の波形になることが確認できる。形状によって変位 0 に落ち着くまでの減衰時間は異なり後述のようになることを確認し、長い順に長方形 (PZT I)、台形小 (PZT E)、正方形 (PZT H) である。これらの関係から固定端の幅、先端までの長さや機械振動の持続時間との関係を推測することができ、先端が長いほど振動が持続し、固定端の幅が短いほど振動が持続する傾向にある。そのため先端までの長さや固定端の幅を比として導出することで機械振動持続時間との関係を見出すことが出来るかもしれない。これらは現状、推測であるため、今後の検証が必要である。

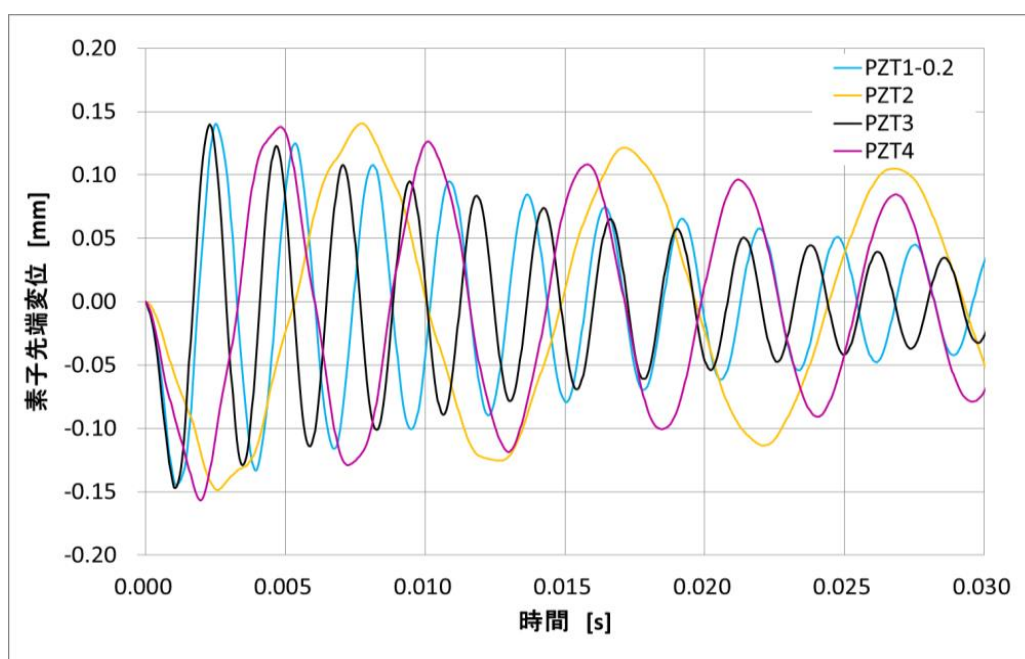


図 2.14 : PZT E, PZT H, PZT I, PZT J の piezo 素子振動波形-形状違いの比較



図 2.15, 2.16, 2.17 に前述の機械振動における電圧波形, ならびにその電圧波形の PSD も併せて掲載した。図 2.15 に示した図は同一振幅入力の際の電圧波形であり一瞥ただけで形状によって出力電圧の波形が異なることを確認できる。正方形形状素子の出力電圧が大きい理由はばね定数が高いためである。ばね定数の高いものを強引にまげてはじくために正方形形状の piezo 素子の出力が最も高い結果となっている。何度も記述しているが, これはスイッチのような外部から振動を強制的に印加するようなアプリケーションでしか使うことが出来ない。定常的に素子の固定端を振動させて利用するようなアプリケーションではこれほど大きな出力は期待できない。そのほかの形状については図 2.16 に正方形形状を除いた電圧出力の波形を併記しているため, そちらを参照していただきたい。図 2.17 より, 台形小 PZTE より高次共振をもつことが明らかである。

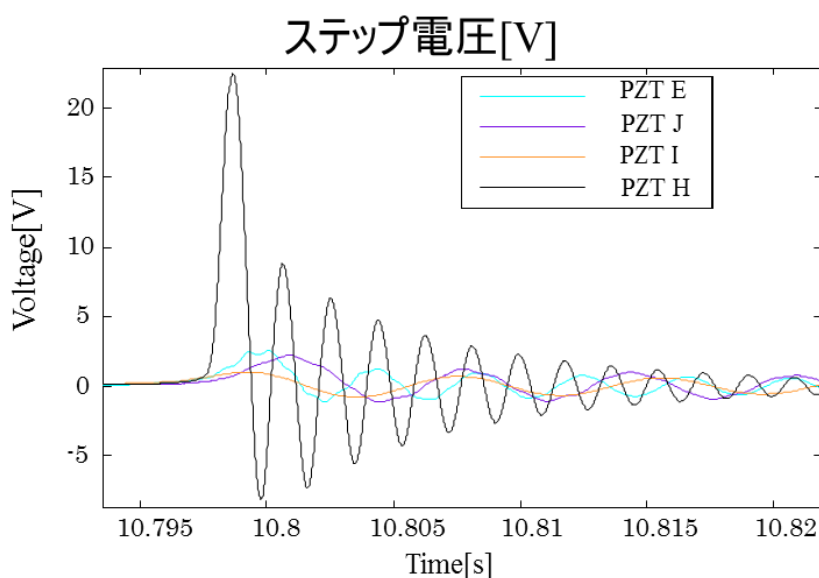


図 2.15 : PZTE, PZTH, PZTI, PZTJ の piezo 素子電圧波形-形状違いの比較

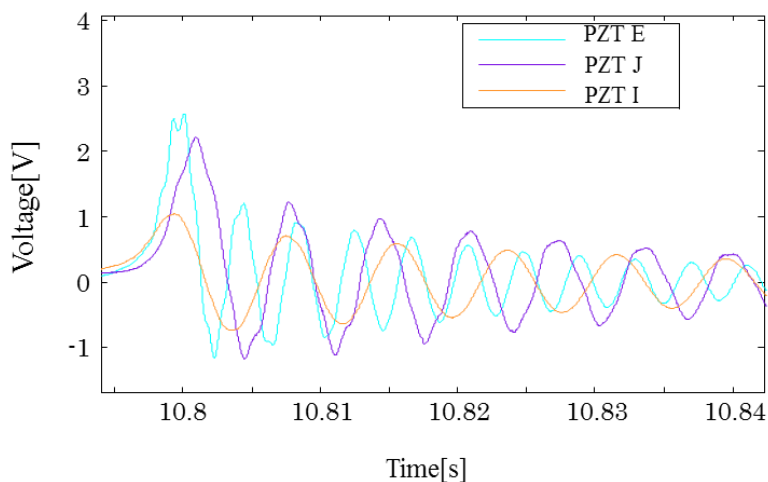


図 2.16 : PZTE, PZTI, PZTJ の piezo 素子電圧波形-形状違いの比較

上述した電圧波形の PSD を以下図 2.17 に示した。各素子の共振周波数は後述のとおりである。まず PZT E, つまり台形形状厚さ 0.2mm の PSD より, 242.5Hz に共振周波数をもっていることが確認した。図 2.17 より, 凡例の上から順に正方形 PZT H は共振周波数 542Hz であり, 図 2.17 では黒色に対応している。論じてきた PZT 素子の中でも上位の Power を持っていることがわかる。しかし, これは図 2.14 に示した厚さ 0.4mm の PZT G の Power も大きいという理由から, ばね定数, つまり固いバネに大きな入力を与え, 同一変位という条件下で実験をおこなっているためであると考えられる。次に, 長方形 PZT I は 125Hz 近傍に共振を持つ。下図 2.17 において黄色で示した線に対応している。2 次の共振としておよそ 812Hz 近傍に共振がある。図 2.17 において最後に紫色に対応している線が大きな台形形状 PZT J であり, 共振は 160Hz 近傍, そして約 320Hz, 460Hz に 2 次モード 3 次モードによる共振を確認することができる。言及するのが後になってしまったが, 理論上片持ち梁の共振はマルチモードになっており, 2 次モードや 3 次モードが存在することが理論的に証明されている。図 2.17 より, 正方形と長方形のモードが少ないことから四角形に近づけると単一共振に近づき, 台形形状など他の形状では複数のモードが表れやすい可能性を示唆している。共振の位置はばね定数などの片持ち梁の剛性による影響であることが確認できた。形状を大きくすると共振は低くなり, 複数のモードが表れることが大きな台形形状の piezoelectric 素子から確認できた。

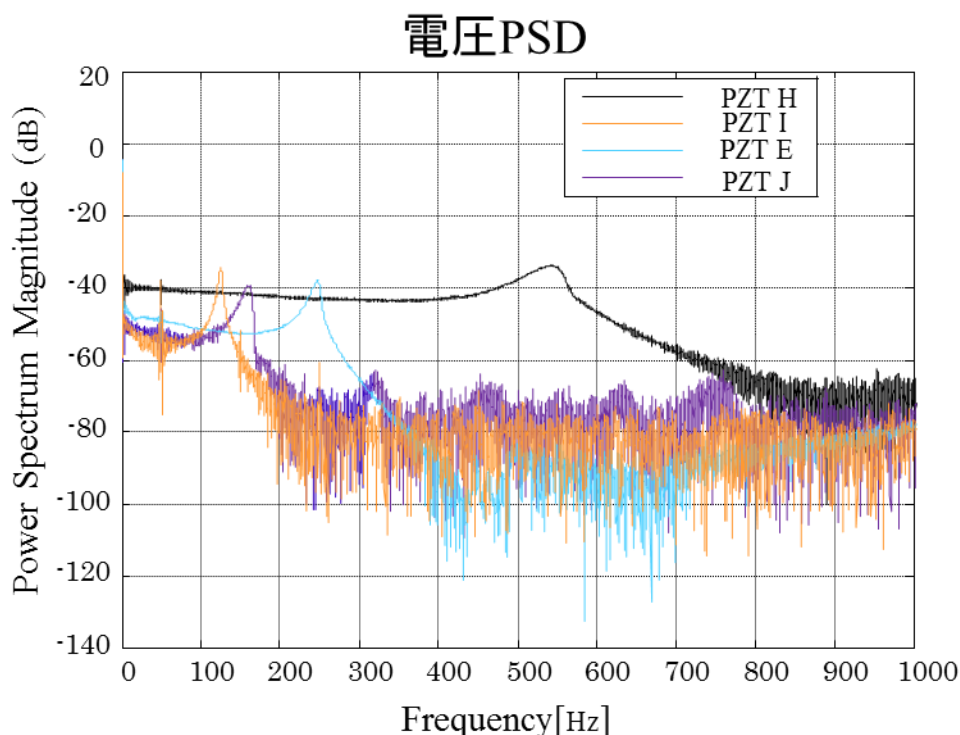


図 2.17 : PZTE, PZTF, PZTG の piezoelectric 素子電圧 PSD-厚さ違いの比較

## 2.7 インピーダンス整合試験

前節の負荷試験結果から電圧波形は負荷抵抗に依存することが確認できたため、負荷抵抗の値を変化させながら電圧、電流、電力そしてエネルギーなどがどのように変化するかという特性変化を検証する。実験構成は同様である。

PZT A と PZT C の実験結果を以下に示す。PZT A に対するインピーダンス整合の結果を図 2.18 に示す。図 2.19, 図 2.20 は PZT C のインピーダンス整合の結果である。図 2.19 は大きく抵抗値を変化させて整合をとった結果, 図 2.20 はピーク周辺を細かく抵抗値を変化させて整合をとった結果になる。図 2.19 の結果から  $1\text{k}\Omega$  周辺に整合抵抗値を持つことが予想できる。図 2.20 の結果から最大電力と出力エネルギーの整合抵抗値を  $5.5\text{k}\Omega$  に持つことが確認できた。PZT A と PZT C のインピーダンス整合の結果から違いが確認できる。PZT A に関しては  $12.8\text{k}\Omega$  と  $200\text{k}\Omega$  という別の抵抗値にそれぞれ最大電力, 出力エネルギーのピークを持つことが確認できる。対して, PZT C は最大電力と出力エネルギーが同一の整合抵抗値にピークを持つ。

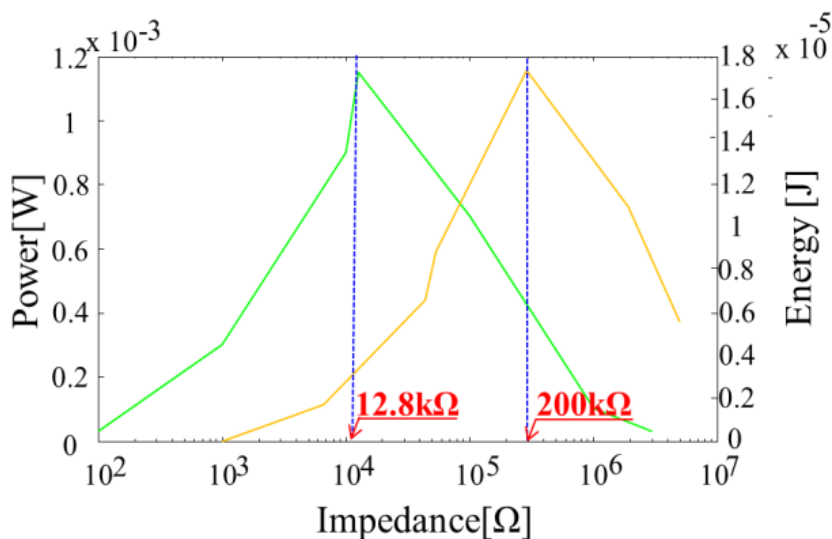


図 2.18 : PZT A のインピーダンス整合

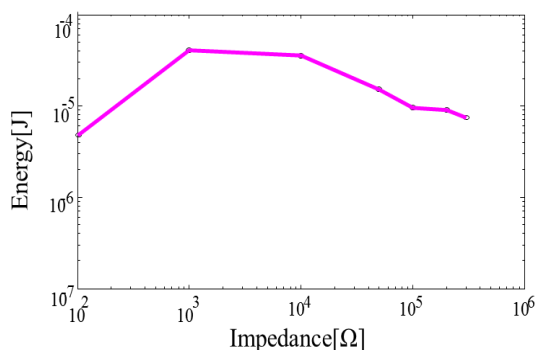


図 2.19 : PZT C のインピーダンス整合

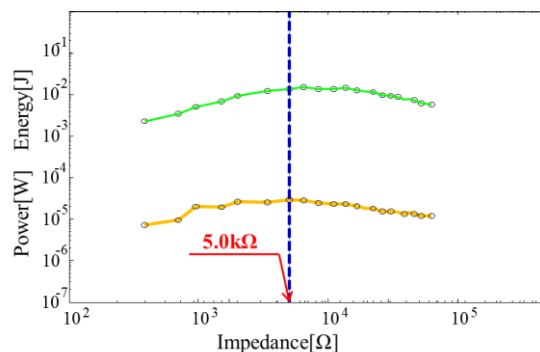


図 2.20 : PZT C のインピーダンス整合  
拡大図

上述の違いの原因として考えられるものが共振周波数の影響である。PZT A は共振周波数を二つ持つが PZT C は共振周波数を一つしか持たない。 piezo素子は電気回路の分野においてコンデンサと等価である。コンデンサの理論抵抗値は電気回路より以下ようになる。

理論抵抗値の式より  $\omega=2\pi f$  に対し、共振周波数  $f$  [Hz] が影響することがわかる。PZT A の場合、それぞれ 39Hz と 586Hz において整合抵抗値が異なることが理論式からも確認できた。それでは全 piezo素子の中で唯一二つの共振周波数をもつ PZT A に種々の抵抗値を負荷した実際の波形がどのようなになるかを以下の図に示す。

下図より共振周波数を二つ持つ場合、低周波の時、整合抵抗値は大きくなり、減衰が少なくなるため時間積分の導出を含む出力エネルギー最大となる。高周波の時、整合抵抗値は小さくなり、瞬間の最大値は大きい減衰が早く電力最大となることがわかる。

本節最後に、日を改めて計測した piezo素子それぞれの共振周波数と整合抵抗値、実測の容量値、マッチングをとった際の最大電力そして出力エネルギーを表 2.14, 2.15, 2.16 にまとめる。表 2.14, 2.15, 2.16 では一目見て数値がわかるように 単位をそろえている点、表中最も数値の高いデータに 色づけしている点 に注意されたい。表 2.14, 2.15, 2.16 より PZT C を除き出力が高いデバイスはばね定数、つまり剛性の高いデバイスであることがわかる。入力振幅一定という条件下においては剛性の高いデバイスを大きな入力エネルギーによってたわませ、はじいた方が最大電力・出力エネルギーに関しては大きくなるということである。表 2.14, 2.15, 2.16 にまとめたデバイスは曲げ剛性、ばね定数などが違うため同じ変位を印加した際の入力エネルギーが異なる。よって定常的な振動での実用化を考慮した時、比較する意味はない。

$$Z = \frac{1}{\omega C} \quad (7)$$

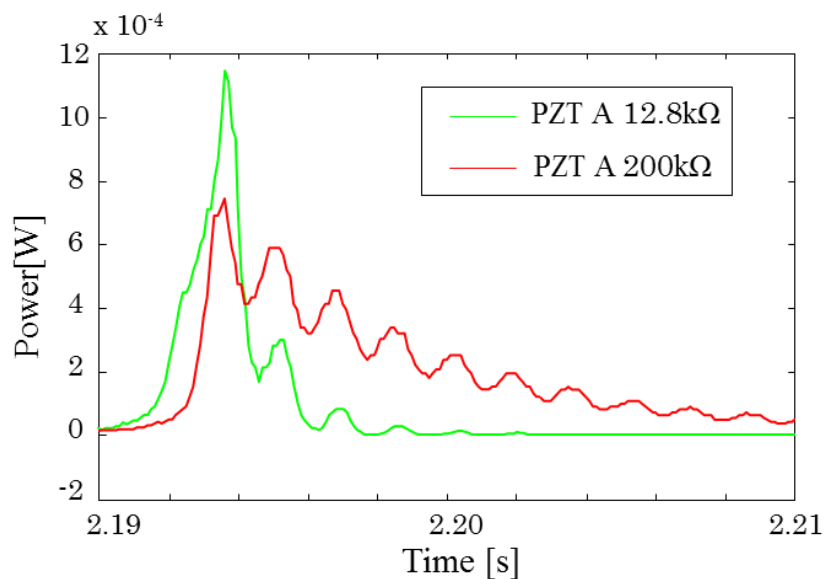


図 2.21 : PZT A の電力波形-整合抵抗の比較

しかし、スイッチのように任意の変位入力を強制的に印加するようなアプリケーションを実用化のターゲットとして考慮した場合これらの数値は意味を持つことになる。本稿では①定常的な振動のある環境②強制的に外部から振動を印加する環境の双方での実用化を検討するため、双方の特性を解析した。同一荷重における出力電圧，エネルギーに関する比較は後述する効率試験で行う。

表 2.14, 2.15, 2.16 にまとめたそれぞれのパラメータは数回の実験の平均値を掲載しており、理論式によって導出されている。整合抵抗値，最大電力そして出力エネルギーは既に(4)，(5)，(7)式に記述したとおりである。(8)式に示した容量値は整合抵抗値  $Z$  を求めることによって導出できる。PZTE~PZT J は同じ材料で作られており，PZT プレート同士の間隔は 0.1mm で一定である。PZTE, PZTH そして PZTI は形状違いであり，面積が同様になるように設計されている。上述の PZTE~PZT J に関して容量値を比較すると素子が厚くなることで容量は減少し，理論式通り面積  $S$  の増加に伴い容量値も増加する傾向である。(9)式に示した理論式通り，大まかに共振周波数に伴って増加する傾向にあることが確認できる。

それぞれの最大電力と出力エネルギーを評価していくと全素子の中で最大は 136mW, 146 $\mu$ J という実用化の観点から希望的な数値を記録していることがわかる。この PZTH だけでなく PZTC や PZTF, PZTG など一度のステップ入力通信デバイスをはじめとする何らかのデバイスを起動することはできなくとも後段にエネルギーを蓄えるような回路を実装することによってアプリケーションとして十分実用化可能であると考えられる。これらの piezo 素子には上述のようなスイッチなど外部から大きな入力を与える実用化の形が望ましい。

今回は振幅入力一定 0.5mm という条件下で実験を行っているので弾性変形の範囲内で動作させるという前提の下より大きな 1.0mm などの入力を与えるのも効果的と思われる。そうすることで表 2.14, 2.15, 2.16 よりさらに大きなエネルギーを回生できることだろう。その際には PZT という材料が脆性材料であるということを考慮する必要がある。脆性材料は金属材料などにおいて存在する降伏点がない。金属の場合，除荷した際に本来の形まで戻らない塑性変形領域があるためおおよそ部材に対して加えて荷重の大きさをフィードバックすることができる。しかし，脆性材料において降伏点はなく，塑性変形もほとんどない状態で唐突に破断する。よって，実験中に気づかぬうちに破断ということが起こりうるため使用する際の荷重に気を配らなくてはならない。加えて，脆性材料の場合，何度も使用しているうちにマイクロクラックの集積や進展による亀裂との連結が生じ，脆性破壊が生じる可能性も高まるため金属板に貼付するなどして応力の分布に気をつける必要がある。

$$C = \frac{1}{\omega Z} = \frac{1}{2\pi f Z} = \frac{Q}{V} = \frac{\epsilon S}{d} \quad (8)$$

$$k = \frac{\omega^2}{m} = \frac{(2\pi f)^2}{m} \quad (9)$$

表 2.14 : 各素子の特性①

	PZT A	PZT B	PZT C	PZT D
共振周波数[Hz]	39, <b>586</b>	275	550	404
整合抵抗値[kΩ]	12.8, 200	3.0	5.0	20
C:容量[nF]	21.2	<b>193</b>	50	19.3
ばね定数[N/m]	<b>3063</b>	1200	980	400
最大電力[mW]	1.2	1.7	<b>14</b>	1.0
出力エネルギー[μJ]	17	7.9	<b>24</b>	5.9

表 2.15 : 各素子の特性②

	PZT E	PZT F	PZT G
共振周波数[Hz]	243	520	<b>770</b>
整合抵抗値[kΩ]	5.7	3.8	2.4
C:容量[nF]	<b>115</b>	80	86
ばね定数[N/m]	680	3244	<b>5052</b>
最大電力[mW]	0.96	38	42
出力エネルギー[μJ]	3.1	<b>48</b>	23

表 2.16 : 各素子の特性③

	PZT H	PZT I	PZT J
共振周波数[Hz]	<b>542</b>	125	160
整合抵抗値[kΩ]	2.9	7.6	4.9
C:容量[nF]	100	167	<b>203</b>
ばね定数[N/m]	<b>3660</b>	234	454
最大電力[mW]	<b>136</b>	0.16	1.1
出力エネルギー[μJ]	<b>146</b>	1.6	5.7

## 第 3 章 エネルギー回生効率試験

### 3.1 発電特性試験方法

まずは以下に実験構成図 3.1 と実験写真図 3.2 を示す。

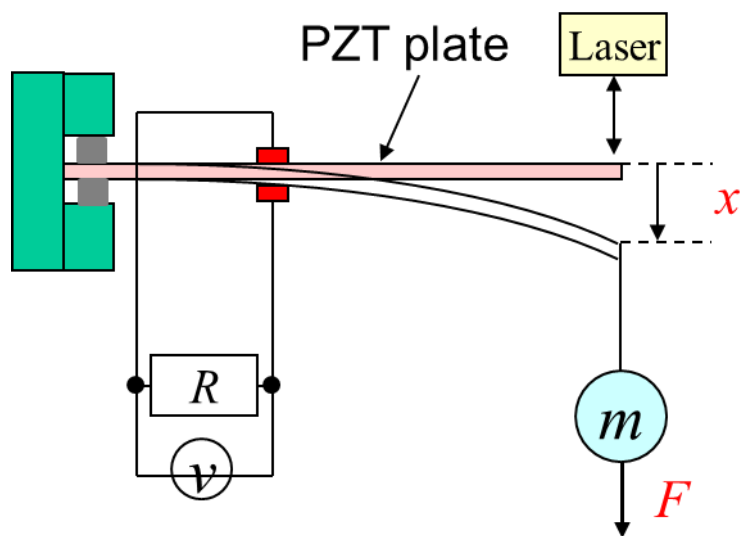


図 3.1 : 実験構成

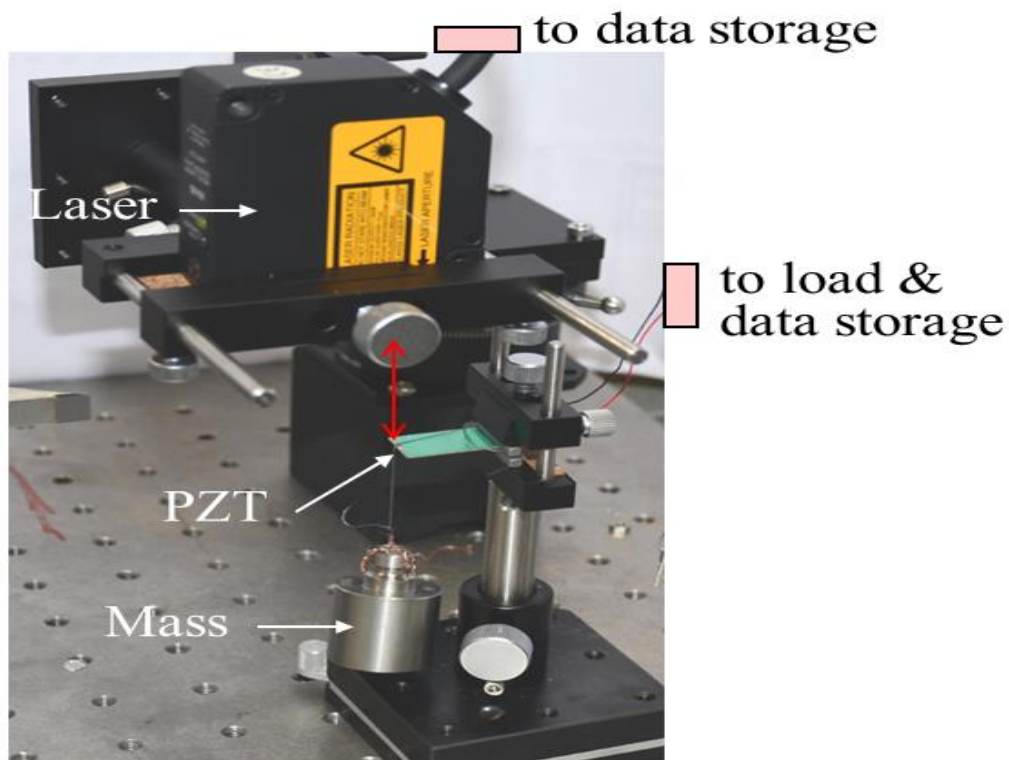


図 3.2 : 実験構成写真

ピエゾ素子に任意の負荷抵抗をつなぎ、片持ち梁状にクランプするという実験構成は第2章の実験構成と同様である。ピエゾ素子の先端に上から変位計 Laser をあて、錘を糸で吊るす。錘は分銅を用いる。第2章の実験とは異なりフラップ棒ではなく、錘を用いて初期変位を与え、初期変位と分銅の重量からピエゾ素子への入力エネルギーを導出している。分銅を糸で吊り上げた状態から糸を切ることによってピエゾ素子を振動させ、電圧出力を回生する。

電圧出力から第2章と同様に出力エネルギーを導出し、出力エネルギーと入力エネルギーのエネルギー比より効率[%]を導出している。対象のピエゾ素子としては10種類すべてのピエゾ素子を対象に試験を行った。レーザーは第2章2節で説明したものと同様の SUNX 製と KEYENCE 製のレーザーを使用している。データの解析に関しても第2章2節と同様のオシロスコープ、DSP の他に KEYENCE 製のデータロガーを用いた。

実験で評価した導出量は以下に示すとおりである。

(10)式の入力エネルギーはPZTプレートをばね近似して導出することによって $W = \frac{1}{2}kx^2$ となる。フックの法則 $F = kx$ を用いることによって $W = \frac{1}{2}Fx = \frac{1}{2}mgx$ と求めることが出来る。(4)式の電力の最大値については電力波形の最大値を2乗し、負荷抵抗値 $R$ で割った値を用いる。 $P = VI$ と $I = \frac{V}{R}$ より $P = \frac{V^2}{R}$ として求めることが出来る。(5)式の出力エネルギーに関しては第2章で前述のとおりである。(11)式の効率に関しても上記の実験構成で説明したように入力エネルギーと出力エネルギーのエネルギー比を用いて導出している。以上が評価したパラメータになる。

## 解析量

$$\text{入力エネルギー: } W_i[\text{J}] = \int Fdx \approx \frac{1}{2}Fx_0 = \frac{1}{2}mgx_0 = \frac{1}{2}m^2 \frac{g^2}{k} \quad (10)$$

$x_0$ :初期変位

$$\text{効率: } \eta[\%] = \frac{W_o}{W_i} \times 100 \quad (11)$$



## 3.2 無負荷試験

無負荷試験の結果を表 3.1 以下に示す。無負荷試験を行った理由は、2 章 7 節において負荷する抵抗値によってそれぞれの電圧波形がことなることを確認したためである。負荷をつけてしまうと負荷に依存した波形になってしまい、それぞれのピエゾ素子固有の波形を確認できなくなってしまうためである。よって本節において無負荷試験を行った。

試験概要 3 章 1 節同様であり、後述のとおりである。計測を開始してからクランプしたピエゾ素子の先端に錘を糸で垂らしている。そこから、糸を切ることによって過渡状態へと移行していることがわかる。錘による荷重が取り除かれるためピエゾ素子が機械振動する。機械振動しながら減衰し、最終的に減衰しきるために変位 0 で安定する。

電圧波形に関しては変位同様であり、その後ピエゾ素子に錘を吊り下げた糸を切ることによってピエゾ素子が荷重から開放され振動することによって電圧が発生する。電圧が発生した後に、タイムエンベロープを形成して 0 に収束する。電圧の最大値は荷重による変位量に依存し、ピエゾ素子の剛性に影響されている結果となっている。以下の表 3.1 より素子それぞれの形状や剛性などの特性によって同じ荷重をかけても異なる導出量を確認した。電圧波形はそれぞれの素子によって特徴的な波形をしており、PZT B は減衰が小さい波形になっており、他のピエゾ素子に比べて高周波波形が細かい振動波形であった。他のピエゾ素子に関しては最大電圧のみ顕著に異なり、機械振動と電圧波形にあまり違いはなかった。

表 3.1 より、同じ錘の重さ 50g を用いているにもかかわらず PZT A は 0.1mm 程度しか変化せず、対して PZT D に関しては同じ錘にもかかわらず 1mm 程度の変位を見せている。これは PZT A が高剛性材料でできており、対して、PZT D は剛性が低い材料であることがわかる。同じ力を加えているにもかかわらずこれだけの変位の差が出ている理由によって、先ほどの変位量を一定とした実験では加えられていた力がそれぞれの素子によって異なり PZT A に加えられていた力は大きく、PZT D に加えられていた力は小さかったのではないかと推測が立つ。

表 3.1 : 無負荷試験結果

導出量 種類	変位 [mm]	入力 [J]
PZT A	0.14	3.30e-005
PZT B	0.60	1.46e-004
PZT C	0.47	1.15e-004
PZT D	0.98	2.40e-004

### 3.3 負荷試験

本実験は3章2節で説明した無負荷試験と同様の実験であり、4種の piezo 素子全てを対象とし実験を行った。錘の重さは同様に 50g を使用している。違いは負荷抵抗を負荷している点である。負荷抵抗としては各種 piezo 素子によらず 10k $\Omega$  で一定にしている。実際に得られた波形と表を以下、表 3.2 に示す。

表 3.2 で用いた導出量に関しては前述の同様である。ただし、表に示した  $E$  の文字はエネルギーの略記である。最大電力値は電圧の 2 乗によって求められ、PZT B が最も大きな結果となっている。理論式より、表に示した入力エネルギーの大小関係に関しては変位量の大きさによって決まる。定抵抗 10k $\Omega$  を負荷した場合の効率の結果としては PZT B が最高の値をとっていることがわかる。このことは出力エネルギーにおいて最高の値をとり、入力エネルギーに関して4種の中で比較して中間の値をとっていることから妥当性がある結果となっている。

表 3.2 : 負荷試験結果

導出量 種類	変位 [mm]	最大電力 [w]	入力 E [J]	出力 E [J]	効率 [%]
PZT A	0.2	9.4e-004	4.9e-005	1.5e-006	3.0
PZT B	0.7	1.4e-003	1.8e-004	9.1e-006	5.1
PZT C	0.5	9.0e-003	1.2e-004	3.7e-006	3.1
PZT D	1.4	3.8e-003	3.4e-004	5.6e-006	1.7

### 3.4 インピーダンス整合試験

以下に示す試験はピエゾ素子の最高効率を引き出すために、PZTの整合抵抗を負荷し、効率を再評価する実験である。実験構成や実験条件に関しては先程まで示した実験構成や条件と同様である。ピエゾ素子にかかる荷重は前回までと同様で50gの錘を使用している。ちなみにPZTAは50gでは変位量が足りず、100gを使用した。本節では、インピーダンス整合試験では弾性変形内で荷重を加えていることに注意されたい。それぞれのPZTに対する整合抵抗値は既出の数値、2章7節のステップ入力試験の結果である表2.14に示した値を使用した。

以下に示した表3.3は整合抵抗を負荷した場合の各種パラメータである。それぞれの数値を負荷抵抗試験の表と比較したところ、PZTB, C, Dに関しては50gという同じ錘を用いたために入力エネルギーの値に大きな違いは見られない。対してインピーダンス整合の効果が出た出力エネルギーの値は向上していることが表を比較することでわかる。結果として効率が荷荷を一律10kΩに設定した負荷試験より改善されていることがわかる。前節の試験において、PZTBの効率が良かったのは積分値が大きいという出力の特性に加え、整合抵抗値が一律の抵抗値10kΩと近かったためであると考えられる。図3.4には10kΩを負荷した場合と整合抵抗を負荷した場合の効率を棒グラフに示した。

表 3.3: インピーダンス整合を考慮した場合のパラメータ

導出量 種類	変位 [mm]	最大電力 [mW]	入力 E [μJ]	出力 E [μJ]	効率 [%]
PZTA	0.3	0.1	140	7.4	5.5
PZTB	0.6	8.1	150	7.5	5.0
PZTC	0.6	10.0	160	7.9	4.9
PZTD	1.3	5.3	320	10.1	3.2

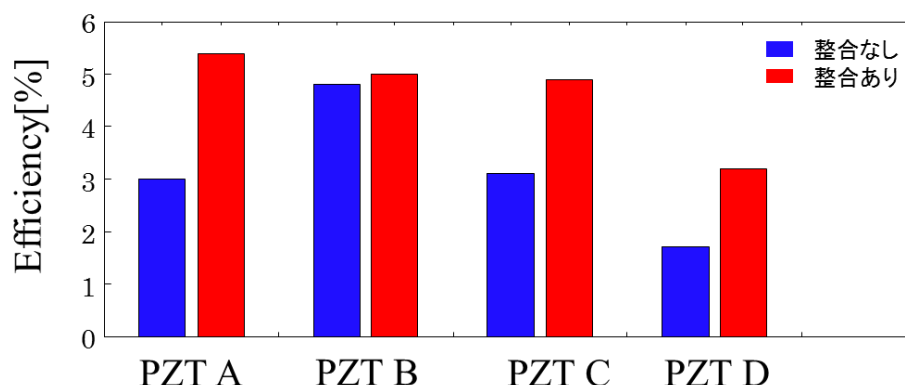


図 3.4 : 整合抵抗による効率上昇

### 3.5 錘依存性の検証

本実験では piezo 素子に対し、錘の重量を変化させながら前節試験を行うことで効率変化を検証した。piezo 素子にかかる荷重は前回までと異なり材料・形状・厚さ影響を解析したいという観点からそれぞれの piezo 素子の厚さ、構造そして素材等を考慮した加重を使用している。前節、インピーダンス整合試験と本節、錘依存性試験では動作領域が異なることに注意されたい。

前節インピーダンス整合試験では弾性変形領域内の荷重を加え、その際の各種パラメータを評価したが、本節では錘依存性試験では弾性変形から塑性変形を生じるギリギリまで荷重をかけ、各種パラメータなどを評価した。一般的な脆性材料の応力-歪線図を以下に示す。図 3.5 に示した応力-歪線図からわかるように脆性材料である PZT は延性材料のように降伏点や比例関係が見られなくなる点がなく、唐突に破断に至るため、安定的に試験できる軽い荷重の範囲で試験を行った。

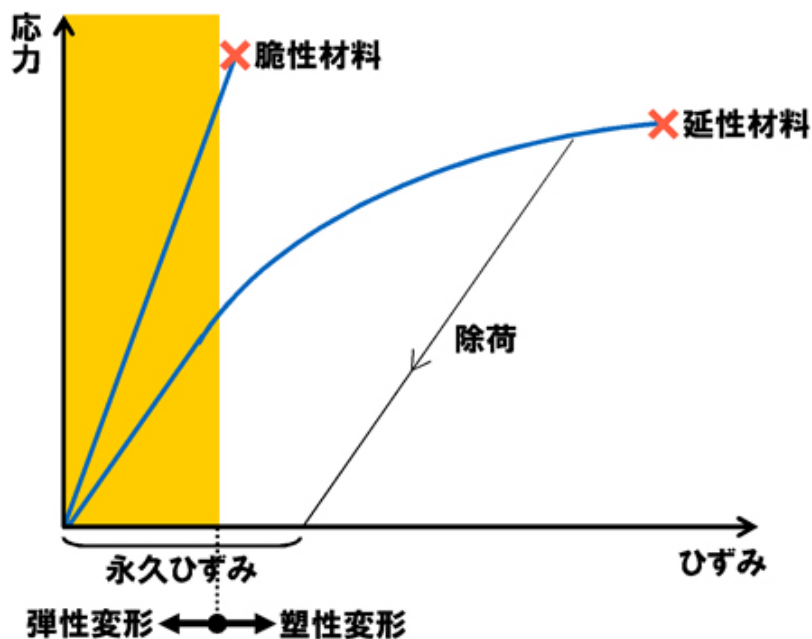


図 3.5 : 材料による応力-歪線図

以下の図 3.6, 3.7, 3.8 に実験結果を示した。それぞれの Piezo 素子の入力エネルギー，出力エネルギー，効率を評価した。図 3.6, 3.7 よりそれぞれ 2 次のオーダーで出力が上昇していることを確認できた。図 3.6, 3.7 では横軸には先端に吊り下げる錘の荷重を表しているが，入力エネルギーに関しては横軸，錘の重量  $m$  の 2 乗に比例し増加することが本稿(10)式より確認できる。出力エネルギーが錘の重量  $m$  に 2 次のオーダーで上昇することを以下に解析的に導出したい。(12)式には圧電素子における出力電圧の理論式を示した<sup>[6]</sup>。Piezo 素子は圧電素子に含まれ，定数が違うだけなので(12)式を用いる。(13)式には(12)式を本稿(5)式に代入した結果である。(13)式より明らかであるが，時間積分内の  $F^2$  を運動方程式  $F=ma$  に従い，分解すると  $m^2$  が表れる。上述より，出力エネルギーも錘の質量  $m^2$  のオーダーで増加することが導け，図 3.7 の増加関数も最小二乗の結果も妥当性がある。

出力エネルギーの図 3.7 において最も重要な点が PZT A のみ出力エネルギーが飽和してしまっている点である。青の一点鎖線で囲んでいる領域，約 170~350g 付近において確認でき，出力エネルギーが最小二乗の黒線より離れ始めていることが確認できる。この現象がどのような理由によって発生し，どのような影響を与えるのかについては次頁にてげんきゅうする。

$$\text{圧電素子の出力電圧: } V[V] = F \frac{d_{33}}{C_d} = F g_{33} \frac{l}{A} \quad (12)$$

$d_{33}$ :等価圧電定数

$C_d$ :等価容量

$g_{33}$ :電圧出力係数

$l$ :長さ

$A$ :断面積

$$\text{素子の出力エネルギー: } W_o[J] = \int F^2 \frac{\left(g_{33} \frac{l}{A}\right)^2}{R} dt \quad (13)$$

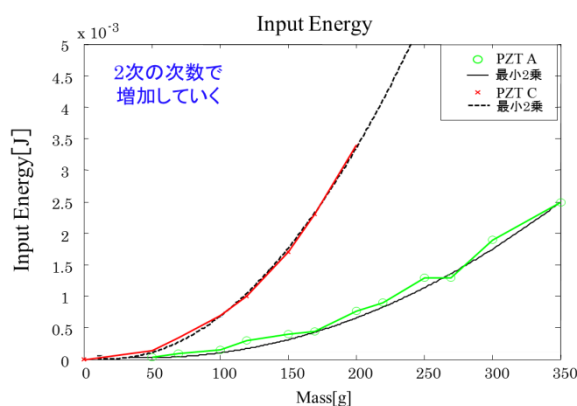


図 3.6 : PZT A ・ PZT C の錘の質量-入力エネルギー

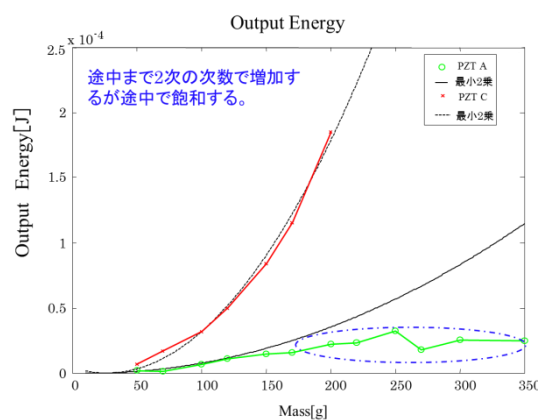


図 3.7 : PZT A ・ PZT C の錘の質量-出力エネルギー

下図 3.8 には(11)式を用いて導出し、図 3.6, 3.7 の入出力エネルギーのエネルギー比である効率を示した。まず、○の点で表した PZT A について言及する。PZT A は概ね効率一定であることが確認でき、200g 付近から効率が低下していくことを確認できる。これは先ほど図 3.7 で示した出力エネルギーの飽和の影響である。入力エネルギーは理論式通り、0~350g まで 2 次のオーダーで増加するのに対し、出力エネルギーは図 3.7 で既出の通り、170~200g あたりから一定である。そのため効率も 170~200g あたりから低下していく。もう一方の PZT C に関しては最大荷重点 200g まで概ね一定の効率を保つ。PZT A のような出力エネルギー一定となる現象は生じないことが図 3.8 より確認できる。本試験ではそれぞれ破断しない変位で測定を行ったため、測定点の数がことなっている。対し、PZT C は 200g で破断しそうな変形を生じていたため、200g までのみの測定点となっている。このことから、PZT C は破断の限界まで効率一定の状態を保持していることが図 3.8 より確認できた。なぜそのような現象が生じるのかという具体的な解析は次頁で行う。

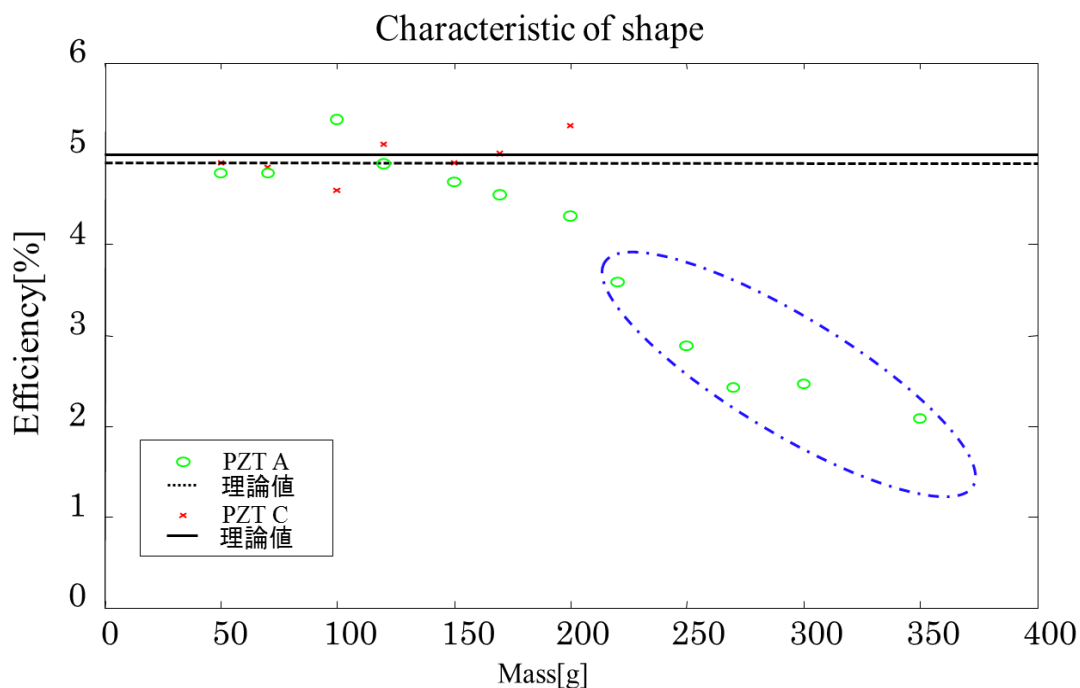


図 3.8 : PZT A ・ PZT C の錘の質量-効率

前頁において piezo 素子に生じる飽和特性に関して示した。PZT A においては確認できたが、PZT C に関しては確認できなかった。この差異に関して推測として、形状による影響ではないかと考えた。理由としては図 3.9 と導出過程を参照していただきたい。以下に長方形形状の片持ち梁と三角形形状の片持ち梁の理論的な応力分布を示している。図 3.10 と図 3.11 より長方形形状は長手方向である、変数  $x$  によって応力の大きさが変化することを示唆している。しかし、三角形形状の片持ち梁では応力は全て定数であるため、面全体にわたって一定である。長方形形状の piezo 素子にかかる応力は固定端、図 3.10 点線部で応力最大となる。結果、長方形形状の piezo 素子は固定端で応力集中を引き起こし、固定端で強く発電するようになる。だが、先端にかかるモーメントは 0 のために先端では全く発電しないというような形状による発電飽和を引き起こす。その結果を実験的に証明した図が図 3.7 と図 3.8 になる。ちなみに図 3.10 と図 3.11 に示した応力分布の理論式は形状によって最大値は変わらない。それぞれの理論式に使ったパラメータを補足すると  $\delta$ : 応力,  $M$ : モーメント,  $Z$ : 断面係数,  $W$ : 荷重,  $b$ : 幅,  $h$ : 厚さとなっており, (14), (15), (16) 式にまとめた。

曲げモーメントによる応力は以下の式により表される。

$$\sigma = \frac{M}{Z} = \frac{My}{I}$$

次に断面二次モーメントを導出する。以下図 3.9 に導出で利用したモデル図を示した。

$$I = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \frac{b_0}{l} x \times y^2 dy = \frac{b_0}{l} x \left[ \frac{1}{3} y^3 \right]_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} = \frac{b_0}{l} x \left( \frac{h^3}{24} + \frac{h^3}{24} \right) = \frac{h^3 b_0}{12l} x$$

上記で導出した断面二次モーメントを上述の応力の式に代入する。ちなみにモーメントは先端荷重を  $W$  とすると  $M = -Wx$  (絶対値をとった) となる。以下に三角形形状の応力分布  $\delta$  を理論的に導出した。

$$\sigma = \frac{M}{Z} = \frac{My}{I} = \frac{-Wx \times \frac{h}{2}}{\frac{h^3 b_0}{12l} x} = -\frac{6Wl}{h^2 b_0}$$

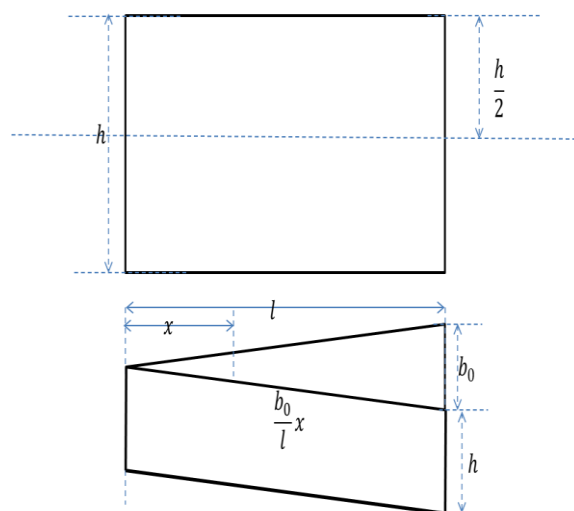


図 3.9 : 断面二次モーメントの導出

### Cantilever of rectangular

$$\text{stress } \sigma = \frac{M}{Z} = -\frac{6Wx}{bh^2}$$

(Maximum at fixed point)

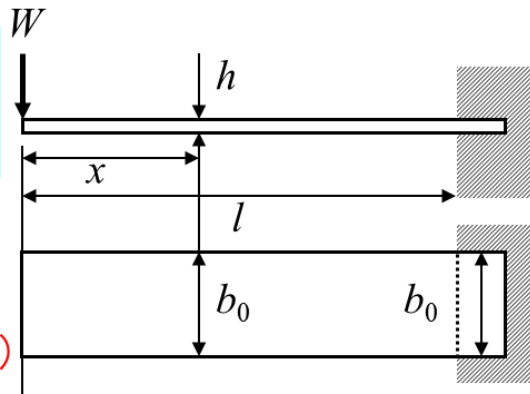


図 3.10 : 長方形形状の片持ち梁における応力分布

### Cantilever of triangular

$$\sigma = \frac{M}{Z} = -\frac{6Wl}{b_0h^2}$$

(Constant at everywhere)

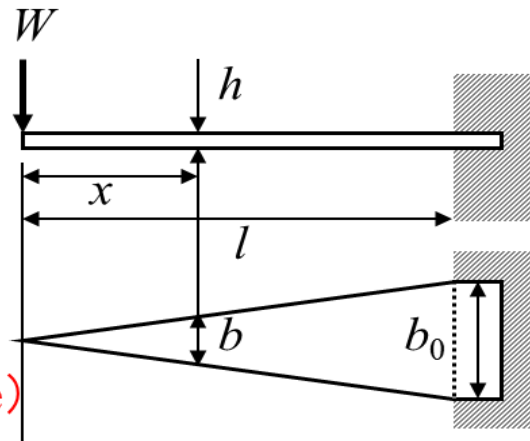


図 3.11 : 三角形状の片持ち梁における応力分布

応力:  $\delta[\text{N/m}^2] = \frac{W}{A}$  (14)

A:断面積  
W:荷重

モーメント:  $M[\text{Nm}] = Wx$  (15)

x:距離

断面係数:  $Z[\text{m}^3] = \frac{I}{y}$  (16)

I:断面 2 次モーメント  
y:図心軸からの距離



37 頁~40 頁では理論的・実験的に形状による応力分布の違いについて示した。

上述の内容に加えて、以下に片持ち梁の BMD, SFD とそれぞれの形状に対する解析の計算結果をまとめる。BMD と SFD は材料力学の分野において一般的な曲げモーメントとせん断力の度合いを示した図である。以下の図 3.12 から片持ち梁においては固定端で応力が最大になると確認できる。シミュレーションに使用したソフトは Solid works。FEM 解析を数値導出し、同一荷重を先端に負荷した際の応力分布を導出した。応力は Von mises 応力として導出している。FEM は Finite Element Method と呼ばれる最も有名な数値解析法の一つである。

図 3.13 と 3.14 には FEM によるシミュレーション結果を示した。こちらのシミュレーション結果からも長方形形状では固定端において応力集中を生じ、三角形状では面積内の応力は均一であるという結果を得ることが出来た。このことから台形状は破断寸前まで面内応力一定、長方形形状は固定端に応力が集中し、先端はモーメント 0 である。そのため固定端付近でのみ発電され、出力エネルギーが飽和してしまうと考察した。

図 3.13 と 3.14 ならびに 39 頁~本頁までの解析より、形状によって素子(材料力学では部材)にかかる応力分布が異なり、その影響で応力・出力エネルギーの飽和を引き起こすこと、ならびに三角形状が振動発電において有効的な形状であることを明らかにした。

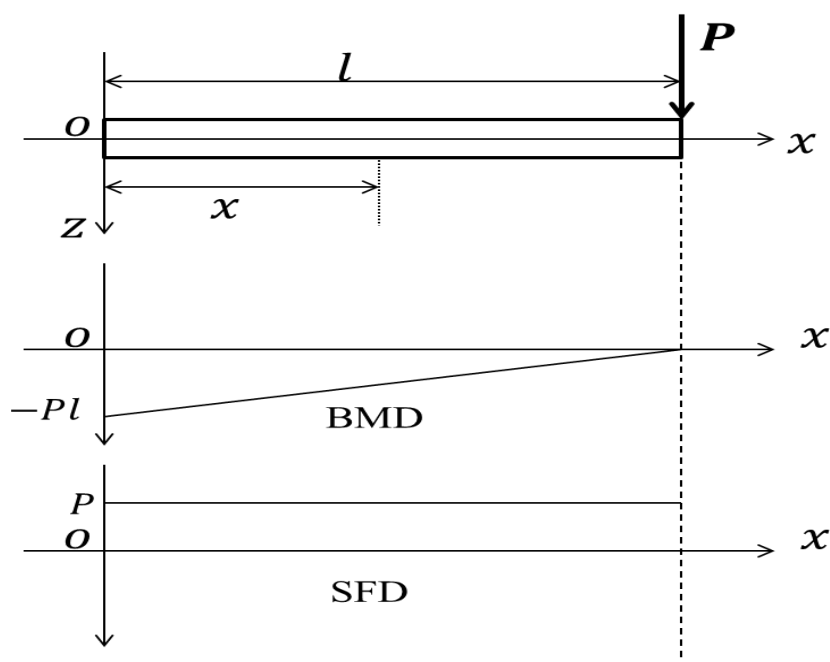
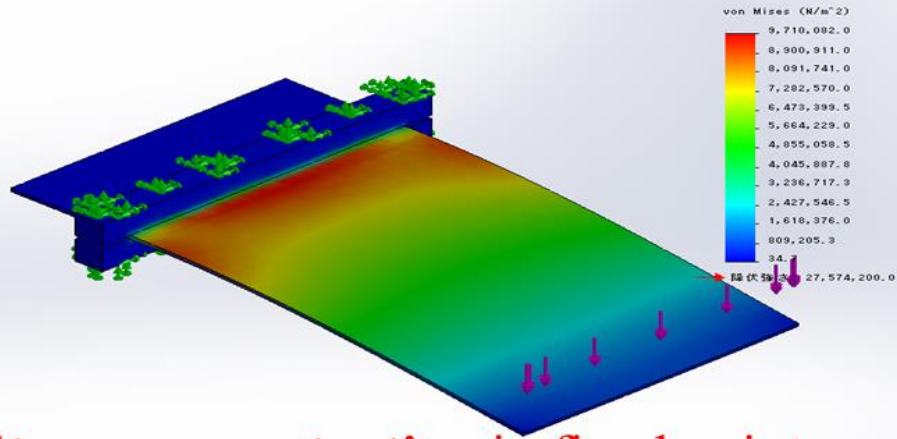


図 3.12 : 片持ち梁の BMD と SFD

E3\*名: #ikaku  
229\*名: 229\* / 1  
表示212\*: 静解析 節点応力 応力1  
変形23-ID: 16.0339

Maximum displacement : 0.35mm

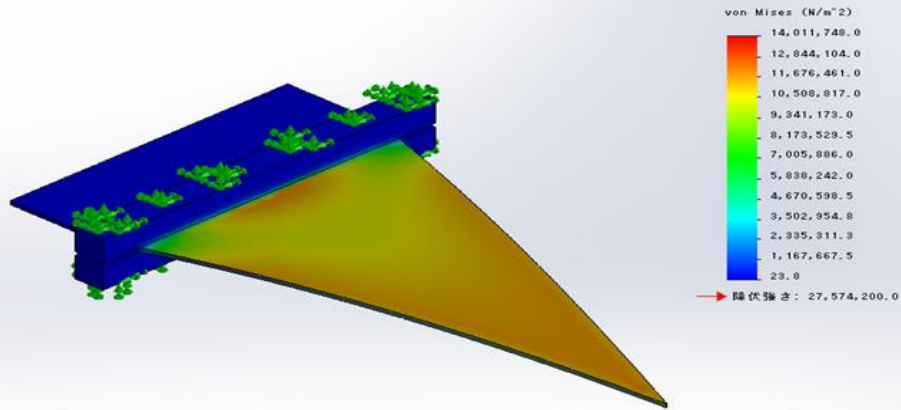


**Stress concentration in fixed point**

図 3.13 : 長方形形状の片持ち梁における応力分布(FEM 解析)

E3\*名: sankaku  
229\*名: 229\* / 1  
表示212\*: 静解析 節点応力 応力1  
変形23-ID: 9.41316

Maximum displacement : 0.59mm



**Constant at everywhere**

図 3.14 : 三角形形状の片持ち梁における応力分布(FEM 解析)

続いて、錘依存性に関する試験を PZT E~PZT G に対し行い、以下に結果をまとめた。結果は厚さ違い、形状違いで比較するためにそれぞれで図 3.15~図 3.20 にまとめ、様々なパラメータを表 3.4 にまとめた。まず下記に示した図 3.15~図 3.17 は厚さ違いの Piezo 素子群であり、同面積、同素材、同構造である。図 3.15 に示した図は荷重を印加した時の各素子の入力エネルギーである。厚くなるに従い、ばね定数が上昇するためより多くの荷重を弾性領域内でかけることができることがわかる。対し、薄いものほど柔らかく変形しやすいために入力エネルギーの上昇率が大きくなり、急激に増加する傾向にあることが確認できた。次ページ出力エネルギー対荷重も図 3.15 同様の特性が図 3.16 より確認できる。変位量と出力電圧の比例関係は 2 章で確認されている事実なので、薄い Piezo 素子ほど軽い錘で変位を生じ、出力エネルギーが高い。前述の入出力エネルギーによって得られる効率は薄い素子ほど効率がよいという結果になった。中でも 0.2mm の素子は効率 29% を記録した。薄い素子の効率がよい理由として (14) と (15) 式を示した<sup>6)</sup>。これらは片持ち梁の構成をとった素子に対し、先端に  $F$  の荷重を印加した際の出力電圧と効率を定式化したものである。(15) 式によると片持ち梁の構成をとった時の効率は厚さに反比例することが示唆される。これは図 3.17 の結果と一致することがわかる。しかし、注意して頂きたいことは効率の良さと実用化できるかという問題は別である。効率が良くても出力エネルギーがアプリケーション稼働に必要なエネルギー量の満たせなければ実用化できない点に注意が必要である。

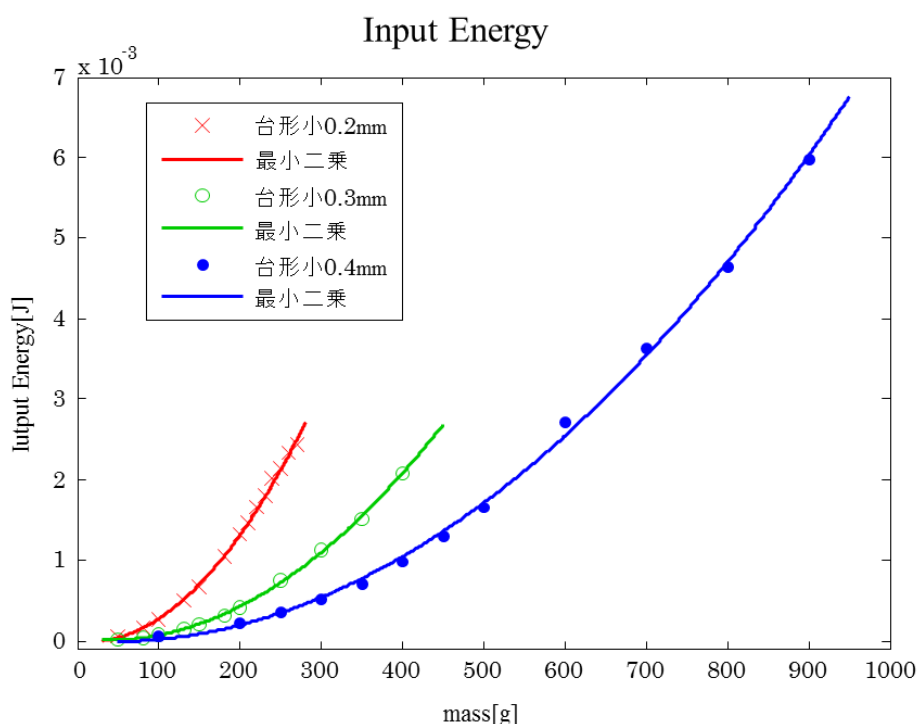


図 3.15 : 厚さ違いの入力エネルギー (PZT E~PZT G)

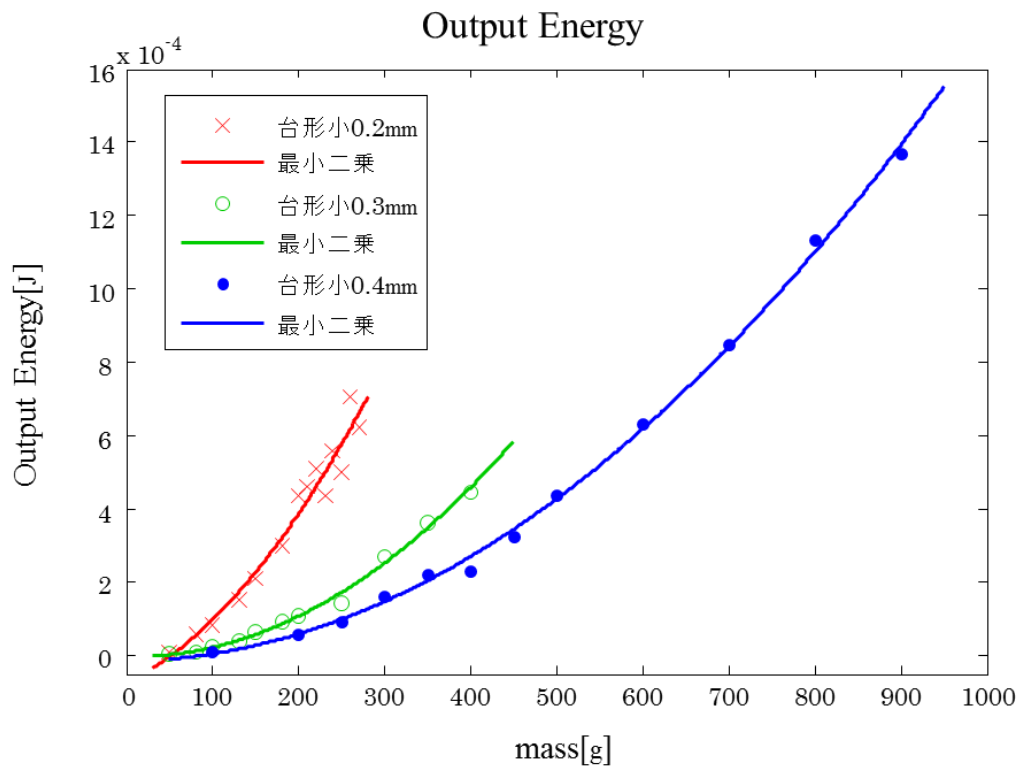


図 3.16 : 厚さ違いの出力エネルギー (PZT E~PZT G)

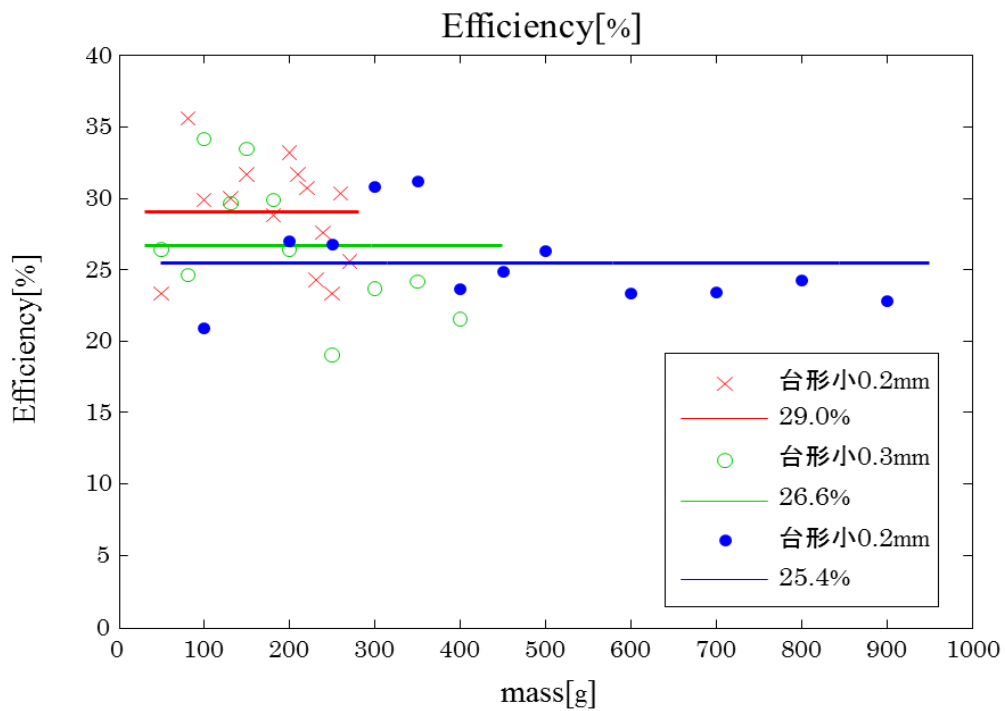


図 3.17 : 厚さ違いの効率 (PZT E~PZT G)

続いて、以下では形状違いの錘依存性試験の結果について考察する。形状違いの素子は PZT J 以外面積をなるべく近くなるように設計されており、厚さも同一に設計した。図 3.18 には先ほど同様入力エネルギー対荷重を示した。形状による違いとして、縦に長くばね定数の小さい piezo 素子ほど上昇度合いが急激で、ばね定数の高い固い素子ほど緩やかな形となる。上述の厚さ違い同様出力エネルギーもばね定数などの固さによって傾きや形が異なる傾向にある。柔らかいものほど変位が出やすく、出力がしやすいという傾向にある。固いものほど変位が出づらいため出力も出にくい傾向であることを確認した。形状違いの効率を図 3.19 に記述した。全形状、全素子の中で台形形状 0.2mm が最高効率であることを確認し、入出力エネルギー上昇率の最も高い長方形形状の効率が最も悪いことが確認できた。続いて上昇率の高い大型の台形形状の効率が悪く、最も入出力エネルギーを集積することができない正方形の効率が良いことも図 3.20 から確認できた。

(15)式と図 3.20 を照らし合わせると、台形を除き、ばね定数が高い順に効率が良い傾向が確認できた。台形形状がよい理由は上述のとおりであり、特徴として正方形と三角形の中間に位置するので、面積の割に共振周波数が高く設定でき、ばね定数も正方形に比べると低い三角形に比べれば高いという中間に位置するような特徴を持っている。しかし、全体的に効率が高いためにはまずは PZT の材料を考慮することが効率改善の近道であることを示唆している。続いて、加工の段階で台形形状にすることによって上述の理由によってさらに piezo 素子の効率を改善できると推察した。最大効率のための最適形状についての考察は(15)式を深く掘り下げることで可能であると考えるが、研究の範囲外となるためここでは言及しない<sup>6)</sup>。

パラレル型片持ち梁先端荷重  $F$  による出力電圧:

$$V[V] = \frac{3}{4} g_{31} \frac{l}{tw} F \quad (14)$$

$g_{31}$ : 電圧出力係数

$l$ : 素子の長さ

$t$ : 素子の厚さ

$w$ : 素子の幅

パラレル型片持ち梁先端荷重  $F$  による効率:

$$\eta[\%] = \frac{\int 9\pi k l^2 f C g_{31} dt}{4t^2 w^2} \quad (15)$$

$k$ : ばね定数

$C$ : 容量値

$f$ : 共振周波数

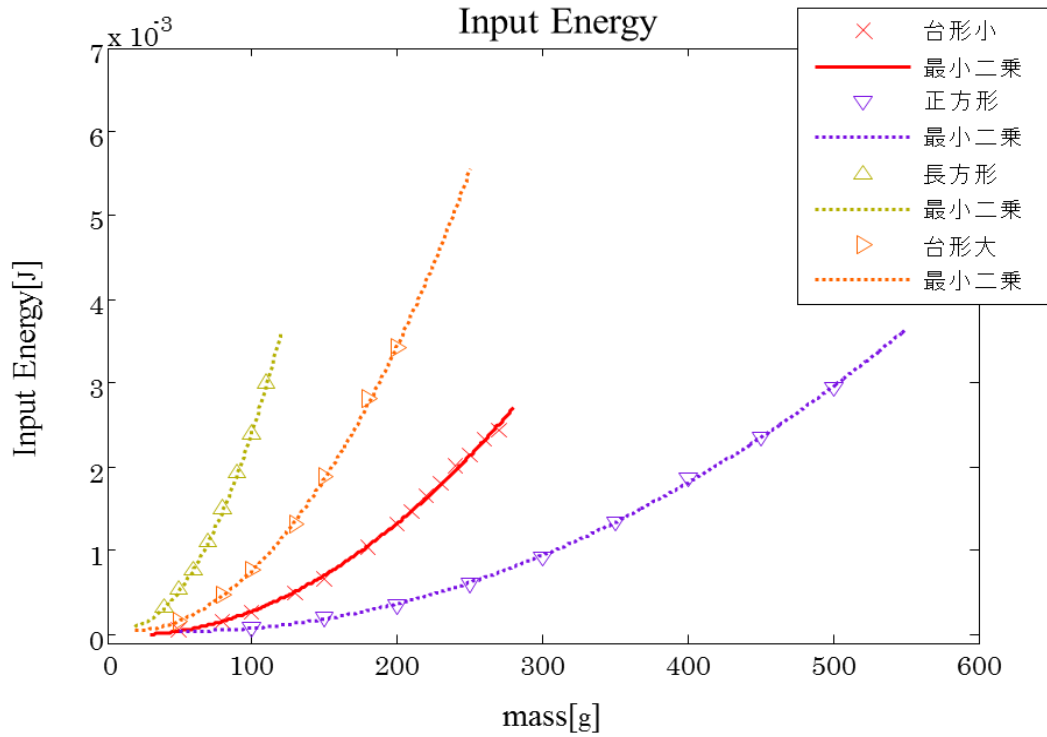


図 3.18 : 形状違いの入力エネルギー (PZT H~PZT J)

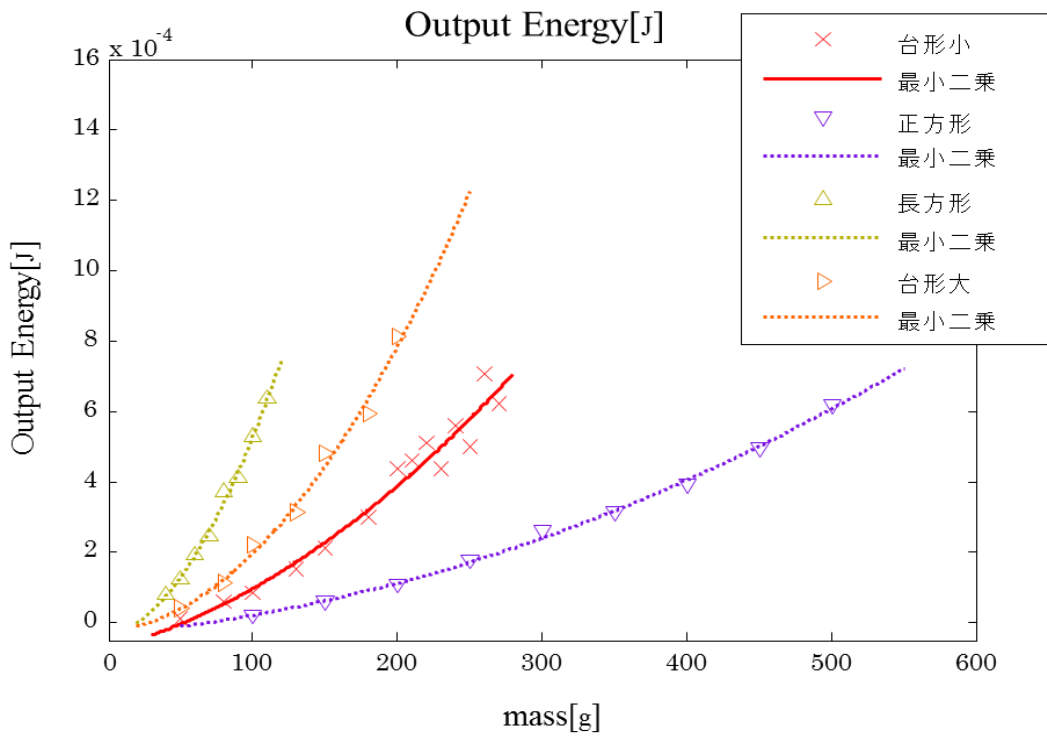


図 3.19 : 形状違いの出力エネルギー (PZT H~PZT J)

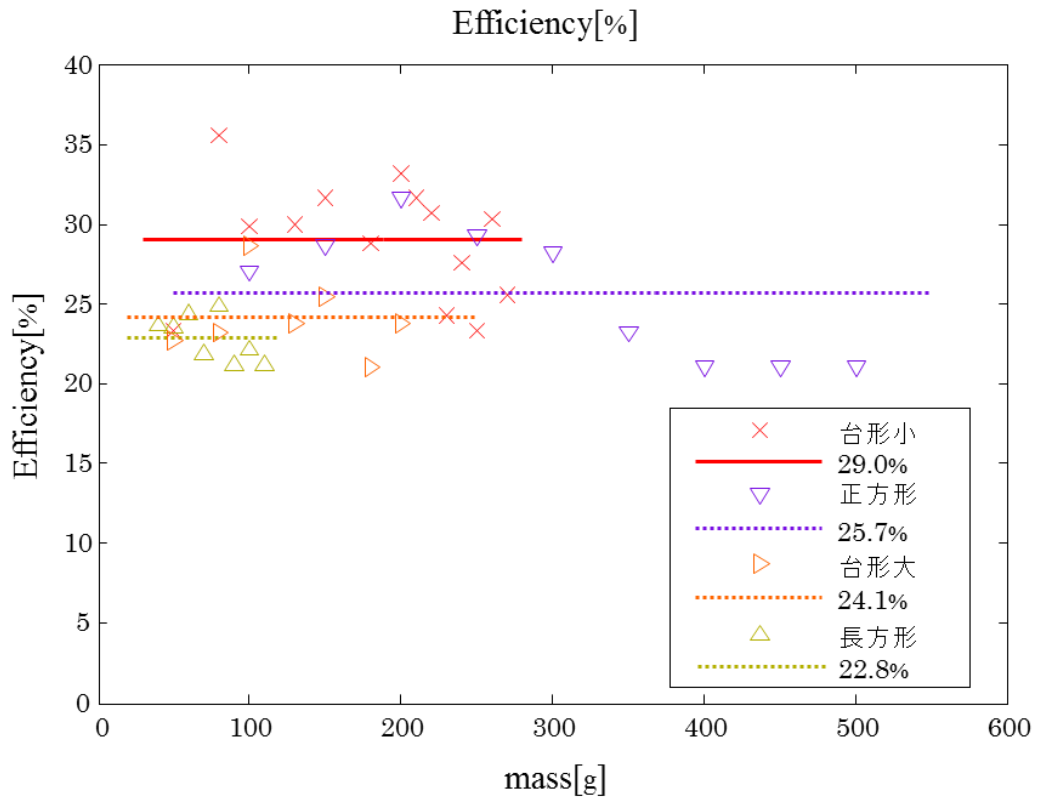


図 3.20 : 形状違いの効率 (PZT H~PZT J)

表 3.4:各素子の規格化パラメータ

	台形 0.2	台形 0.3	台形 0.4	正方形	長方形	台形大
	PZT E	PZT F	PZT G	PZT H	PZT I	PZT J
$\frac{\text{出力 } E}{\text{荷重}} [\text{J/g}]$	1.7e-006	5.4e-007	7.8e-007	7.7e-007	3.9e-006	2.5e-006
$\frac{\text{変位}}{\text{荷重}} [\text{mm/g}]$	6.4e-003	2.0e-003	1.3e-003	2.1e-003	47e-003	16e-003
$\frac{\text{出力 } E}{\text{面積}} [\text{J/mm}^2]$	15e-008	4.4e-008	2.2e-008	5.4e-008	118e-008	19e-008
$\frac{\text{出力 } E}{\text{荷重} \cdot \text{面積}} [\text{J/g} \cdot \text{mm}^2]$	3.1e-009	1.0e-009	1.4e-009	1.8e-009	8.7e-009	2.2e-009
出力 E [ $\mu\text{J}$ ]	82	24	12	23	530	220

表 3.4 に各素子の規格化したパラメータをまとめた。表 3.4 より明らかであるが、同一の荷重を負荷した際の出力エネルギーを始めとし、荷重を加えた際の変位量、面積当たりの出力エネルギーなど各種パラメータにおいて長方形形状が最もよいことがわかる。しかし、上述のように長方形形状には応力集中を引き起こし、出力エネルギーの飽和を確認した。ならびに他実験結果では 100g で破断したという結果も報告されているため、使用する際の実験構成などに細心の注意を払う必要がある。入力の制限、アルミ板に張り付けて使用するなど実験構成を工夫することによって非常に有用となることが示唆される。表 3.4 において出力エネルギーは 100g を負荷した際の出力エネルギーである。

前述の結果より、スイッチのようなアプリケーションによって実用化を検討した場合、台形形状 0.4mm に 1.4mm の入力用いることで最大 1.4mJ という高出力を確認できた。この出力を後段の回路に蓄えることでなんらかのアプリケーションを稼働させることは十分に可能である。ここに一つ具体例について記述したい。本研究チームで試験的に用意した通信デバイスがあり、それは外部から電力を賄い、現在温度を出力端末に送信するという簡単なシステムをとっているデバイスである。このデバイスは回路を駆動させるために初期充電として 12mJ、そこから外気温を送信するために 5mJ 必要である。この実例からおよそ 9 回前後振動又は押し込むことにより初期充電が完了し、外気温データを送信するためにおよそ 4 回程度振動又は押し込むことで通信できることが導き出せる。スイッチのような形状では少し不便であるが、筐体内につめて振ることで発電できるような構造を考案すれば、問題なく実用化できることが示唆される。又は、実際に外部の環境にある振動源に素子を固定することで即座に充電・通信できることが想像できる。上述の構想内には素子の安全設計について全く議論していないが、本稿では実用化能否に焦点を当てているため、素子を壊さず長持ちさせられるかという点に関しては本稿では範囲外である。実用化の観点から考えると本章までの結果では実用化可能であるが、使いやすく、有効的に実用化できるかという点には疑問が残ることがわかった。

最後に、本章では、形状や厚さ違いによる応力分布の違いについて理論的、実験的に比較し、解析した。特に、効率について言及し、結果をまとめた。全体的に効率が高いことから PZT の材料を熟慮し、その後加工する段階において台形形状などの適した形状を製作することで効率をさらに上昇できると考察した。



## 第4章 一質点系発電特性

### 4.1 インピーダンス整合試験

3章では piezo 素子単体の特性について実験・解析し、それぞれの形状や厚さによる特徴を記載した。その結果、単体でも高出力・高効率の素子群であることを確認した。本章では3章の結果を一步進めて更なる出力改善、つまり高出力化について検討する。3章でもかなりの高効率と高出力を確認したが、より高出力化することで実用化への閾値を大きく下げることができる。そのため本節からは錘の影響について言及していく。

本章では先端に錘を固定負荷することで入力振動を持続させ、長い時間発電させることで高出力化する目的の下、実験を行った。試験構成そして試験写真は以下の図 4.1, 4.2 になっている。先端に任意の錘を固定し、前章の試験同様先端にステップ入力を加え、出力特性を確認した。錘と負荷抵抗を変化させながら、最大の出力特性となるような錘の値と負荷抵抗値の導出を試みた。素子は適度に丈夫で高出力が望める台形状 PZT C を用いた。

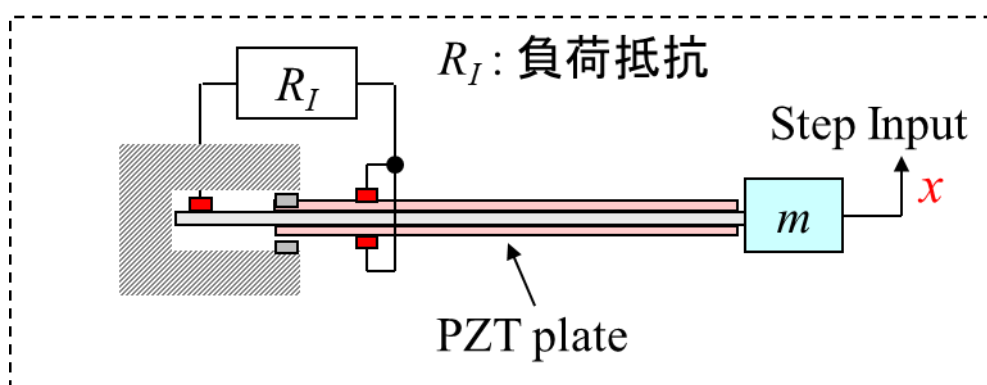


図 4.1 : 一質点整合試験構成

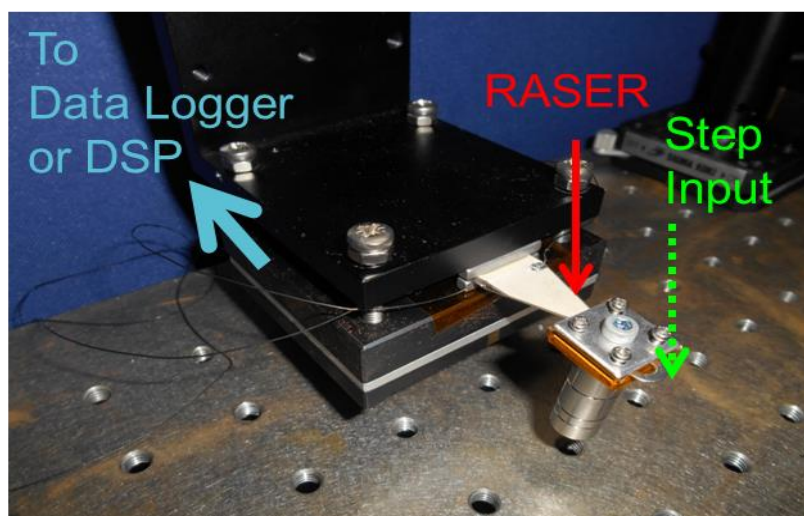


図 4.2 : 一質点整合試験写真

試験結果を以下の図 4.3, 図 4.5~4.7 に示す。以下に掲載した結果は PZT C の抵抗値に対する出力電圧, 電流, 最大電力, 出力エネルギー, 共振周波数である。横軸を整合抵抗値にしたのは先端に付ける錘によって整合抵抗値が変化するためである。錘と整合抵抗値の関係は以下に示す通りなので参照されたし。まず図 4.3 に示した出力電圧は錘による荷重が大きくなるにつれ出力電圧の傾きが小さくなることが確認できた。対し, 荷重が小さいと傾きが急である。電気回路の分野から考慮しても開放端に大きな抵抗値を負荷した方が出力電圧は大きくなる。これは図 4.3 の結果と一致する。先端に付加する荷重が大きいかほど出力電圧は変化しにくくなっていくことを確認した。図 4.3 の下部に piezo 素子の等価回路を添付した。補足するが  $R$  は内部抵抗,  $C$  は等価容量,  $r$  は負荷抵抗値を示している。

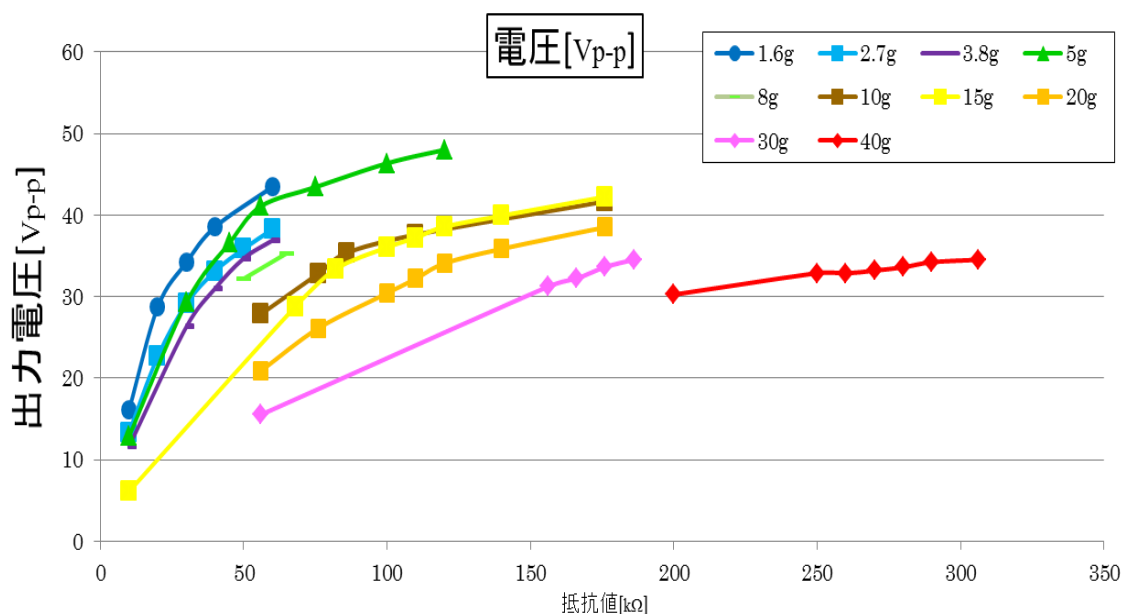


図 4.3 : PZT C の一質点出力電圧

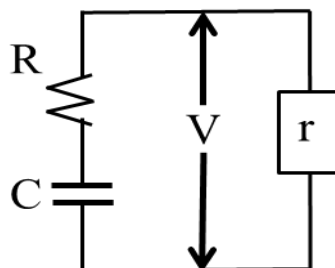


図 4.4 : ピエゾ素子の等価回路

次に電流を図 4.5 に示した。こちらの結果は非常に簡単で先端に付加する荷重を大きくするにしたがって電流量は減少する傾向を見せた。これは(7)式よりピエゾ素子の整合抵抗値は共振周波数 $f$ に反比例する傾向にあることがわかっており、付加する荷重が大きくなるに従い共振周波数が小さくなっていく。これは図 4.8 より明らかであるため、整合抵抗値は共振周波数低下に伴い増大していく。整合抵抗値が増大すると上述のように負荷端の出力電圧が大きくなるだけでなく、電流量の減少を起こす。そのため図 4.3 の電圧波形は荷重を大きくするに従い、電圧は大きくなる傾向にあり、逆に電流は減少する傾向にあることが示唆されている。図 4.5 では図 4.3 同様、負荷抵抗値が大きくなると電流は大きく減少しなくなる傾向にあることも確認できる。1.6g と 40g を比較すると最大電流の値は 1 オーダー変化していることを確認した。

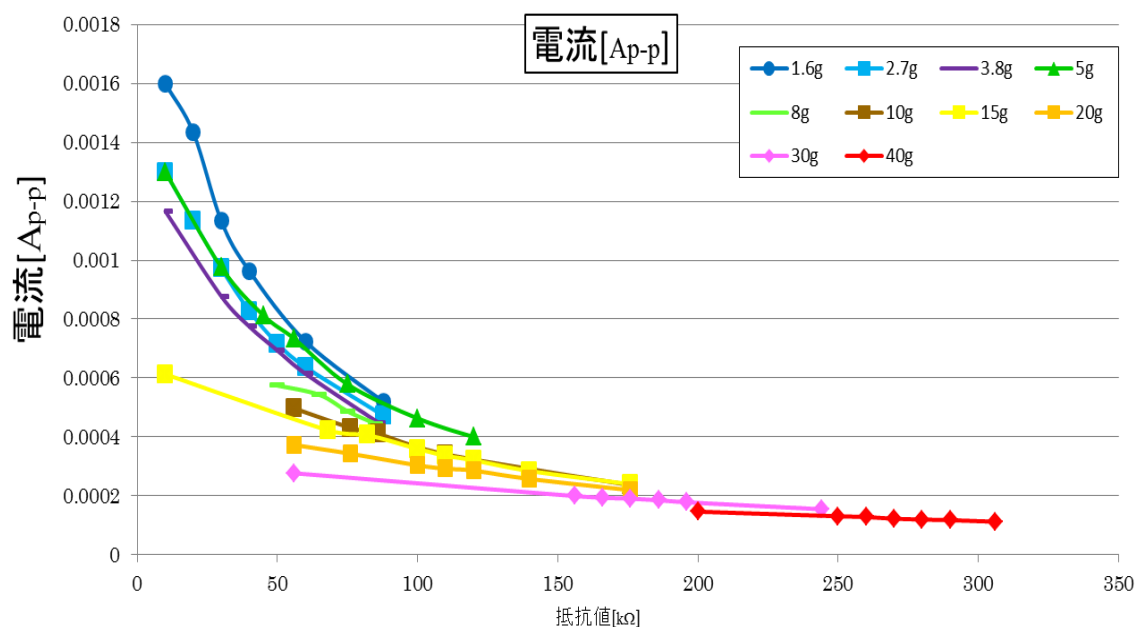


図 4.5 : PZT C の一質点電流

図 4.6 に最大電力を示した。図 4.6 より先端に付加する荷重は小さいほど最大電力が大きく、荷重が増加するに従い、減少する傾向にあることが確認できた。ならびにそれぞれの荷重を付加した際の整合抵抗値も図より目算できる。軽い錘を付加した時には負荷抵抗値の変化に伴い急激に電圧は増加していく。電流は急激に右肩下がりに変化していく。この積が電力になるためかけ合わせた際に最大値がでてくることがわかる。以下の図 4.6 では **Primary** にのみ合わせて整合をとっていることに注意されたい。電力に焦点を置いて議論すれば軽い錘が最適荷重であることが確認できた。上部にも示したが、付加する錘の荷重が大きくなるに従い整合抵抗値は大きくなってしまふ。これは上述の通り、共振周波数の関係。整合抵抗値をとった時には最大電圧は非常に大雑把にいうと次数が変わるほどの変化はない。これに対し、電流においては抵抗値の変化に伴い最大で 1 オーダー次数が変化していることが確認できる。このことから、電流の変化のほうが電力への影響が大きいことが考察される。そのため整合抵抗値が高くなる、大きな荷重は電力の観点から不利になってくると示唆される。

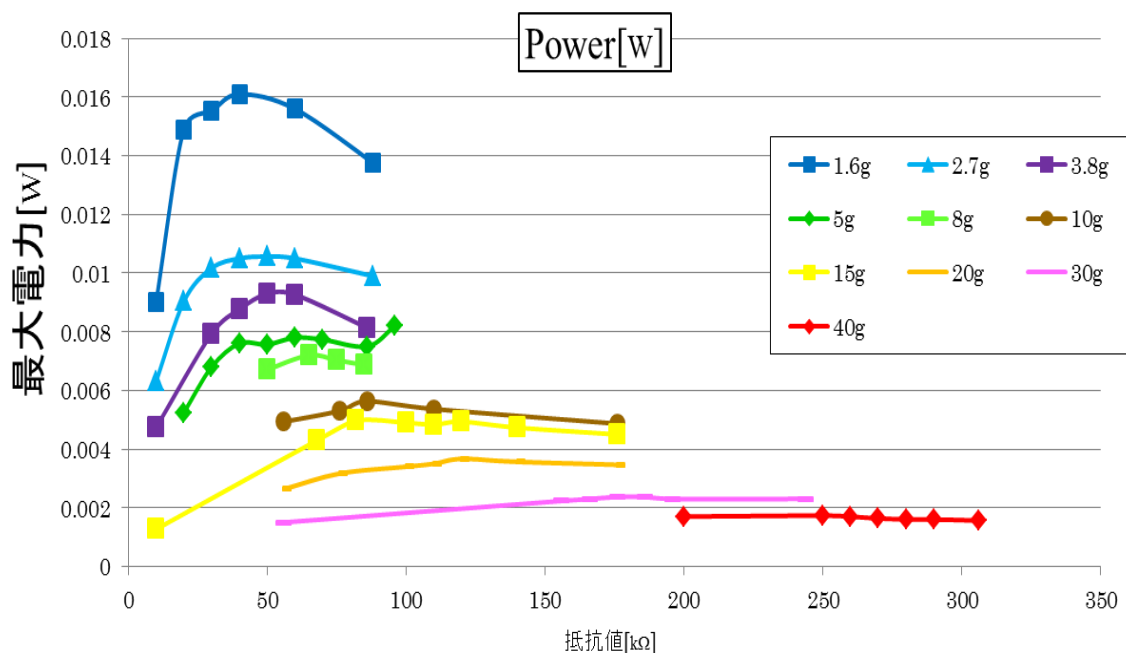


図 4.6 : PZT C の一質点最大電力

出力エネルギーを図 4.7 を示す。図 4.7 より、出力エネルギーの最大値は荷重によって大きく変化しないことが確認できる。それぞれの荷重を付加した際の整合抵抗値による出力エネルギーを比べていくと、荷重を大きくしていくに従い、最大を出力できる負荷抵抗値の幅が広がっていくことを確認した。出力エネルギーの図 4.7 からなるべく軽い荷重を付加する方が出力エネルギーに加えて電力の点から有効であることが確認できた。しかし、これらの評価はステップ入力による試験の場合である。

共振周波数と整合抵抗値を図 4.8 に示した。加えて、共振周波数の理論式を(16)式に記述した。共振周波数は理論(15)式の通り、先端に付加する荷重  $m$  に反比例することが確認できた。試験による整合抵抗は多少ぶれた結果となっているが、共振周波数減少に伴い、増加する傾向は理論(7)式からも妥当であると考察できる。

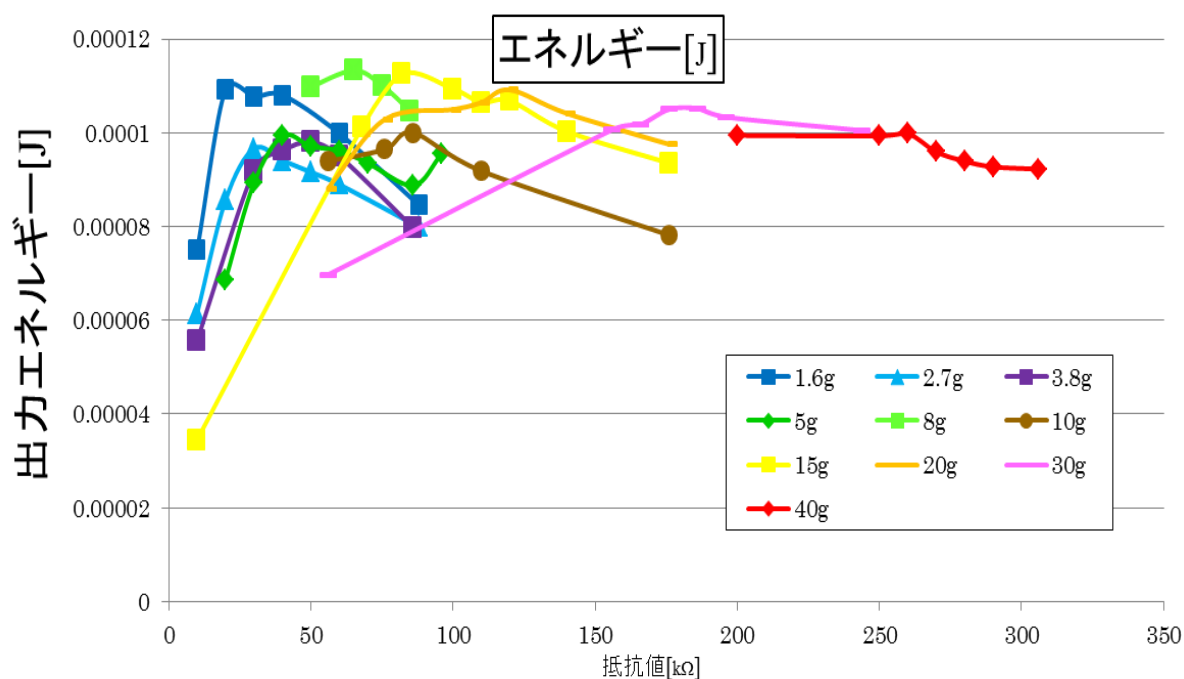


図 4.7 : PZT C の一質点出力エネルギー

共振周波数:

$$f[\text{Hz}] = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (16)$$

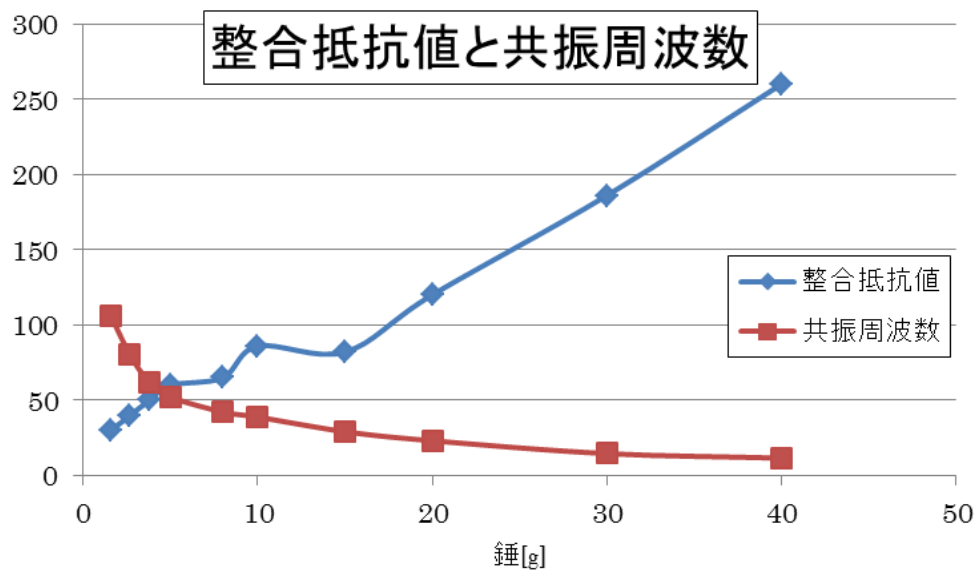


図 4.8 : PZT C の一質点整合抵抗値と共振周波数

次に他の素子に対しても同様に任意の荷重を付加した結果を以下に示す。全部で6つ素子がある中で、レンジの関係で出力上位3つをメインにした比較と下位3つの比較に分けて図としている。

まずは図4.9に電圧から表示した。図4.9より明らかな通り、出力電圧上位三つのピエゾ素子はばね定数が高いモノから順に序列が決まっていることを確認できる。これは2章でも触れたように入力エネルギーが異なるために生じる現象である。ばね定数の高いピエゾ素子も低いピエゾ素子も同様の変位を印加するという条件の下では、ばね定数の高い素子の方が変位を与えるために大きな力を入力している。結果、大きな入力エネルギーを受け取ったばね定数の高いピエゾ素子の出力電圧が高く出力されることを示唆する。ばね定数の高い素子の中でも興味深い結果が出ているのは正方形型のピエゾ素子である。正方形型のピエゾ素子は先端に付加される錘の荷重による影響をほとんど受けず、概ね一定の出力電圧を発電することが結果から確認できた。スイッチなどの実用化を考えた場合、先端に錘を付加せず、錘を付加した時と同様の出力電圧を得ることが可能なため、アプリケーションをコンパクトに製作することができる。正方形形状は長方形形状同様固定端に応力が集中的にかかるために素子の発電面積が荷重にかかわらず限定的になっているのではないかと考えている。対し、台形形状厚さ0.3mmや0.4mmは荷重をかけていくに従い、電圧出力も増加するという傾向にあることが確認できた。これは素子面全域に応力を分散させているため、全域で発電に寄与しているためではないかと仮説を立てている。

図4.10には下位三つの出力電圧を示している。これらの素子はばね定数が小さいために、容易に変位をだすことができ、これらの素子への入力エネルギーも小さくなる。よって出力電圧も小さい傾向になっている。

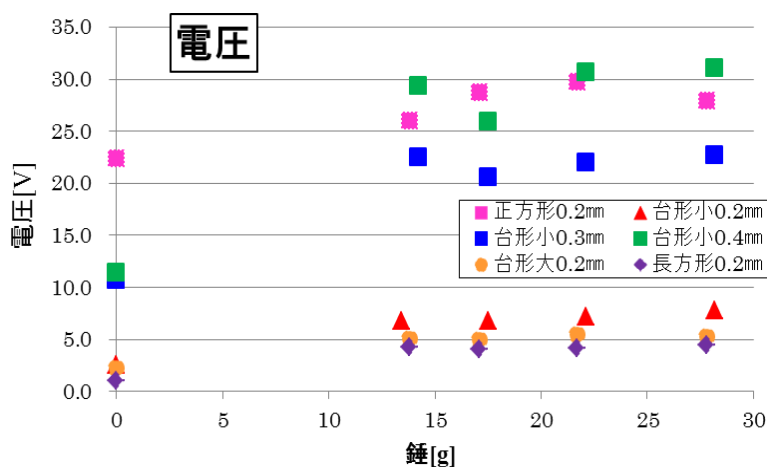


図 4.9 : 一質点ピエゾ素子の電圧 6 種

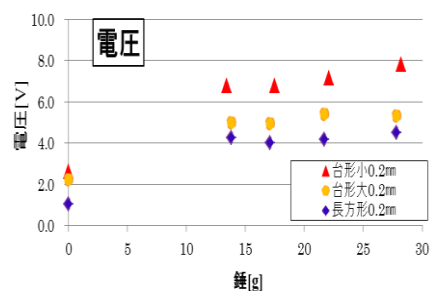


図 4.10 : 一質点ピエゾ素子の電圧 3 種

以下に示す二つの図 4.11, 4.12 にそれぞれピエゾ素子の電流を表した。電流は電圧の従属変数のため基本的には電圧に依存して大小関係が決まっている。ならびに、これらの結果より、共振周波数の低いものほど電流が小さい傾向にあることがわかる。こちらの図 4.11 内で最も興味深い挙動を示しているのは正方形である。正方形では錘によって出力電圧はほぼ変化しなかったが、共振周波数低下に伴う電流減少を顕著に生じていることが以下の図 4.11 より確認できた。

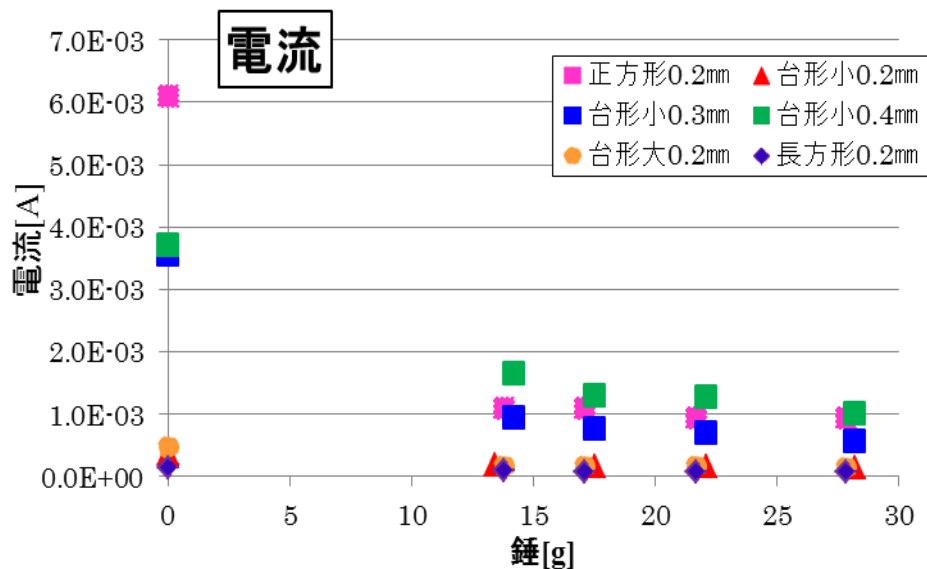


図 4.11 : 一質点ピエゾ素子の電流 6 種

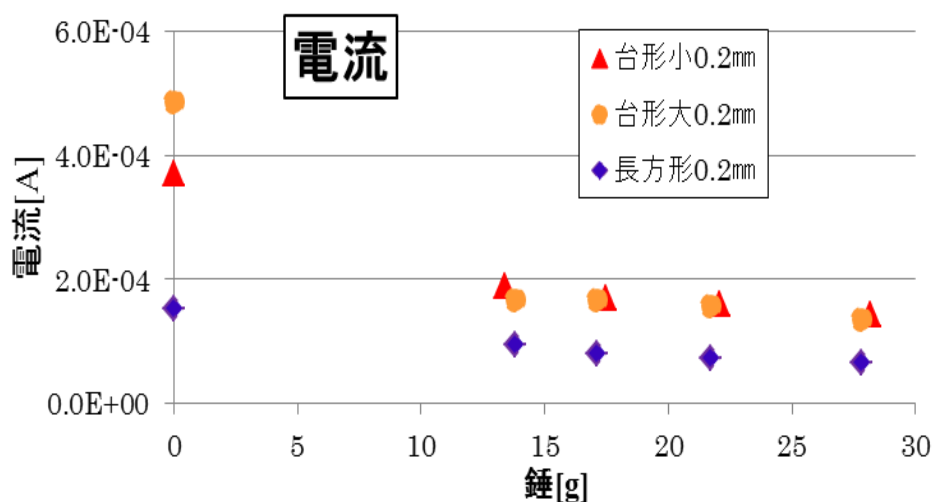


図 4.12 : 一質点ピエゾ素子の電流 3 種



以下に示す二つの図 4.13, 4.14 にそれぞれの素子の電力を表した。最大電力に関しては全ての素子において減少又は一定といった傾向が見られた。素子によっては先端に荷重を付加しない 0g が最大であることが確認できた。素子の中には軽い錘を付加した時に電力最大。図 4.6 同様、錘が重くなるに従い減少する傾向は全ての素子に共通する傾向であった。

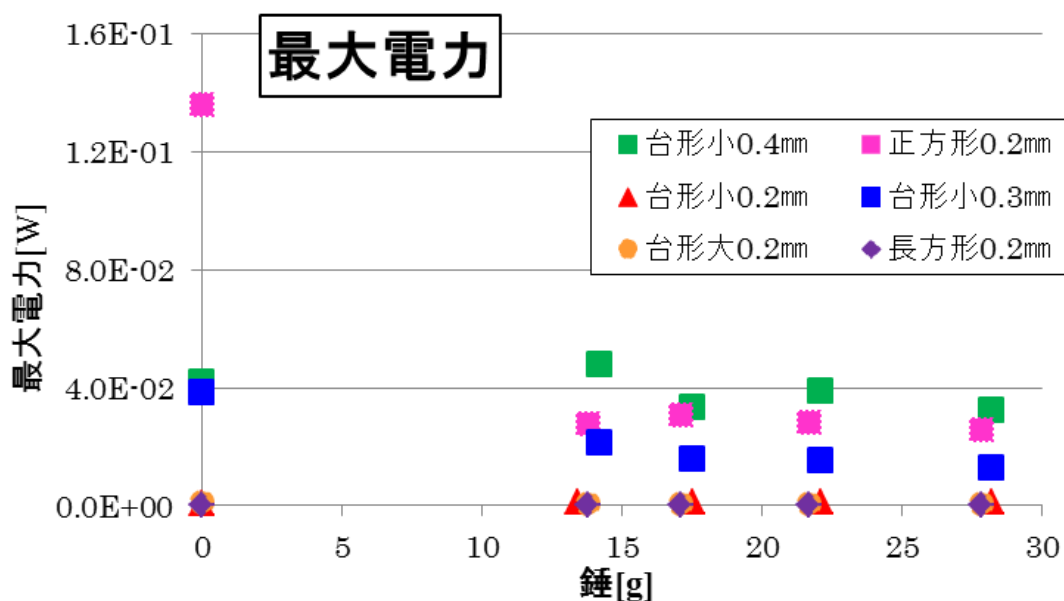


図 4.13 : 一質点ピエゾ素子の最大電力 6 種

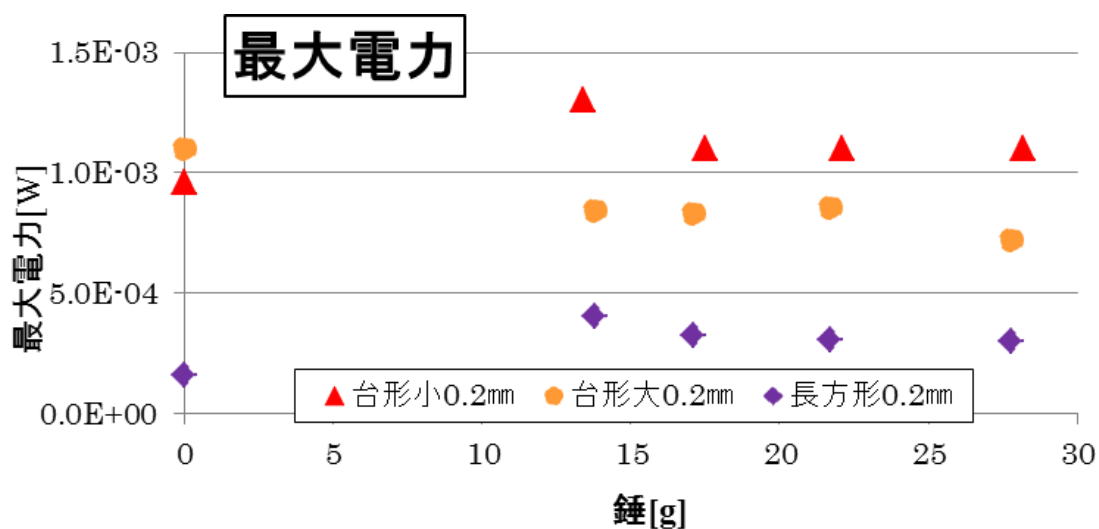


図 4.14 : 一質点ピエゾ素子の最大電力 3 種

以下に示す二つの図 4.15, 4.16 にそれぞれの素子の出力エネルギーを記載した。出力エネルギーに関しては図 4.7 同様, 錘の荷重を少しでも付加すると出力エネルギーは増加する傾向にあり, 錘をそれ以上付加しても出力エネルギーは一定という傾向が共通して確認できた。例外として正方形の Piezo 素子は荷重に比例して出力エネルギーが増加する傾向を確認した。大きい台形形状の Piezo 素子においては重い荷重で一定になる荷重の点を大きくできていることを確認した。

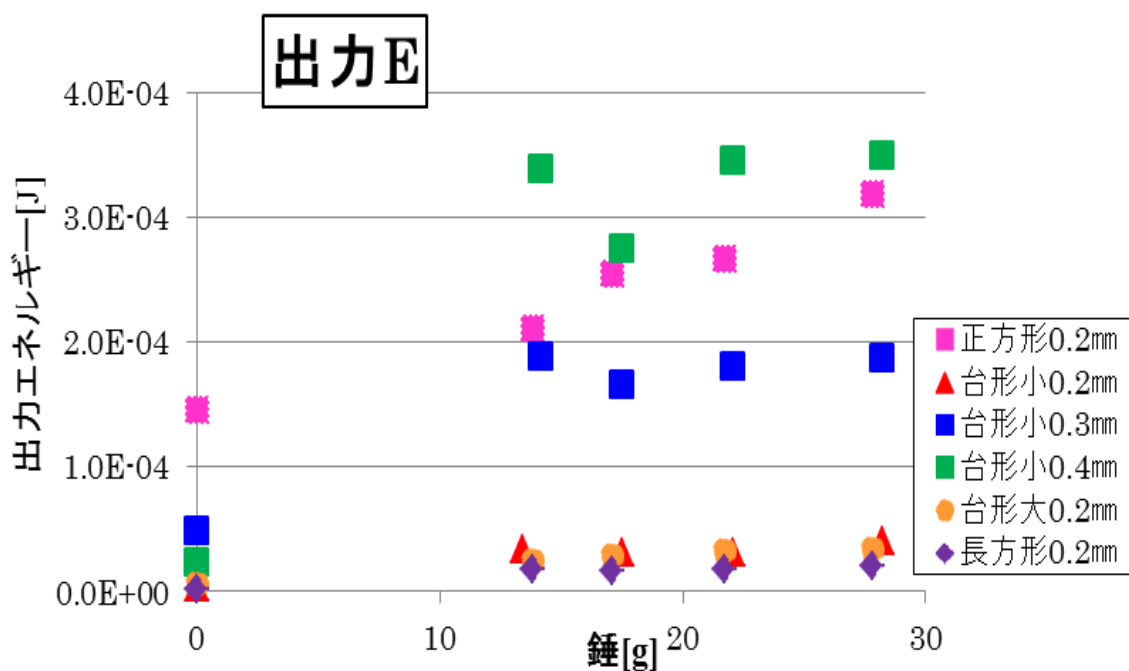


図 4.15 : 一質点 Piezo 素子の出力エネルギー 6 種

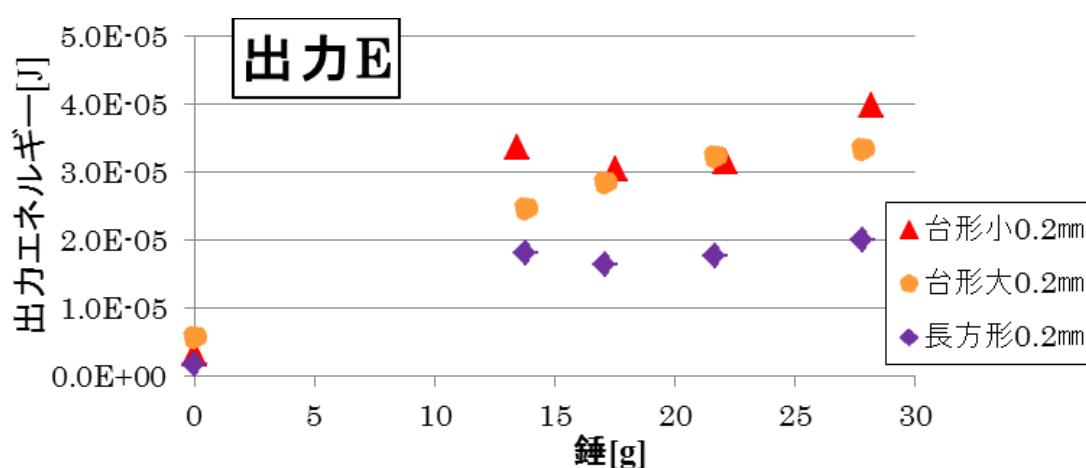


図 4.16 : 一質点 Piezo 素子の出力エネルギー 3 種

以下に 2 章 7 節にまとめた表 2.14~表 2.16 に今回の試験結果を加えた結果を以下の表 4.1 に示した。以下の表 4.1 は荷重の有無によって同一のステップ入力を加えた場合、形状違い・厚さ違いの出力を定量評価している。以下の表からも先端に重い錘を付加しない方が最大電力は大きくなる傾向にあることが確認できた。錘を付加した場合、なるべく軽荷重を加えた場合の方が電力の観点では優位になることが確認されている。出力エネルギーでは、軽荷重でも重荷重でも錘を付加した時点で増加する傾向であると示唆される。錘を付加することで出力エネルギーが上昇する理由としては前述したが、共振周波数が低周波域にシフトするため振動波形の面積が大きくなり、積分値が大きくなった結果である。低周波の共振は高周波のモノと比べ減衰も小さく、面積が大きくなる点も影響する。錘の大小によって出力エネルギーの大きな変化は確認できなかった。最大電力、出力エネルギーの両観点からなるべく軽荷重を付加した方が有効であることが示唆されたが、この結果は図 4.6, 4.7 で示された PZT C の出力特性と一致する結果であることを確認した。

本節の結果をまとめると錘による荷重を付加することによって、同一変位を印加した場合でも最大電力、出力エネルギーを増加できることを確認した。ピエゾ素子を高出力化し、アプリケーションとしての応用範囲を広げるためにも錘を付加することは有効である。よって、実用化した際、サイズ、体積が限定されていなければ適度な荷重を付加することが望ましい。中でもなるべく軽い荷重をかけることで最大電力の減少を最小限に抑え、錘無付加の素子に比べ、出力エネルギーを増加させることができるため、上記二つのパラメータにおいて最適な出力を得ることができることを提案する。

表 4.1 : 荷重の有無による比較

	正方形	長方形	台形大	台形 0.2mm	台形 0.3mm	台形 0.4mm
最大電力 0g [mW]	136	0.16	1.1	0.96	38	42
13.8g [mW]	27.6	0.4	0.8	1.3	21.1	47.8
17.5g [mW]	30.6	0.3	0.8	1.1	15.7	33.5
21.7g [mW]	28.1	0.3	0.9	1.1	15.1	38.6
27.8g [mW]	26.0	0.3	0.7	1.1	12.9	32.3
出力 Energy0g [μJ]	146	1.6	5.7	3.1	48	23.3
13.8g [μJ]	210.7	18.0	24.7	33.7	188.2	338.0
17.5g [μJ]	254.9	16.4	28.6	30.3	165.9	274.0
21.7g [μJ]	266.1	17.5	32.3	31.4	180.0	349.0
27.8g [μJ]	318.6	19.9	33.3	39.8	186.7	349.8

## 4.2 重心位置依存試験

前節では最適な荷重条件の指針となる傾向が得られた。ならびにピエゾ素子の先端に錘の荷重を付加することで高出力化に成功した。前節のインピーダンス整合試験の過程で先端に付加する錘を変化させながら出力を確認した。その際に以下の問題が生じた。図 4.17 には錘違いによる電圧波形を一定期間の範囲で切り取り示している。図 4.17 の電圧波形より、先端に付加する錘の荷重が 10g を超えると高次モードによる影響を受け、低周波の図 4.17 に示した電圧波形に高周波の振動が乗っていることが確認できる。この高次モードの影響を受け、電圧面積が欠け、出力エネルギーが減少してしまうことが懸念される。

よって、本節ではこの問題の改善による更なる高出力化、又は高次モードの有効利用のため重心の配置について考察する。図 4.18, 4.19 に重心位置の異なる二つの図を示した。図 4.18, 4.19 は 30g を付加した図である。図 4.18 に示した図はピエゾ素子の水平面から下に錘を配置した場合の図である。図 4.19 はピエゾ素子の水平面に対し上下に錘を均等に配置した図である。先端に付加した錘は全て鉛を材料として用いて作成されており、偏りなどがないため、重心は体積の中心に位置すると考えられる。図 4.18 より、重心がピエゾ素子の水平面から離れて位置していることが確認できる。これに対し、図 4.19 では水平面から上下に均等に錘を配置しているため、重心がピエゾ素子の水平面に乗ることがわかる。よって、理論的な一質点モデルに近いことが示唆される。

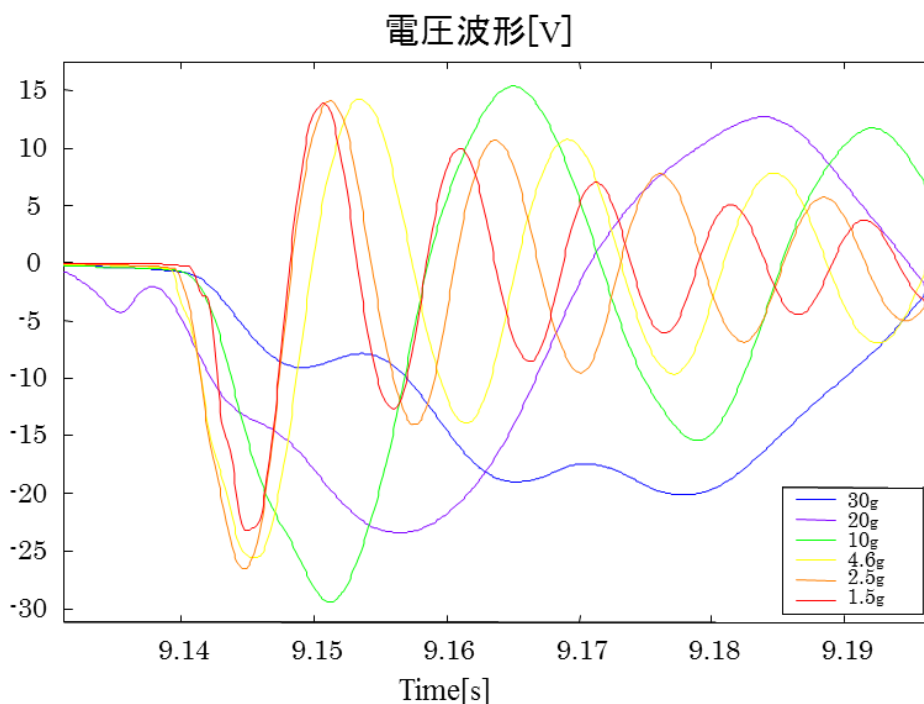


図 4.17 : 一質点ピエゾ素子先端に付加した荷重毎の電圧波形

以降、図 4.19 同様 piezo素子の延長線上に重心が配置される構成を質点近似モデルと呼称し、図 4.18 のような延長線上から重心が離れている構成を総称して分布定数(系)モデルと呼称することとする。上述の質点近似モデルと分布定数モデルに対し、一定の変位をステップ入力し、その際の出力を評価する。評価したパラメータは前節と同様である。

まずは質点近似モデルと分布定数モデルにおける電圧波形を以下の図 4.20, 4.21 に示した。分布定数モデルの電圧波形には高次モードによる高周波が確認されるが、質点近似モデルには高次モードによる高周波が確認されない。これは理論的な一質点振動系に近づいたと考えられる。理論的には一質点の振動系に関して、共振周波数は一つしか持たない。しかし、実際には片持ち梁が多モードを持つことや実際の錘が質点のような点ではなく体積を持つため分布定数系に近いと考えられる。次頁にそれらの違いがどのように出力パラメータに影響するのか考察する。

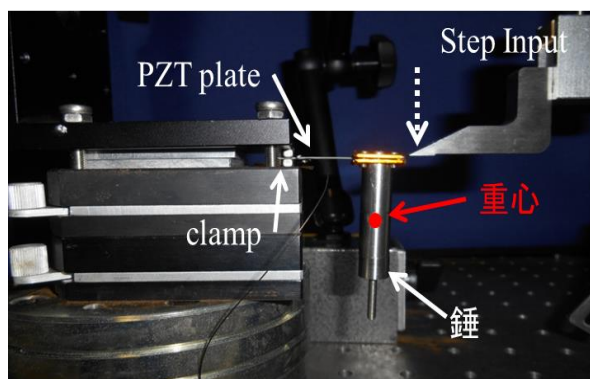


図 4.18 : 分布定数モデル

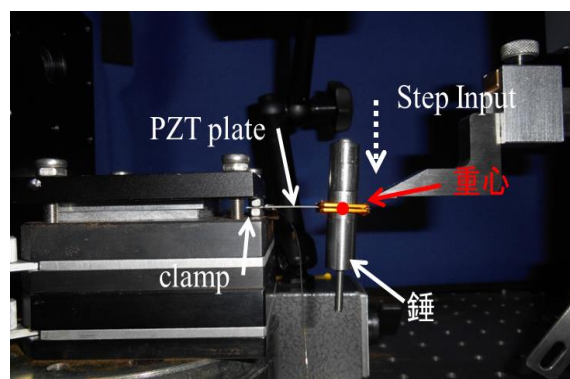


図 4.19 : 質点近似モデル

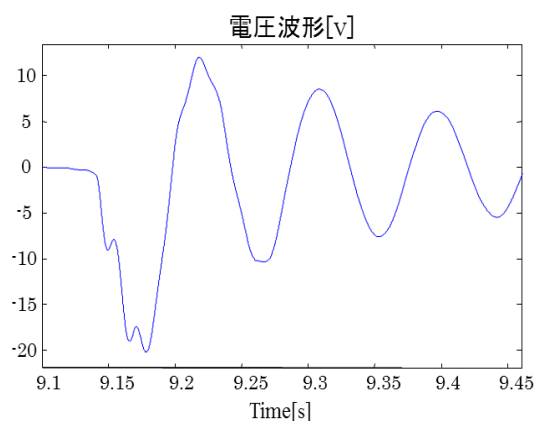


図 4.20 : 分布定数モデルの電圧波形

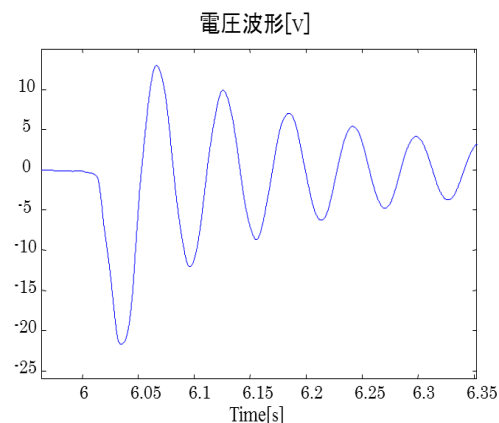


図 4.21 : 質点近似モデルの電圧波形

表 4.2 にそれぞれのモデルにおける出力特性を定量的に表にまとめた。本節のステップ入力試験結果は 30g 錘を先端に付加した時の結果である。表 4.2 中で一番目に比較しているものは共振周波数で 5Hz の違いを確認した。この影響を顕著に受けて差を生じているパラメータが電流と電力である。電流は共振周波数により、一意に整合抵抗値がきまるため低周波の抵抗値ほど高抵抗値になる。高抵抗には電流は流れにくいため分布定数モデルの電流は質点近似モデルに比べ 70% 程度の電流となっている。電圧に関しては分布定数モデルと質点近似モデルの間に大きな違いはないが、電圧と電流の積によって導出される電力に関しては質点近似モデルに比べ分布定数系のモデルは 40% 程度減少していることが確認された。出力エネルギーの点では最大値は質点近似の方が大きいが時間積分で考慮するため共振周波数の低い分布定数モデルも有利になり、出力エネルギーは 5~6% 程度しか差はないような結果となっている。

表 4.2 : 分布定数モデルと質点近似モデルの比較

	分布定数	質点近似
共振周波数[Hz]	11	16
電圧 p-p[V]	33	34
電流 p-p[mA]	0.13	0.19
整合抵抗値理論値[kΩ]	280	180
電力最大値[mW]	1.7	2.5
出力エネルギー[μJ]	97	103

### 4.3 システム同定試験

前節の試験内容に対し妥当性があるか検証するため、上述の図 4.18, 4.19 に示した二つの構造に対しシステム同定を行った。システム同定手法は制御工学において未知のシステムに対し既知信号を印加することでモデル化する手法である。

以下にシステム同定試験の条件を明示した。簡単に言及すると、PZTC の先端に 13.5g の錘を付加し、下記加振器に DSP で作成した M 系列信号を入力し、システム同定試験を行った。M 系列の具体的な条件も以下に記述した。アンプを通して加振器に M 系列信号を印加することで固定した piezo 素子が振動し、出力電圧が生じる。出力電圧を DSP に入力し、それらの入出力信号により、システム同定を行った。同定モデルは ARX モデル、次数決定法はクロスバリデーションを用いた。同定対象は次頁の図 4.23, 4.24 に示した二つのモデルである。今回システム同定によって得られるモデルはベース加速度による出力である。

次頁、図 4.23 に示した図は質点近似モデルである。対し、図 4.24 に示した図は分布定数モデルである。分布定数モデルに関しては図に示した重心の位置は正確な重心位置ではないことに注意されたい。分布定数モデルに関しては重心位置による出力の影響を確認したいため、図にも示した通り錘までの距離  $L$  を 0.7mm 刻みで変化させ、その際の出力をシステム同定している。

以下、図 4.25 にシステム同定試験結果を示した。緑色の網掛け範囲はコヒーレンスを確認した信頼範囲である。信頼範囲は 80rad/s~570rad/s 程度である。図 4.26, 4.27 に拡大図を掲載しそれぞれのモード毎に別々に評価する。注意としてそれぞれの共振周波数はコヒーレンスの観点から信頼範囲内であることを事前に確認した。

表 4.3 : システム同定試験の試験条件

試験条件	
加振軸	鉛直方向
加振機	EMIC 512-A(電流制御アンプ付き)
入力信号	M 系列信号(周期 255)
入力振幅	入力振幅 : $\pm 1$ [V]
加振時間	2.4 [s](1020 サンプル : 4 周期分)
サンプリング時間	2 [ms]
同定条件	
同定モデル	ARX モデル
次数決定法	クロスバリデーション
同定入力信号	デバイスのベース(加振機)加速度 $u_g$ [m/s <sup>2</sup> ]
同定出力信号	piezo 素子の出力電圧 $V$ [V]

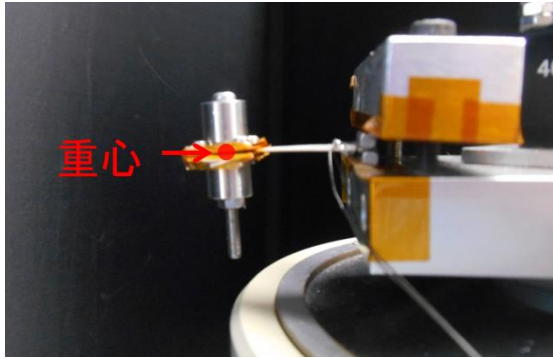


図 4.23 : 質点近似モデルの電圧波形

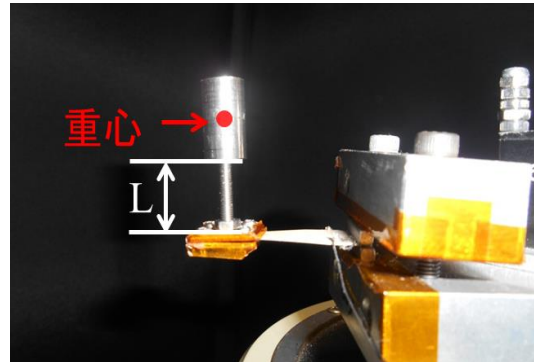


図 4.24 : 分布定数モデル

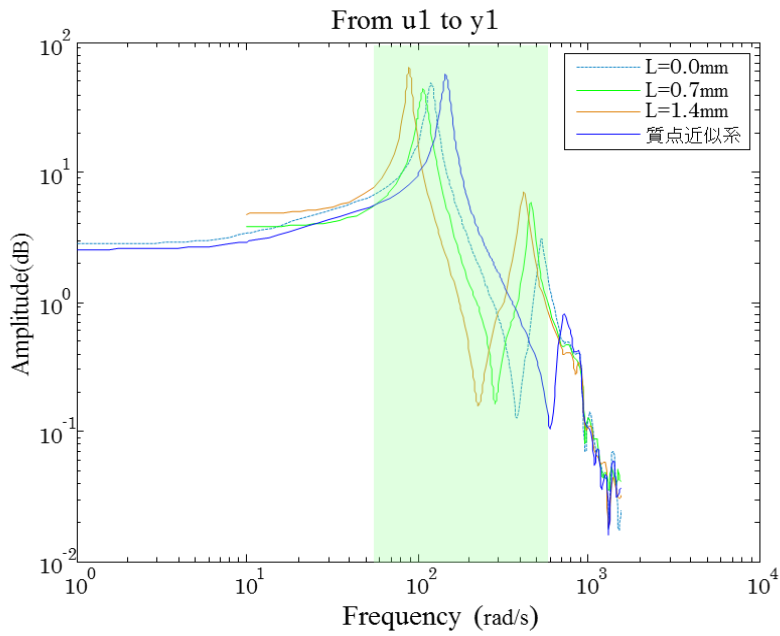


図 4.25 : 分布定数ならびに質点近似モデルシステム同定結果

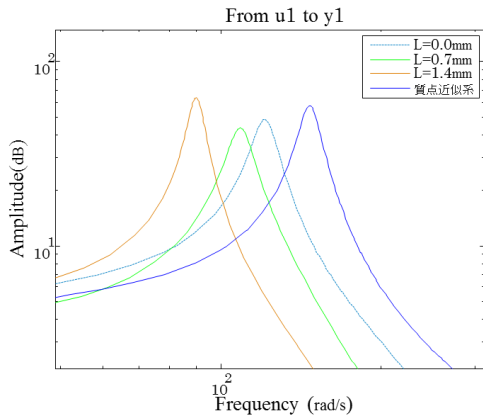


図 4.26 : Primary モードの比較

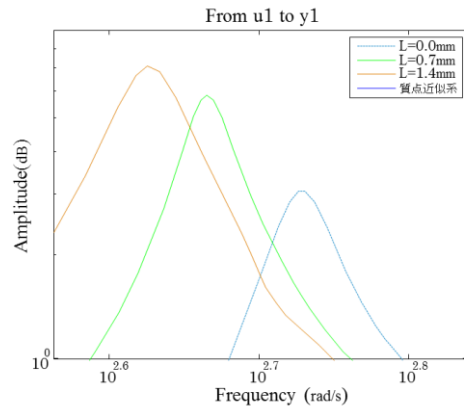


図 4.27 : Secondary モードの比較



前頁，図 4.26，4.27 にそれぞれのモードに着目した拡大図を示した。それぞれの数値に関してはモード毎に共振周波数とそのゲインを定量的に以下の表 4.4，4.5 にまとめた。上述の図 4.25 において横軸は rad/s である点に注意されたし。

まず，Primary モードについての比較を行う。上述の通り，図 4.26 と表 4.4 から明らかであるが，質点近似モデルと分布定数モデルの比較を行った際に質点近似モデルの場合，分布定数モデルに比べ，共振周波数が高いことが確認できる。加えて，前節の電圧波形にもあるように質点近似に近づけることによって単一モードが支配的になることを確認している。よって，今回のシステム同定試験においても二次モードが現れないことに妥当性がある。これに対し，分布定数モデルに関してはピエゾ素子の延長線上から遠ざけるに従い，共振周波数が減少することが確認できた。ならびに，ある一定以上距離を遠ざけることによってゲインが増加することが確認できた。少しだけ離れた場合，共振周波数の低下とゲインの減少も確認した。

次に Secondary モードに関して比較を行う。分布定数モデルにすることによって二次モードが励起されることを確認した。二次モードのゲインならびに共振周波数は以下の表 4.5 に示した通りである。ピエゾ素子の延長戦から距離を取るに従い，Primary モード同様共振周波数の減少，そしてゲインの増加を確認した。

今回の結果をアプリケーションとして有効活用する場合，複数の共振モードを持つ振動源に対して有効であると考えられる。具体例を挙げるならば，自動車のような振動源である。自動車の場合，もちろん設置場所にも依存するが，その振動は多モード・多軸振動であり，概ね共振周波数が決まっている。よってその共振周波数に合わせてデバイスを製作し，複数の共振周波数において有効的に発電できるようなアプリケーションは非常に有意義であることがわかる。自動車振動のような振動源をターゲットとする振動発電デバイスを作製する際は，前節から議論している分布定数モデルを製作し，距離をよくとって複数のモードに合わせて効率よく発電するようなアプリケーションが望ましいことが推測される。

表 4.4 : Primary モードの定量評価

	周波数[Hz]	Gain[dB]
質点近似	24.0	34.4
L=0.0mm	19.8	33.3
L=0.7mm	17.4	32.3
L=1.4mm	14.2	36.1

表 4.5 : Secondary モードの定量評価

	周波数[Hz]	Gain[dB]
質点近似		
L=0.0mm	85.2	3.1
L=0.7mm	73.6	5.8
L=1.4mm	67.0	7.0

前頁においては分布定数モデルと質点近似モデルにおけるシステム同定結果を定量的に比較した。しかし、その比較においては実際に得られる出力電圧などのパラメータは明示していない。本頁では実際に同条件の下、ステップ入力による試験を行い、定量的にその出力を比較することとする。なお、試験の都合上、前頁と同荷重の錘を用意出来なかったため、最も近い10g時の錘の結果を比較した。図4.28に試験の構成と結果を示した。比較したのは分布定数モデルから錘を上に加した場合、下に加した場合、そして質点近似モデルの三つを比較した。変位入力として振幅0.5mmを一定で印加した。

下図4.29, 4.30に電圧と電流の結果を示した。電圧は抵抗値の増加に伴い増加傾向が見られ、最大値に関しては錘の位置によって大きな違いは生じていないことが確認できる。対して、電流値に関しては整合抵抗値によって電流の値は変化し、抵抗値の増加に伴い、減少傾向が確認できた。

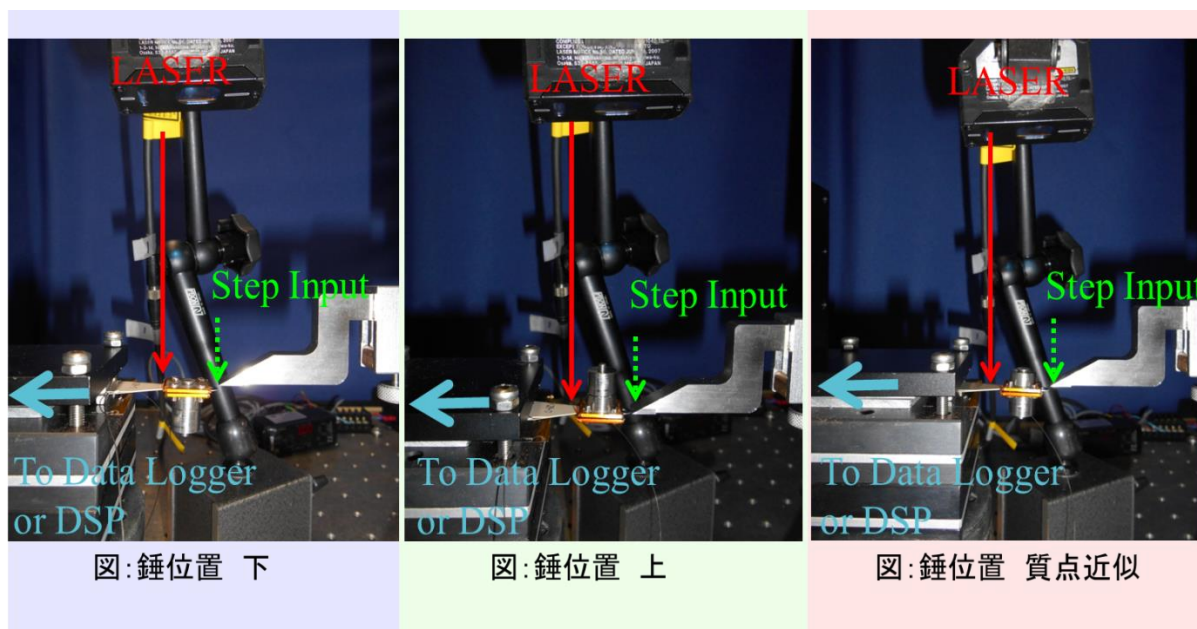


図 4.28 : 分布定数モデルの試験構成

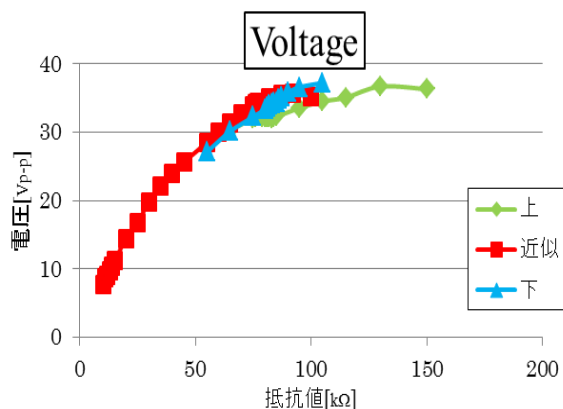


図 4.29 : 錘位置毎の出力電圧

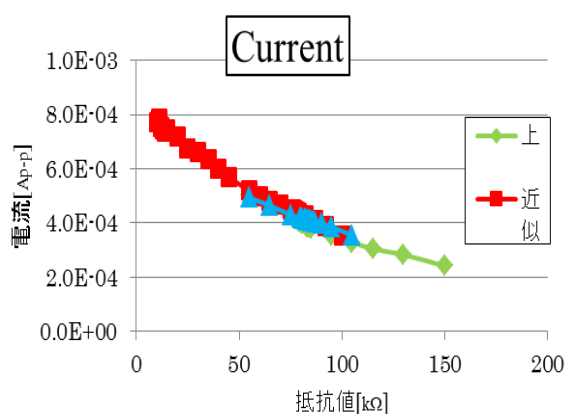


図 4.30 : 錘位置毎の電流

下図 4.31, 4.32 に最大電力と出力エネルギーを示した。最大電力に関しては質点近似モデルが高いことが確認できる。出力エネルギーは質点近似と錘を下に付加した時、ほぼ同じ出力エネルギーが確認できた。図 4.31, 4.32 の下には表 4.5 を示し、定量的に比較を行った。

下表 4.5 は錘の位置を変更し、整合抵抗値を負荷した際のパラメータを定量的にまとめたものである。前節から一貫して共振周波数は質点近似モデルが高く、分布定数モデルは低い結果となっている。共振周波数の影響で整合抵抗値は質点近似が最も低く、分布定数モデルの中でも錘を下に付加した際に抵抗値が最大となった。電圧は負荷端に負荷する整合抵抗値の影響を受けるため、抵抗値が最も高い錘を下に付加した場合に電圧最大であることを確認した。しかし、その差は 3V 程度であり、それほど大きな差があるとは言い難い。電流に関しては整合抵抗値が最も小さい質点近似モデルにおいて最大である。最大電力も出力エネルギーも電流同様質点近似モデルが最大であることを確認した。以上より、単一モードによるアプリケーションの応用を考慮した場合、質点近似モデルにすることにより、共振周波数の高周波化による電流と電力の高出力化可能であることを確認した。

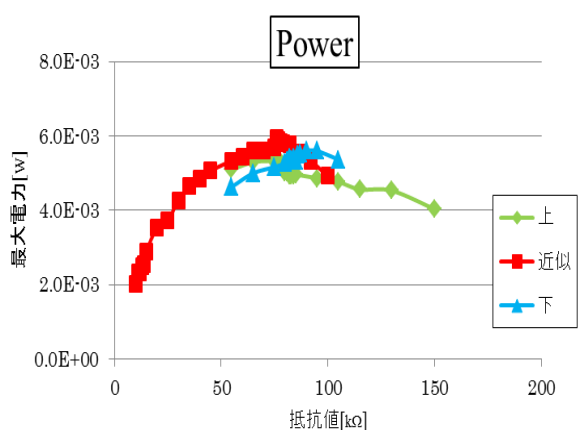


図 4.31 : 錘位置毎の最大電力

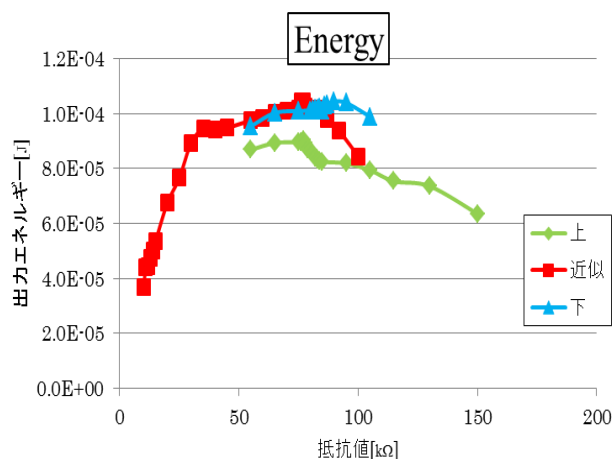


図 4.32 : 錘位置毎の出力エネルギー

表 4.5 : 錘位置による出力評価

	上	下	質点近似
共振周波数[Hz]	36.5	35.8	37.3
整合抵抗値[kΩ]	77	90	76
電圧[Vp-p]	32.3	35.8	34.3
電流[mAp-p]	0.42	0.40	0.45
Power[mW]	5.3	5.6	6.0
Energy[μJ]	90	104	105

#### 4.4 一質点強制加振試験

前節では最適な錘の荷重条件について考察，提案した。本節からは本格的に様々なアプリケーションでの実用化を目指し，強制加振試験の試験方法について検証する。強制加振試験とはピエゾ素子を加振器に固定し，任意の周波数で振動を印加する試験方法である。本試験方法は自動車などの定常的に振動を発生する振動源に本稿提案素子を搭載した場合にどのような出力特性が得られるか検証するものである。前節までのスイッチのようなアプリケーションの実用化をターゲットしているわけではない点に注意されたい。下図 4.33, 4.34, 4.35 に実験モデルや実験構成写真，機械系と電機系の実験構成図，そして片持ち梁を強制加振した際の入力エネルギーの理論式を示す<sup>[33]</sup>。

詳しくは以下を参照されたい。図 4.33 は実験の構成を示している。加えて，パラメータとして(23), (24), (25)式に自由端変位とベースの加振変位そして入力エネルギーなどを掲載した。本頁以降，効率などの導出では以下の(23), (24), (25)に示した理論式によって導出したパラメータを使用している。

$$\text{片持ち梁の自由端変位: } x[m] = X \cos(\omega_n t + \frac{\pi}{2}) \quad (23)$$

$\omega_n$ : 片持ち梁の固有周波数

$$\text{ベースの加振変位: } y[m] = Y \cos(\omega_n t) \quad (24)$$

$$\text{入力エネルギー}^{[33]}: \quad W_i[J] = kXY\pi \quad (25)$$

$$\text{効率:} \quad \eta[\%] = \frac{\int \frac{v^2}{R} dt}{kXY\pi} \quad (26)$$

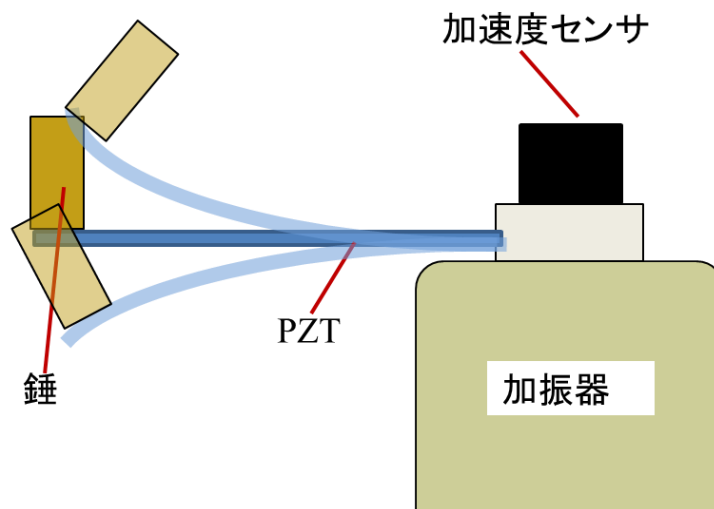


図 4.33 : 一質点強制加振試験のモデル

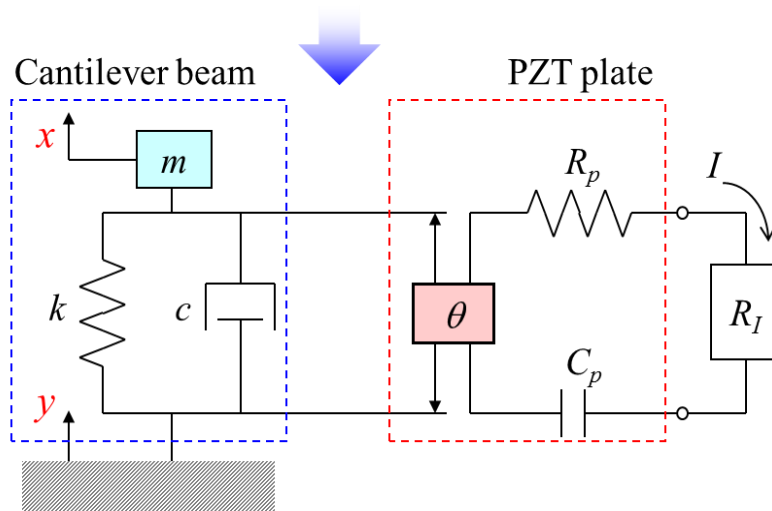
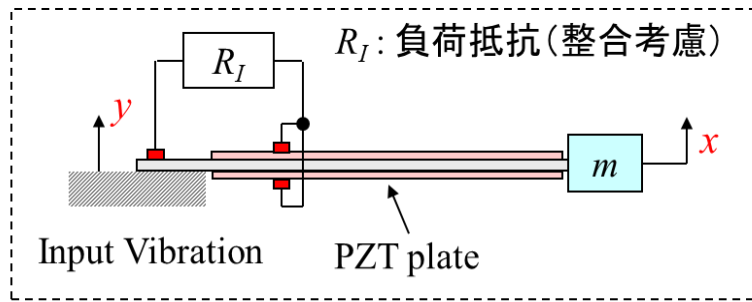


図 4.34 : 一質点強制加振試験の構成<sup>[29]</sup>

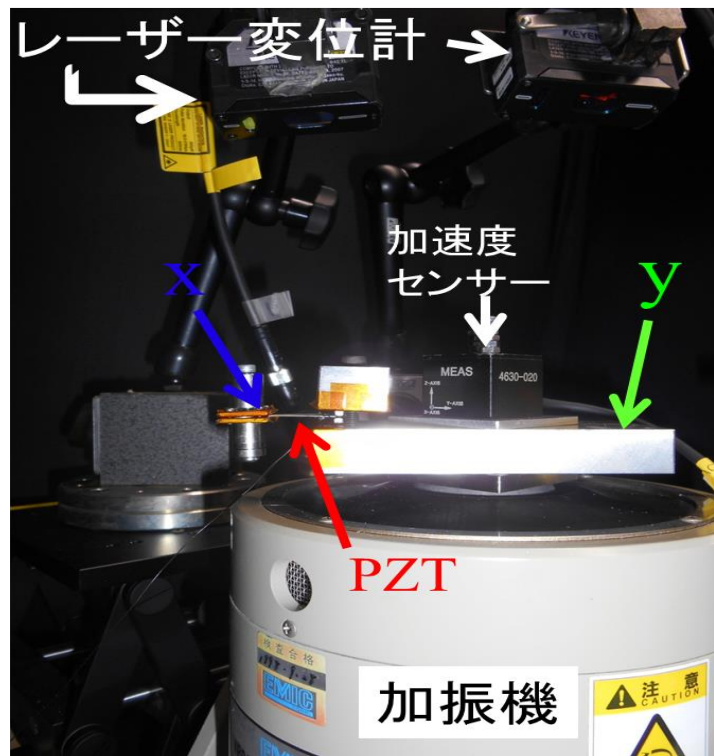


図 4.35 : 一質点強制加振試験写真

以下では具体的な試験条件を示す。入力信号は sin 波をファンクションジェネレータよりアンプを通し、加振器へ入力、先端に付加する錘の荷重を変えながらそれに伴って理論式より導出した理論抵抗を負荷した。今回の試験では片持ち梁の自由端変位とベースの加振変位をコントロールし、入力エネルギーを一定とした。入力エネルギーを一定にするためファンクションジェネレータで作成した sin 波の入力振幅を適宜変更しな実験を行った。

実験結果を以下の表 4.6, 4.7 と図 4.36, 4.37 にまとめた。図 4.36 には電圧と電流の加振試験結果を示した。入力エネルギーを一定にした際、先端に付加する錘の荷重を大きくすると電流は一様に減少する傾向が確認できた。対し、電圧に関しては最適値を持つ結果が得られた。これは先端に重荷重を付加すると、小さな加速度で大きな変位を得ることができる。これに対し、先端に軽荷重を付加すると、大きな加速度を入力しなければ同様の変位を得ることができない。結果、錘の荷重が大きい時は小さな入力加速度を、荷重が軽い時は大きな入力加速度を印加する結果になっている。上述より、電圧は最適値を得る結果となったことを確認した。電流の観点から考慮すれば先端に付加する錘の荷重が大きいほど共振周波数が低下する傾向にあるため、整合抵抗値が上昇する。よって電流が減少する傾向になると推察した。電力に関しては電圧と電流の積によって与えられるため、軽荷重の錘を付加した時の方が有利という結果になっている。出力エネルギーは荷重増加に伴い共振周波数が低下し、電力波形の面積が大きくなる傾向があるため、電圧同様最適値を持つことを確認した。

表 4.7 には錘毎の入力エネルギーをまとめている。本結果より概ね一定にできていることが確認できた。表 4.7 には入力エネルギーならびに一周期当たりの平均電力と一周期における効率を示した。同一の入力エネルギーにおける振動発電に関しては先端に最適な錘の荷重を付加することによって効率を 37.2%まで高めることができた。平均電力に関しては 2.5mW 相当という出力が得られた。

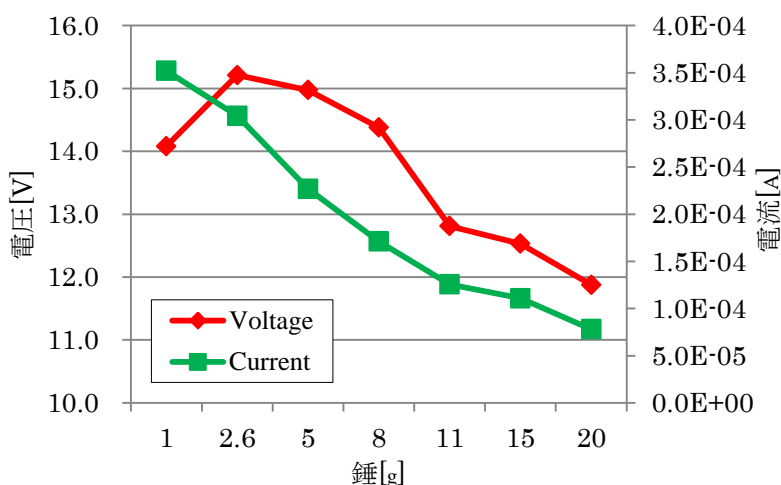


図 4.36 : 一質点強制加振試験結果

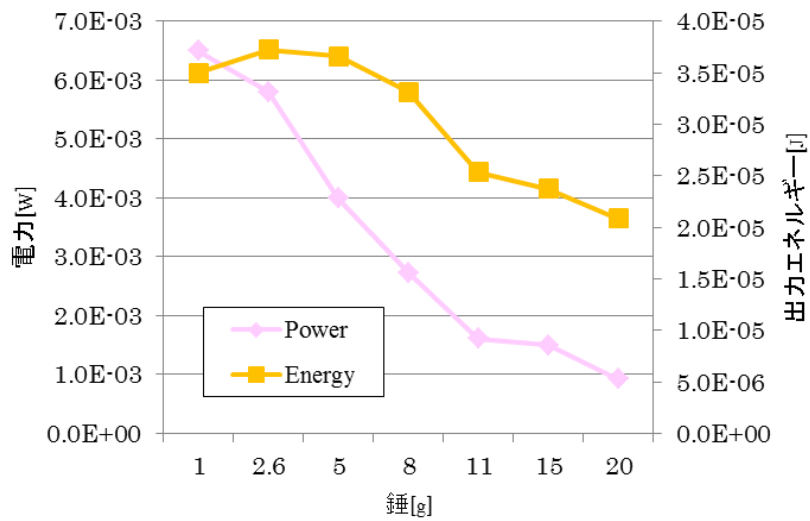


図 4.37 : 一質点強制加振試験結果

表 4.6 : 一質点強制加振試験結果

g	Voltage[V]	Current[mA]	Power[mW]	Energy[μJ]
1	14.1	0.35	6.49	35.0
2.6	15.2	0.30	5.79	37.2
5	15.0	0.23	3.99	36.6
8	14.4	0.17	2.73	33.1
11	12.8	0.13	1.61	25.4
20	11.9	0.078	0.93	20.9

表 4.7 : 一質点強制加振試験結果

g	Average Power[mW]	Input Energy[μJ]	Efficiency[%]
1	2.8	114	30.6
2.6	2.5	99.9	37.2
5	1.8	118	30.9
8	1.3	94.7	34.0
11	0.8	106	23.9
20	0.4	118	17.6

最後に本章のまとめを以下に示す。本章では先端に荷重を付加することによって piezo 素子の高出力化を実現した。荷重の付加はステップ入力と外部振動による両方の応用例から有効であることも確認した。ならびに錘の配置によってその出力、振動モードの変化についてもシステム同定法を駆使し、解析そして考察した。上記に加えて、一質点デバイスに対し強制加振試験を行うことによって一質点デバイスに外部振動を印加する条件での最適な荷重を実験的に導出し、その際の効率についても言及した。

本章における最適荷重を付加した際の出力エネルギーは一周期  $35\mu\text{J}$  であり、前述の省電力通信機器による実用を鑑みれば、初期送信に  $12\text{mJ}$ 、定期送信に  $5\text{mJ}$  必要そして共振周波数が  $67\text{Hz}$  だった理由から、初期送信に 343 周期、定期送信 149 周期程度つまり初期送信に 5.1 秒、定期送信に 2.2 秒必要になることが概算できる。

上述の考察より実用化可能であると予測される。一方で、実用化が厳しい理由が二点ある。一点目は最も発電特性の良い共振周波数で加振しているため、 $67\text{Hz}$  以外の振動には対応することができないことである。自動車振動などの共振周波数は一次モードが  $15\text{Hz}$ 、二次モードが  $50\text{Hz}$  程度であるため上述の概算よりもずっと時間がかかることが想定される。二点目は上記の最適荷重を付加した時の出力は加振器が  $1.5\text{G}$  という大きな加速度を出した際の数値である点である。実際に自動車振動の実用化を考えた場合、市街地を走行した場合、加速度の約 68.3% が  $0.46\text{G}$  以内に包括され、ワインディングロードでは  $0.54\text{G}$  までが約 68.3%、砂利道では  $0.48\text{G}$  までで約 68.3% となっており、如何に大きな加速度を入力しているのか実感できることだろう。

上述より、実用化にこぎ着けるためにはまず、先端に付加する錘の荷重を増やすことそして、更に振動を有効に活用して荷重を piezo 素子に伝える必要がある。錘の荷重を増やすことによって、小さな加振器の加速度で大きな変位を生じ、出力エネルギーを増加させることができる。



## 第5章 衝撃荷重試験

### 5.1 衝撃荷重試験

前節では先端に錘を付加することによって荷重をかけ、変位を増やし、慣性の影響から振動を持続させて出力を増加できることについて言及した。しかし、実用化に向けてもう一歩出力を増加させることが必要であることも検証した。よって本節では、より大きな荷重をピエゾ素子に入力し、更なる高出力化を目指す。

具体的な提案としては衝撃荷重をピエゾ素子に印加することである。衝撃荷重を選定した理由としては静荷重に比べ、衝撃荷重は高さ 0 から入力しても静荷重の 2 倍の荷重になるとされるためである。より大きな荷重をピエゾ素子に加えて、高出力化を目指す。衝撃荷重によって部材に生じる衝撃応力を位置エネルギーと弾性エネルギーのつり合いから導出する。導出過程は以下のとおりである。

荷重  $W$  の衝突体が高さ  $h$  から片持ち梁に衝突する試験の構成を考え、衝突によってたわみ  $y$  を生じ、その時に片持ち梁に蓄えられる弾性エネルギーを  $U$  とする。その際の位置エネルギーは  $W(h+y)$  によって与えられる。片持ち梁に蓄えられるエネルギーは以下に示した。微小体積要素を考慮し、 $dV=dAdx$  とする。 $V$  は体積を表し、 $A$  は断面積、 $x$  は長手方向に軸をとった時の変数である。この微小要素に蓄えられる弾性エネルギーは  $dU=\frac{1}{2}\sigma dA\epsilon dx = \frac{\sigma^2}{2E}dV$  である。

この微小要素の弾性エネルギーを梁の長さ方向と高さ方向に沿って積分することによって片持ち梁に蓄えられる弾性エネルギーを導出することができる。以下に導出過程を示した。

$$U = \int_0^l \int_A \frac{1}{2} \frac{\sigma^2}{E} dAdx = \int_0^l \int_A \frac{M^2 y^2}{2EI^2} dAdx = \int_0^l \frac{M^2}{2EI} dx$$

片持ち梁のモーメント  $M$  は  $M=-Px$  より、以下のように  $U=\frac{P^2 l^3}{6EI}$  に決まる。

$$U = \int_0^l \frac{M^2}{2EI} dx = \int_0^l \frac{(-Px)^2}{2EI} dx = \frac{P^2}{6EI} [x^3]_0^l = \frac{P^2 l^3}{6EI}$$

以上より、弾性エネルギー  $U$  と位置エネルギー  $W(h+y)$  がつり合うと考えられるので、 $U=W(h+y)$  の方程式を解くことによって衝撃応力を求めることができる。続いて導出過程を示した。

$$Wh + Wy = U = \frac{P^2 l^3}{6EI}$$

片持ち梁先端に集中荷重  $P$  がかった時たわみ  $y$  は  $\frac{Pl^3}{3EI}$  として導出されることを上の式に代入する ( $l$  は素子の長さを表す)。

$$\frac{P^2 l^3}{6EI} - Wh - W \frac{Pl^3}{3EI} = 0$$

$$P^2 - 2PW - \frac{6EIWh}{l^3} = 0$$

$$(P - W)^2 = W^2 + \frac{6EIWh}{l^3}$$

$$(P - W)^2 = W^2 \left(1 + \frac{6Elh}{Wl^3}\right)$$

$$P - W = \pm \sqrt{W^2 \left(1 + \frac{6Elh}{Wl^3}\right)}$$

最大の荷重を加えた時の最大の応力を知りたいので、絶対値をとり、

$$P - W = \sqrt{W^2 \left(1 + \frac{6Elh}{Wl^3}\right)}$$

$$P = W + \sqrt{W^2 \left(1 + \frac{6Elh}{Wl^3}\right)} = W \left(1 + \sqrt{1 + \frac{6Elh}{Wl^3}}\right)$$

今回の試験構成では高さが低い位置からの衝撃を考慮しているため  $h \approx 0$  より  $P = 2W$  が導出された。曲げによるモーメントは  $-Px$  によって導出される。

$$\sigma = \frac{M}{Z} = \frac{My}{I} = \frac{MPl^3}{I3EI} = \frac{MPl^3}{I3EI} = -\frac{P^2l^3}{3EI^2}x$$

$x=l$  を代入し、絶対値をとることで以下に低い位置からの衝撃応力を(27)式に示した。

$$\text{衝撃応力:} \quad \sigma_{max} [\text{N/m}^2] = \frac{4W^2l^4}{3EI^2} \quad (27)$$

## 5.2 入力加速度依存試験

下図 5.1, 5.2 に衝撃試験の試験構成, 写真そして表 5.1 に試験条件を示す。板バネに錘を付加し, 加振器を用いて強制加振を行った。板バネが振動することで, 固く固定されている Piezo 素子に衝突するような試験構成とした。加振器への入力信号の電圧振幅を変化させ, ベース加速度を変化させる。ベース加速度, 本節では以降入力加速度の変化に伴う, 電圧出力を検証した。条件についての補足であるが, 負荷抵抗を用いなかった理由として衝撃荷重による電圧そして振動波形がどのように振動するか確認するためである。抵抗を負荷してしまうと負荷抵抗に依存した波形になるため, 衝撃荷重本来の挙動を解析できない。サンプリング周波数は衝撃荷重の微細な変位波形や電圧波形を記録するため高いサンプリング周波数を用いた。Piezo 素子はねじの先端と衝突させるため, 保護の目的でテープを表面に貼付した。

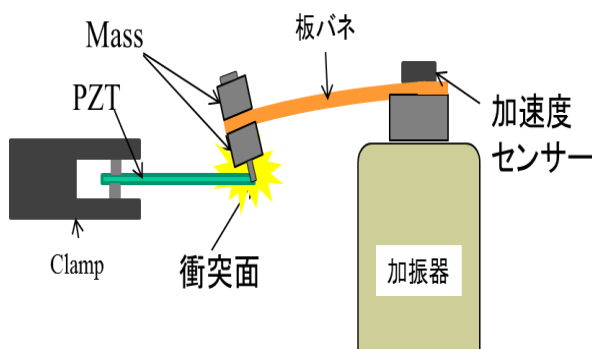


図 5.1 : 衝撃試験の試験構成

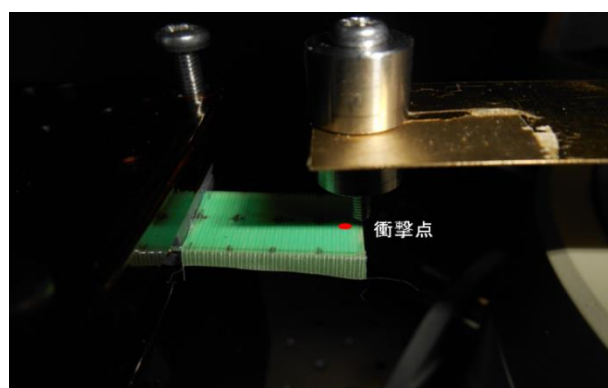


図 5.2 : 衝撃試験の試験写真

表 5.1 : 衝撃試験の試験条件

	衝突体条件		その他の実験条件
衝突面	ねじの先端	高さ	ねじ先端から Piezo表面まで 1.0mm
錘	11.0g	サンプリング周波数	10 $\mu$ s
	被衝突体条件	測定時間	3s
Piezo素子	PZTA (表面に保護テープ貼付状態)	変位測定点	① 錘変位 ② ベース変位 ③ Piezo変位
衝突箇所	先端の中心	加振周波数	15Hz
負荷抵抗	開放状態(負荷なし)	入力振幅	1.0Vp-p

下図 5.3, 5.4, 5.5, 5.6 にそれぞれの変位波形と電圧波形を掲載した。それぞれ数周期分切り出した図, 図 5.3, 5.5 と一周期を切り出した図, 5.4, 5.6 を表示している。それぞれの図に写る点線は衝突点を表している。ピエゾの変位を確認すると衝突を受けて変位を生じていることがわかる。しかし、ピエゾ素子の変位は使用した KEYENCE 製レーザーセンサーの分解能の限界であり、振動しているように見えるのはそのためである。電圧波形は非常に高い周波数で振動していることが確認でき、0.3mm の変位を印加した時と同様の電圧出力が確認できた。

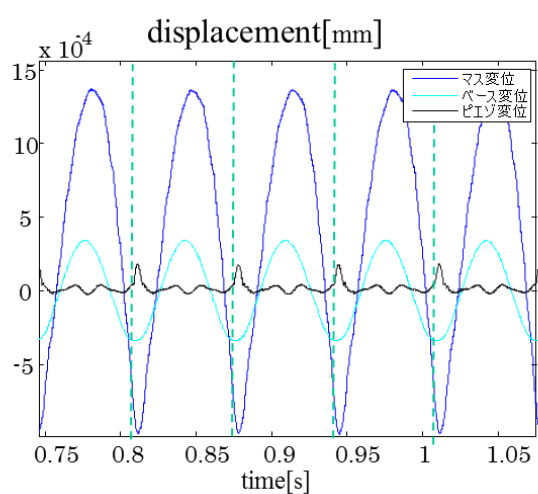


図 5.3 : 衝撃試験変位波形

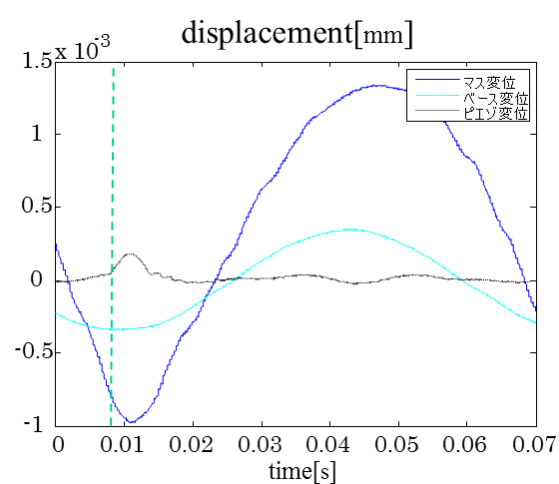


図 5.4 : 衝撃試験変位波形一周期分

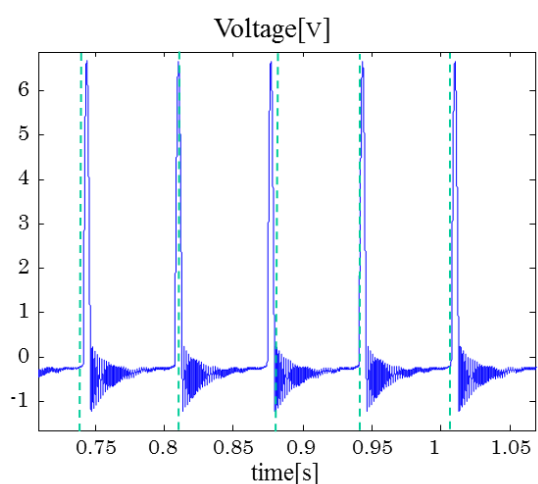


図 5.5 : 衝撃試験電圧波形

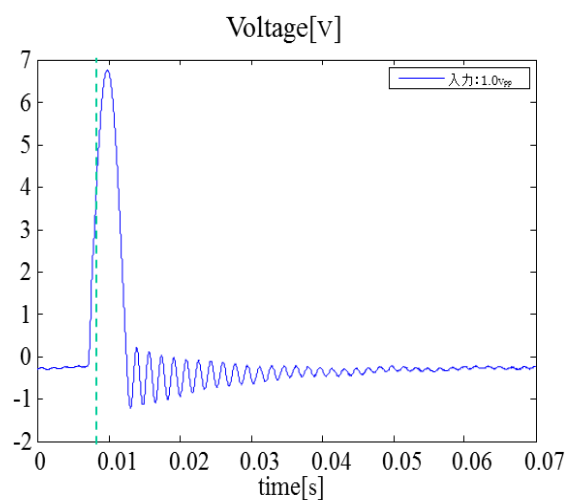


図 5.6 : 衝撃試験電圧波形一周期分

下図 5.7, 5.8 に電圧 PSD を示した。図 5.7 は全周期をとった PSD, 図 5.8 はそのうち衝撃荷重一周期を切り出した PSD である。全周期の PSD はこれといった特徴を抽出できないが、一周期当たりの PSD を確認すると多峰性の中に共振周波数が 586Hz にあることが確認できる。この共振周波数は前述のステップ加振試験の際にも全く同様の共振周波数が得られている(図 5.9)。これは 586Hz が PZT A の固有周波数であることを示唆している。インパルス応答は、そのシステムの伝達関数そのものの特性を示しているため、この PSD が PZT A の出力の特性である可能性が非常に高いことも考えられる。2 章にも記載したが本章でも以下に補足として PZT A のステップ加振試験時の電圧 PSD を以下に示しておく。

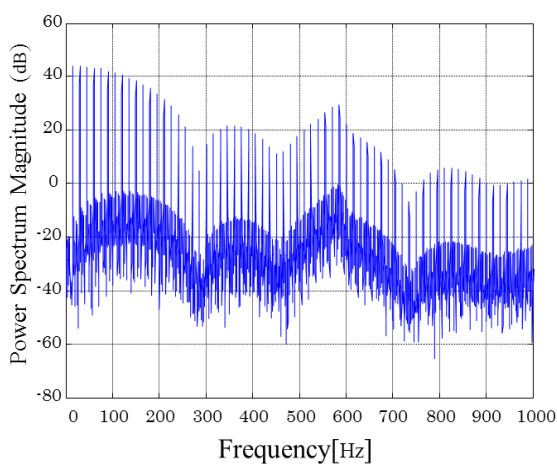


図 5.7 : 電圧の PSD (全周期)

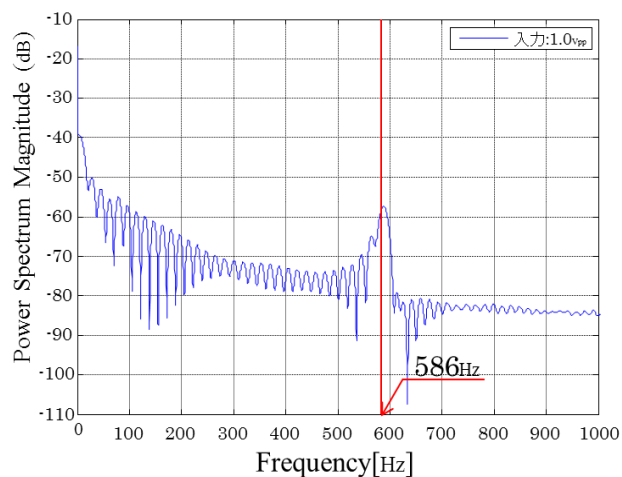


図 5.8 : 電圧の PSD (一周期)

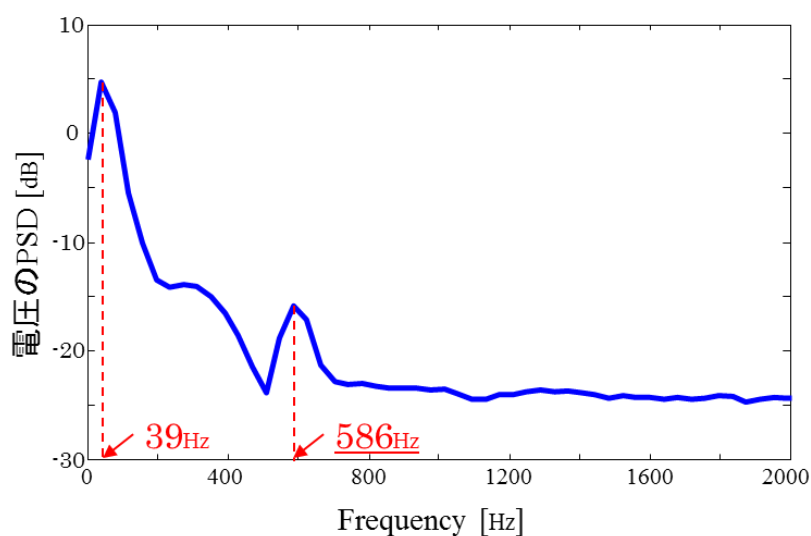


図 5.9 : ステップ加振試験時の電圧 PSD

下図 5.10 に入力加速度依存試験の電圧出力結果を示した。本節で呼称している入力加速度とは実験構成でいう加振器のベース加速度である。図 5.11 の結果より、加振器のベース加速度を増やすにつれ、衝撃荷重による出力電圧は増加する傾向にあることを確認できた。以下に示した電圧波形は抵抗値を負荷していないため、抵抗値に依存しない PZTA の衝撃発電の電圧波形である。減衰までの時間は入力加速度と関係なく、50ms 程度であることも確認した。図 5.11 より、加振器のベース加速度に比例して衝撃荷重による発電電圧が増加する傾向であることを確認した。ここでも実際に実用化した際のアプリケーションに対し考察する。自動車に衝撃荷重を応用した圧電デバイスを搭載した際に自動車の中でもより高加速度の出る設置場所を解析、検討、選定することが重要であることが図 5.10, 5.11 の結果から推察される。

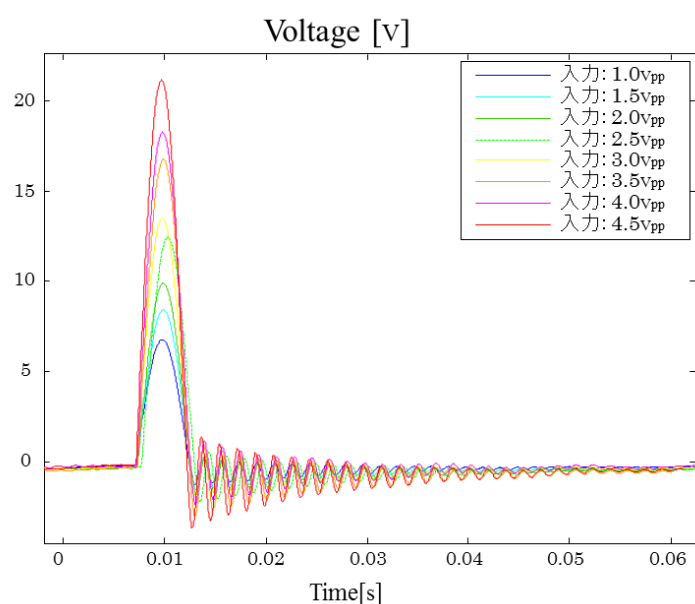


図 5.10 : 入力加速度依存試験の電圧波形

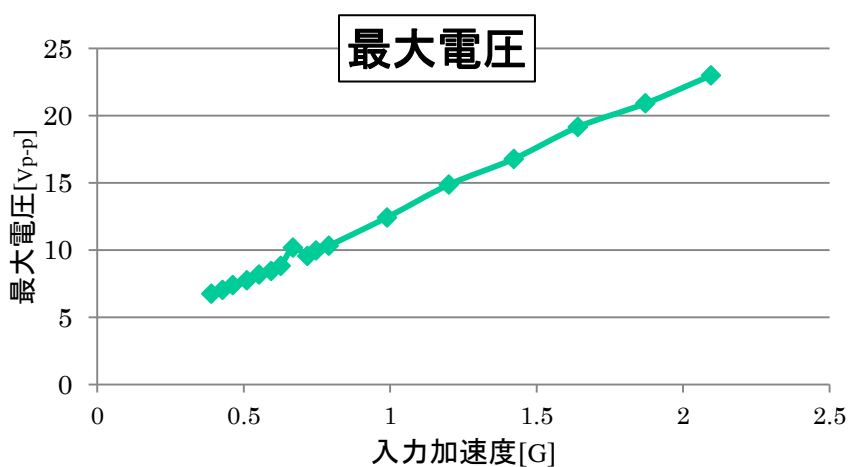


図 5.11 : 入力加速度と最大電圧の関係性

図 5.10 の電圧波形の結果に加えてそれぞれの入力加速度の電圧 PSD を一周期分切り出して解析した結果を以下に示した。以下の図 5.12 より入力加速度に依存してパワーが変動していることを確認した。入力加速度によって固有周波数は変化しない傾向であることも確認した。ステップ加振試験(はじき試験)では 39Hz にも共振が確認できたが、衝撃荷重試験(インパルス試験)では確認できなかった。39Hz はステップ加振試験固有の周波数であると推測される。

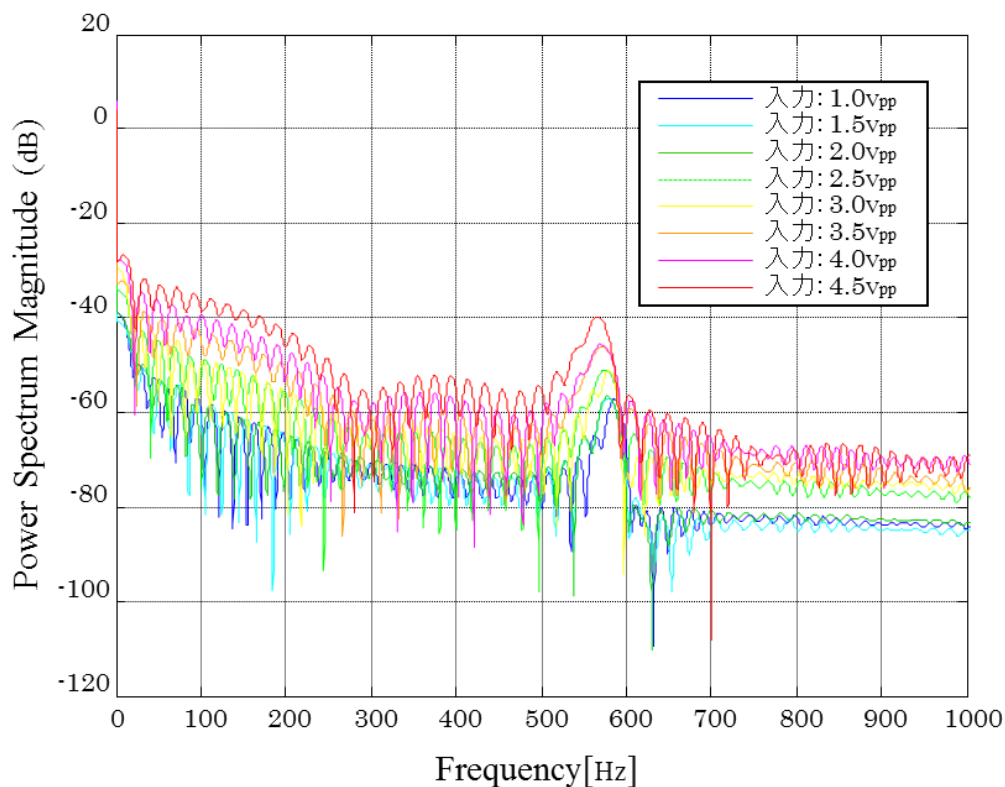


図 5.12 : 入力加速度と電圧 PSD

### 5.3 抵抗値依存試験

前節には、衝撃荷重を加えた際にはそれぞれのピエゾ素子の固有周波数で振動していることを確認した。特定の周波数で共振を持つことは整合抵抗値を持つことを意味する。よって、本節では抵抗値依存試験を行った。負荷抵抗値を変化させながら出力データを計測し、整合抵抗値の導出、そして整合時の最大出力についても検証する。試験条件と試験構成は前節の試験構成と同様である。入力振幅は本試験では 1.5V とした。整合抵抗値の理論式(7)より、容量値：C と共振周波数 586Hz 以下のように整合抵抗値は導出される。

$$Z = \frac{1}{2\pi f c} = \frac{1}{2 * \pi * (586) * 20 * 10^{-9}} = 14k\Omega$$

上述より、整合抵抗値は 14kΩ 付近にあり、この付近の抵抗で出力最大になることが予測される。下図 5.13, 5.14 に試験結果を示した。電圧波形は大きな抵抗値を負荷するにしたがって出力電圧のピークも大きくなることが確認できた。対し、電流波形は抵抗値の増加に伴い電流が減少する傾向にあることを明らかにした。それぞれの波形において減衰するまでの時間は抵抗値に依存していることがわかる。これは負荷した抵抗値によって電荷の流れ易さが決まることによる影響であると考えられる。ちなみに機械振動における収束時間は抵抗値によって変化せず、電気振動に関してのみ抵抗値による影響を受けていることが分かった。電圧と電流の積から電力波形を導出できるため、抵抗値増加に伴い、電圧の増加傾向、電流の減少傾向のために中間地点で最適値である整合抵抗値が導出できると考えられる。

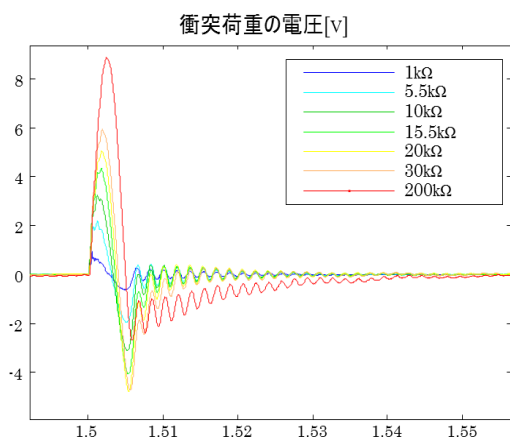


図 5.13 : 抵抗値による電圧波形

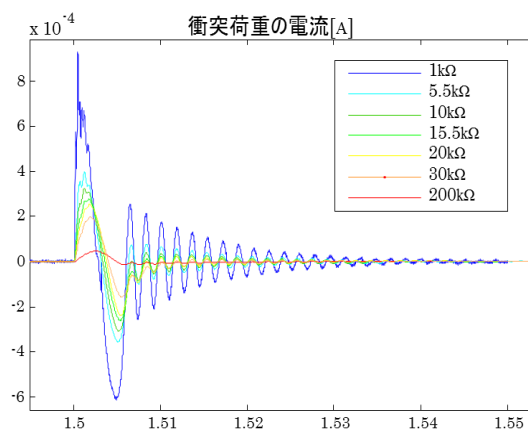


図 5.14 : 抵抗値による電流波形



以下、図 5.15, 5.16, 5.17, 5.18 にそれぞれの結果をまとめ、それぞれの整合抵抗値も明示した。図示した結果から整合抵抗値は 15.5kΩ 付近に整合抵抗値があることが確認できた。図 5.15, 5.16, 5.17, 5.18 と表 5.2 より、抵抗依存性があることを確認した。

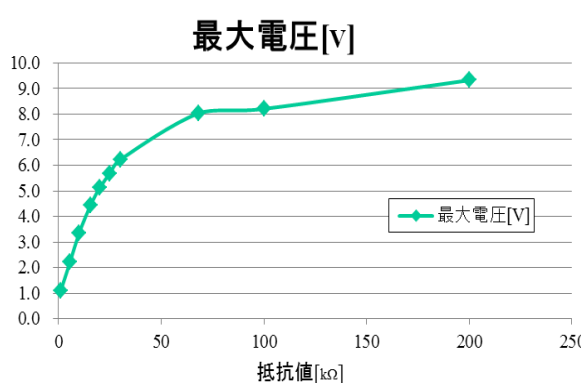


図 5.15 : 抵抗値による電圧

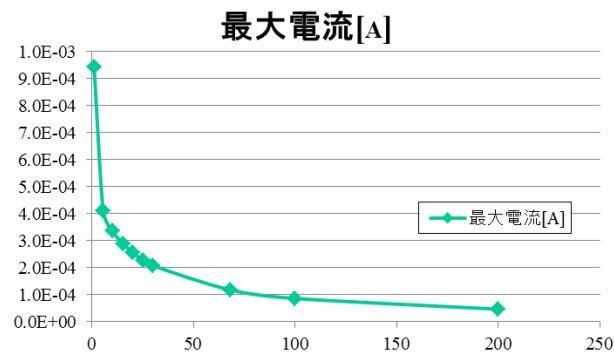


図 5.16 : 抵抗値による電流

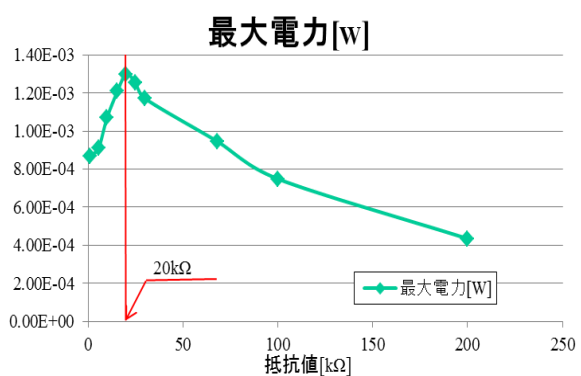


図 5.17 : 抵抗値による電力

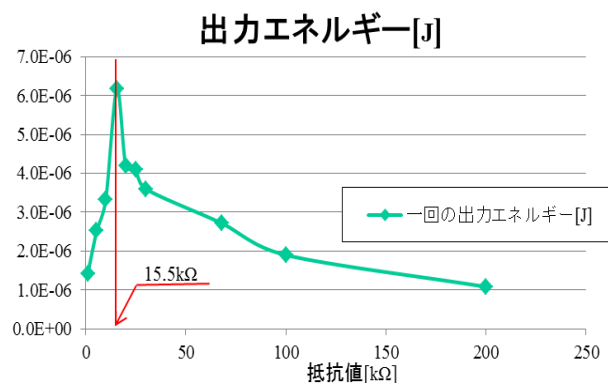


図 5.18 : 抵抗値に対する出力エネルギー

表 5.2 : 抵抗依存性試験の試験結果

抵抗値[kΩ]	電圧[V]	電流[mA]	最大電力[mW]	出力エネルギー[μJ]
1	1.1	0.94	0.87	1.4
5.5	2.2	0.41	0.91	2.5
10	3.4	0.34	1.07	3.3
15.5	4.4	0.29	1.21	6.2
20	5.1	0.26	1.30	4.2
30	6.2	0.21	1.17	3.6
68	8.0	0.12	0.95	2.7
100	8.2	0.09	0.75	1.9
200	9.3	0.05	0.44	1.1

## 5.4 衝突箇所依存試験

本節ではピエゾ素子に対し、衝撃荷重の入力点は変わらないが素子のどの点に衝撃荷重を印加するのが出力最大になるのか、衝突箇所依存性を検証する。実際に本節でピエゾ素子表面の様々な点に衝撃荷重を加え、出力パラメータを実測した。実際のアプリケーションを作成する際には本節で解析した入力点に衝撃荷重を加え、高出力化を目指す。

本試験条件における変更点のみ言及する。衝突入力箇所は以下の図 5.19 の通り 12 箇所である。図 5.19 の黒のマークがついている点である。ピエゾ素子の表面には保護のためテープを貼付した。素子に衝突させやすくするため、長いねじに変えているため錘の重量は 15.3g に変更した。抵抗値は前節で導出した理論整合抵抗値である 14k $\Omega$  を負荷した。

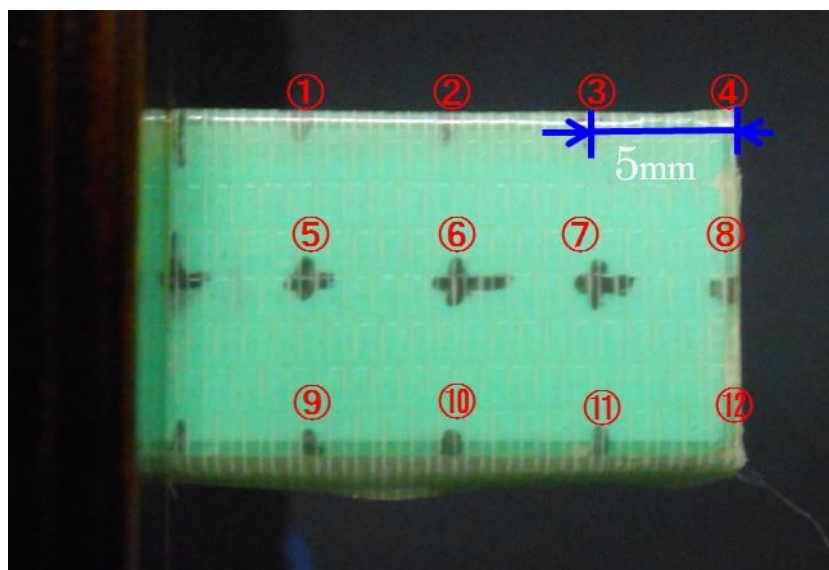


図 5.19 : 衝突箇所全 12 箇所

図 5.20, 5.21, 5.22 の三次元棒グラフを用い、一回目の試験結果を示した。図 5.20 に示した図は衝突箇所による出力電圧を示している。図 5.20 より根元に近づくに従い出力電圧が増加する傾向にあることが確認出来た。図として表示していないが、電流は電圧の従属変数であるため、電圧同様先端に向かい減少する傾向が確認した。図 5.21 に示した電力は電圧と電流の積によって与えられるため、電圧と異なった傾きを持って先端に向かって減少する傾向が確認できた。電力の時間積分で与えられる出力エネルギーは電圧、電流、電力に反して先端に向かうに従って出力エネルギーは増加傾向であることが示唆される。最先端の三点が少し低めに出力されてしまっているが、傾向としては増加傾向である。上述に示した出力の傾向に対し妥当性があるのかという点については再試験結果を後述するためその際に考察する。

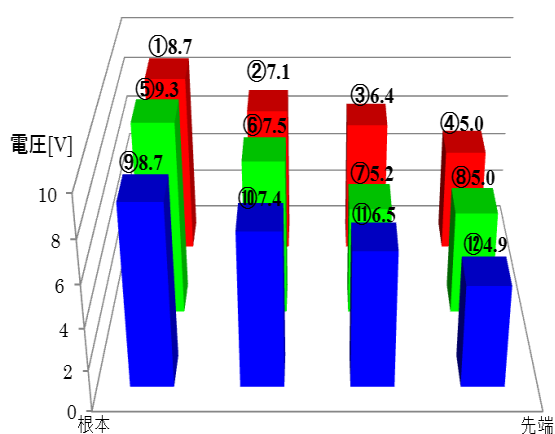


図 5.20 : 衝突箇所による出力電圧

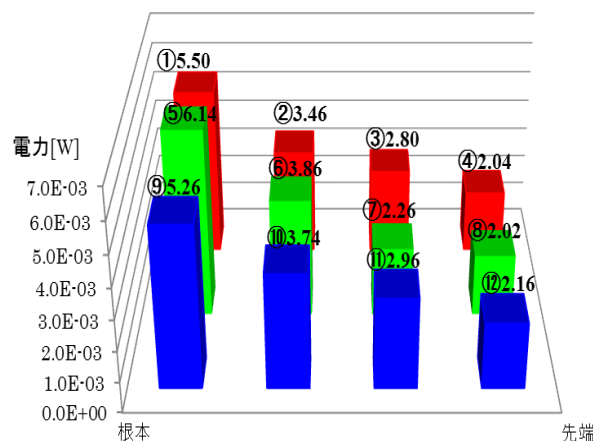


図 5.21 : 衝突箇所による出力電力

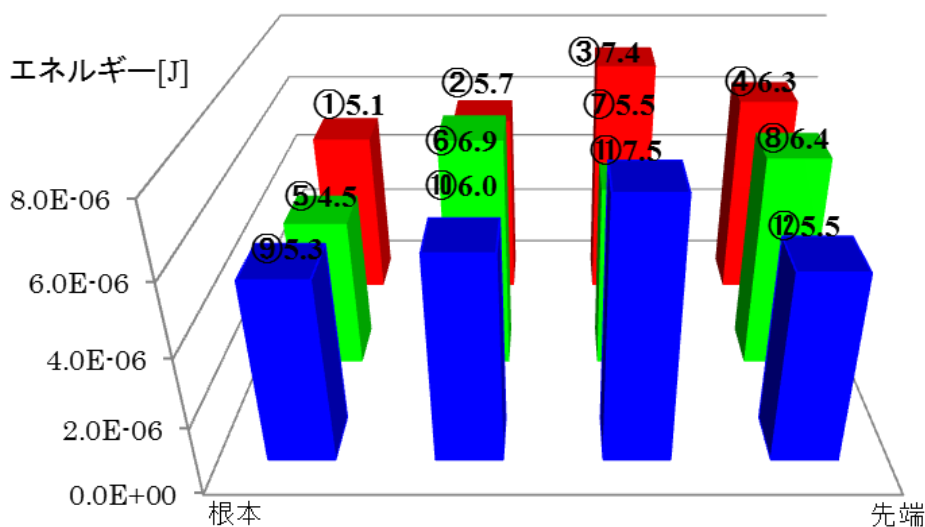


図 5.22 : 衝突箇所による出力エネルギー

中心上の⑤, ⑥, ⑦, ⑧に対し, 電圧波形を記載し, 更に厳密に衝突箇所に対する影響を考察した。図 5.23 には今回比較対象としている衝突箇所を明示しており, その箇所に衝撃荷重を加えたときの電力波形が図 5.24 に示している図である。それぞれの電力波形は非常に特徴的な波形をしており, 衝突箇所依存性の有無を顕著に示している。最も根元に近い⑤は電力波形のピークの値が最も高く, 減衰も早い波形となっている。それに対する最も先端に近い⑧の波形は減衰が小さく, 電力波形がふたこぶのような波形をしていることが確認できる。先端に近づくにつれて, 電力波形は鈍ったピークを持つようになる代わりに減衰が小さくなる傾向にあることが確認できる。逆に根元に近づくにつれ一瞬のピーク値が大きくなり, 減衰も早くなる傾向があることが今回の試験より確認できた。

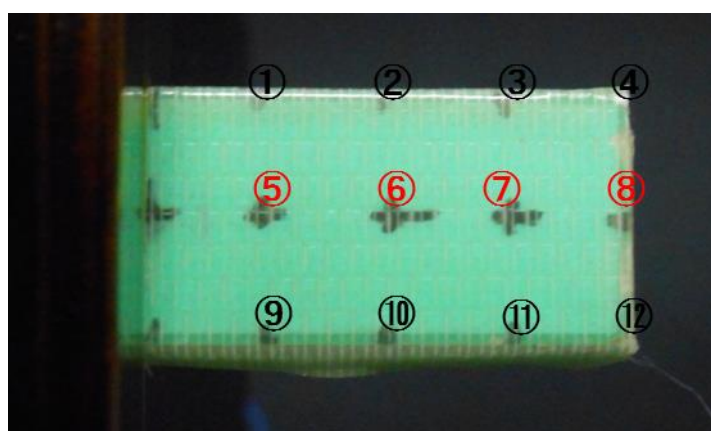


図 5.23 : 衝突箇所の再掲

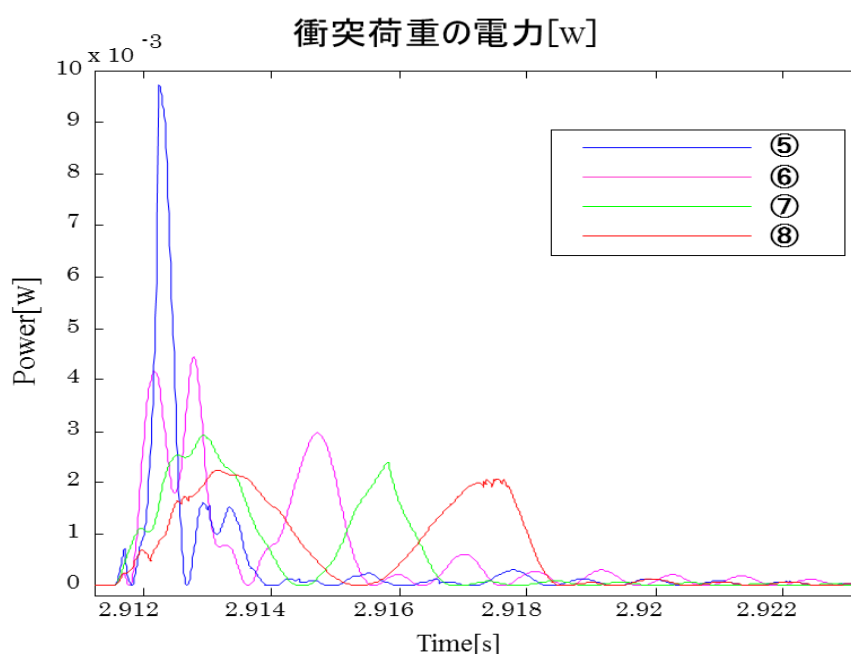


図 5.24 : 上図の衝突箇所の電力波形

上述の出力エネルギーが最先端において減少することの正否を確認するために、再度衝撃箇所依存試験を行った。図 5.25 には再試験の試験構成を示した。再試験の際の変更点としては素子の平行キーを取り除いた点である。前回の試験では piezo 素子に平行キーと呼ばれる金属の棒を張り付けて実験していた。理由は piezo 素子に貼付されている平行キーをいつも試験する際にクランプすることによって試験のたびにクランプ条件が変わることを防ぐことが可能なためである。上述の理由のため平行キーを貼付していたが、平行キーが傾いて固定されていたため、再試験の際に取り除いた。変更の二点目は衝撃荷重の入力箇所を増やした点である。入力箇所を増やしたため前回よりも詳細に入力箇所の依存性を検証可能である。以下に 15 点入力箇所を示した。

図 5.26 に衝突箇所 15 点の出力電圧を示した。電圧は前回と異なり概ねフラットな傾向があることが分かった。その中でも⑥, ⑦, ⑪, ⑫の点で電圧が他の点に比べて大きくなる結果となった。

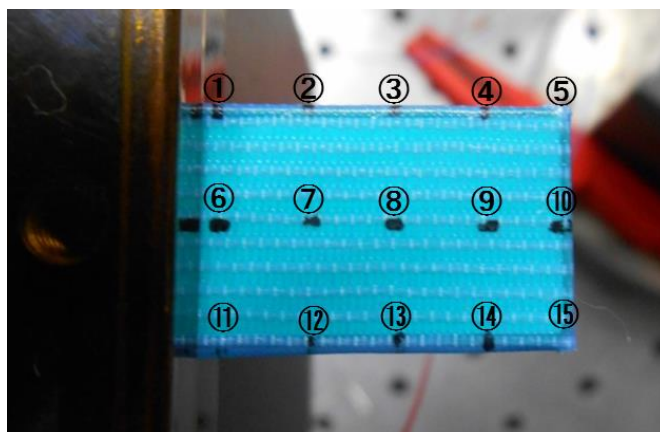


図 5.25 : 衝撃荷重入力箇所全 15 箇所

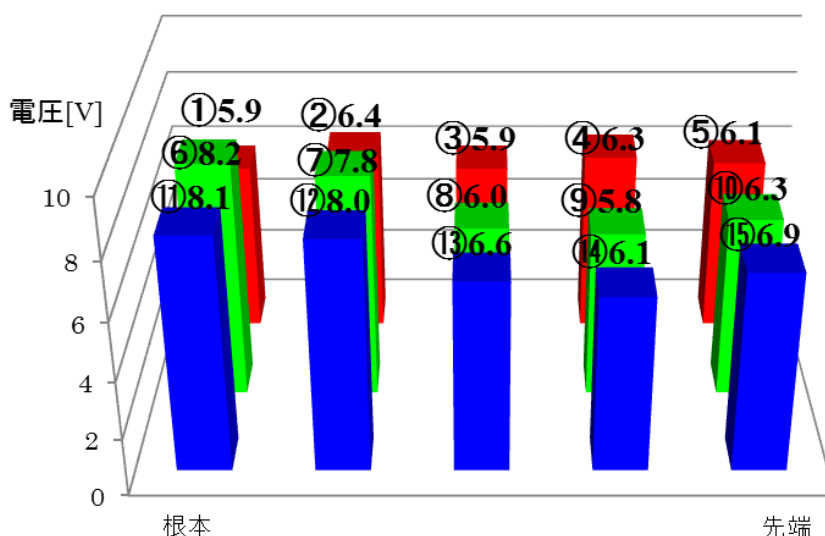


図 5.26 : 入力箇所依存性試験出力電圧結果

図 5.27, 5.28 に電力と出力エネルギーの結果を示した。電力は電圧に続きフラットな傾向が確認でき、出力エネルギーは先端に向かい増加する傾向が確認できた。電力そして出力エネルギーの両結果において⑥, ⑦, ⑪, ⑫特に⑪の点で出力が大きくなる傾向を確認した。⑥, ⑦, ⑪, ⑫において出力が大きくなる原因としてはんだボールの影響がある。図 5.29 に試験に使用したピエゾ素子の全容を写真として掲載した。上述のように⑪の近くにはんだボールが表面と裏面にある。よってはんだボールの影響で 11 点近辺において密着度合いが高まり、強くクランプされたため出力が増加したと考えられる。前回の入力箇所依存試験においてもクランプ近くにおいて出力が上昇する傾向が確認できた。前回, 今回の試験結果より, 衝撃荷重を印加する際には固定端付近に印加することによって出力が増加することが示唆される。以上の考察に反し, 今回の出力エネルギーの試験結果より先端のエネルギーが大きいことが確認できている。これは著者の私見であるが周波数の影響があると考えた。挙動はイメージできないが, 先端へ衝撃を加えた際, 振動が低周波優位になるのではないかと考察した。先端において低周波優位のため電圧振動の面積が大きく, 減衰も小さいため, 出力エネルギーが大きくなったと考察する。

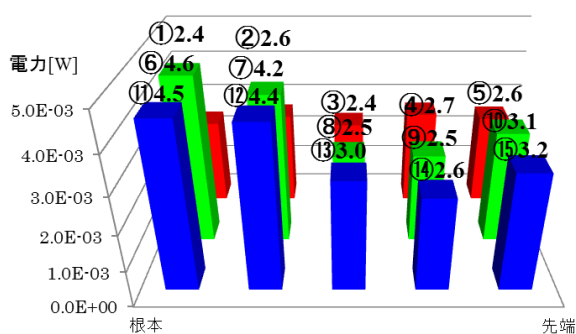


図 5.27 : 電力結果

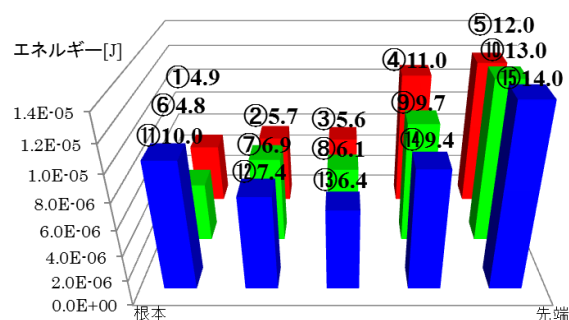


図 5.28 : 出力エネルギー結果

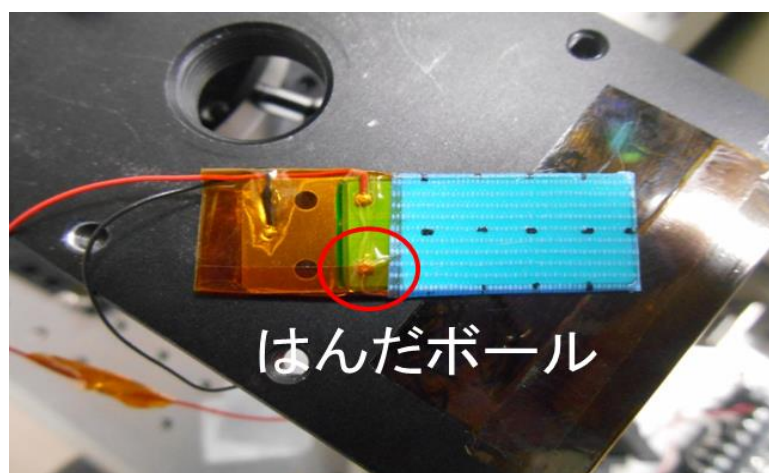


図 5.29 : 固定端の影響

図 5.31 に再試験結果を示した。素子中線である⑥, ⑦, ⑧, ⑨, ⑩に衝撃荷重を加え, 電力波形を比較した。図 5.31 に試験結果の電力波形を示した。前々回の試験結果同様根本に向かって電力のピークが大きく鋭い電力波形になる傾向があることを確認した。対し, 先端に向かうにしたがって, 電力のピークが鈍り, 減衰の少ない, 二つ大きなピークをもつような電力波形になることを確認した。

本考察において妥当性を検証するため図 5.32 に電圧 PSD を示した。根本に向かうにしたがって, 低周波の Power が減少し, 共振点 Power が支配的になることがわかる。対し, 先端に向かい, 低周波の Power が隆起し, 共振周波数の点と低周波の Power が強くなることが確認できた。よって先端に向かい, 低周波の Power が強くなるため, 減衰が小さくなり, 振動が持続するようになると考えられる。

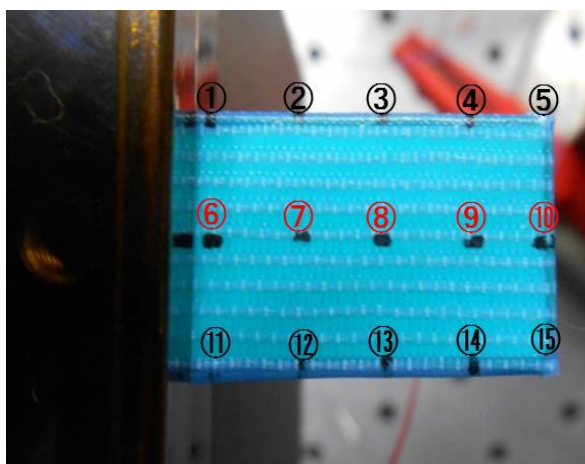


図 5.30 : 衝突箇所再掲

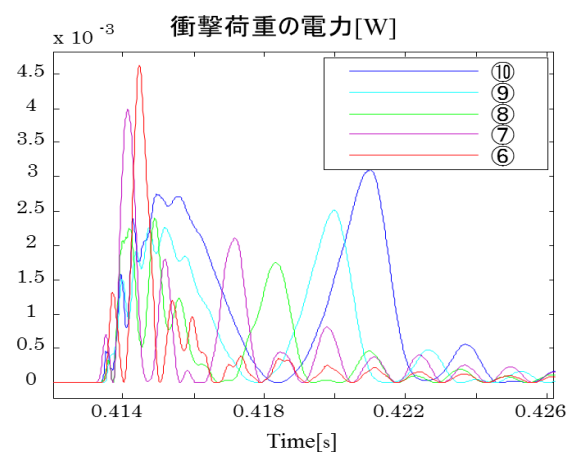


図 5.31 : 入力箇所による電力の比較

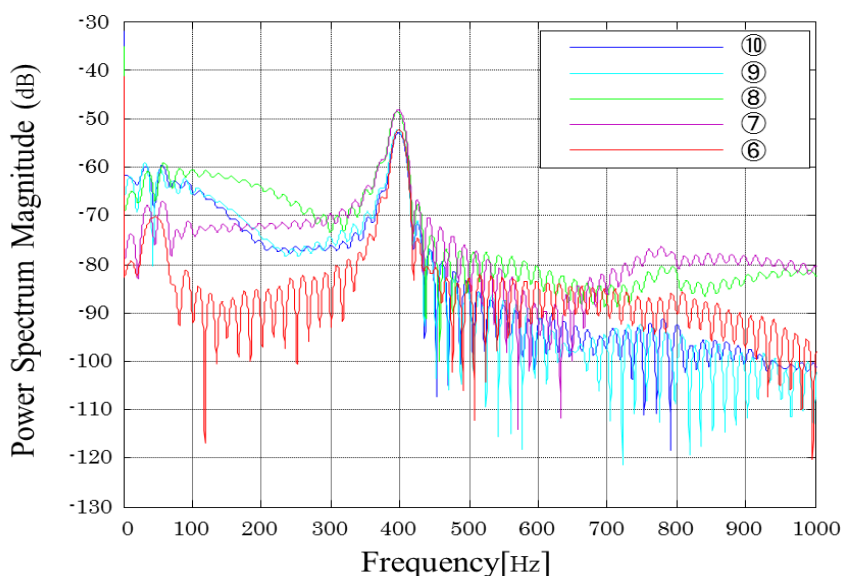


図 5.32 : 入力箇所による電圧 PSD の比較

図 5.33 と 5.34 に FEM シミュレーションの結果を示した。シミュレーションとしては長方形の部材に対し、任意の点にインパルスの荷重を加え、その時の応力をシミュレートした。応力は Von mises 応力を用いた。Von mises 応力は以下理論式(28)によって導出され、スカラー量である。本来応力はテンソルであるが以下の理論式より、スカラー量に変換し、応力解析している。具体的な理論については材料力学などの本を参照されたい。結果を図 5.34 示した。部材表面積に生じる応力の総和を縦軸に横軸に測定時間を示した。先端に向かうにしたがって応力総和も大きくなる傾向にあり、根本に向かうに従い減衰が早くなる傾向にある。この結果は今回の試験結果と一致することがわかる。

Von mises 応力:

$$\sigma_{VM}[\text{N/m}^2] = \sqrt{\frac{1}{2}((\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2)} \quad (28)$$

$\sigma_1$ :最大主応力  $\sigma_2$ :中間主応力  $\sigma_3$ :最小主応力

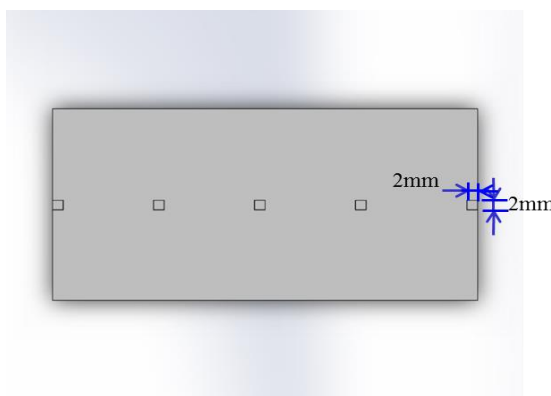


図 5.33 : FEM シミュレーション

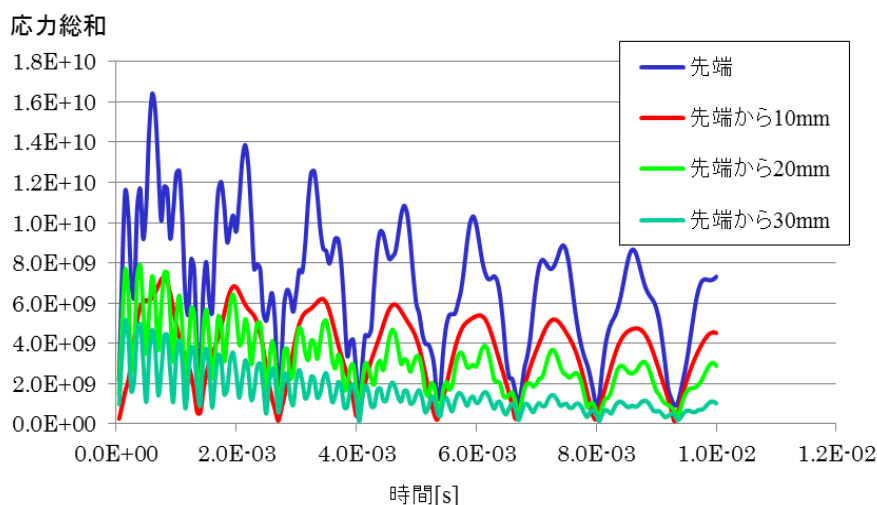


図 5.34 : FEM シミュレーション



## 第 6 章 具体事例による実用化検討

### 6.1 衝撃荷重と曲げ荷重の合成についての検討

前節では衝突依存性や荷重を加えた際の振動周波数から整合抵抗値が存在することを確認し、衝撃荷重印加した際の出力発電量も確認した。

以上より、本節では曲げ荷重と衝撃荷重の合成を試み、振動した際に効果的に発電することを目指す。図 6.1, 6.2 には衝撃荷重と曲げ荷重の合成試験の試験構成を掲載した。試験方法としては piezo 素子の先端に錘を付加する。その素子を加振器に固定し振動させる。piezo 素子先端の下に固定した金属板を配置し、振動した時に錘を金属板に衝突させる試験構成である。錘を構成するネジの先端から金属板までの高さを  $L$  とし、 $L$  を変化させた時の出力パラメータを比較した。

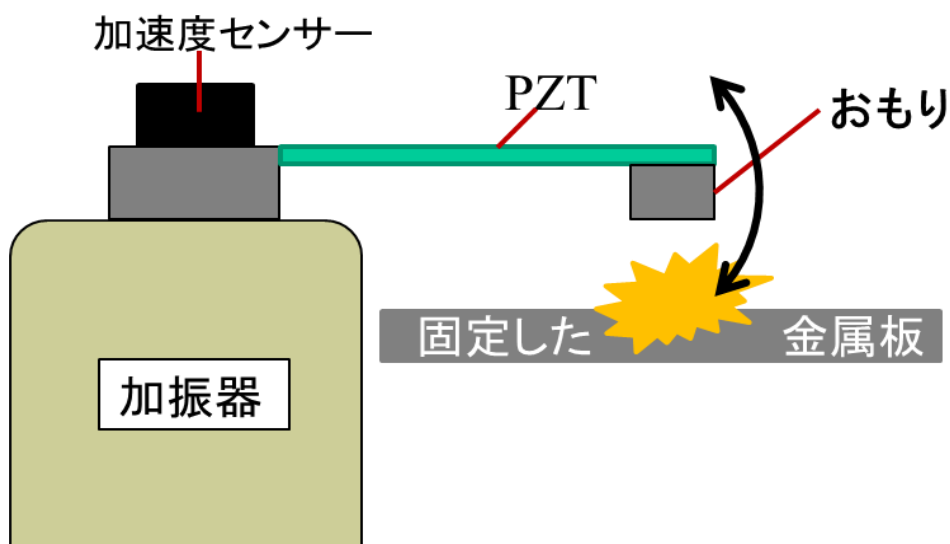


図 6.1 : 試験構成モデル

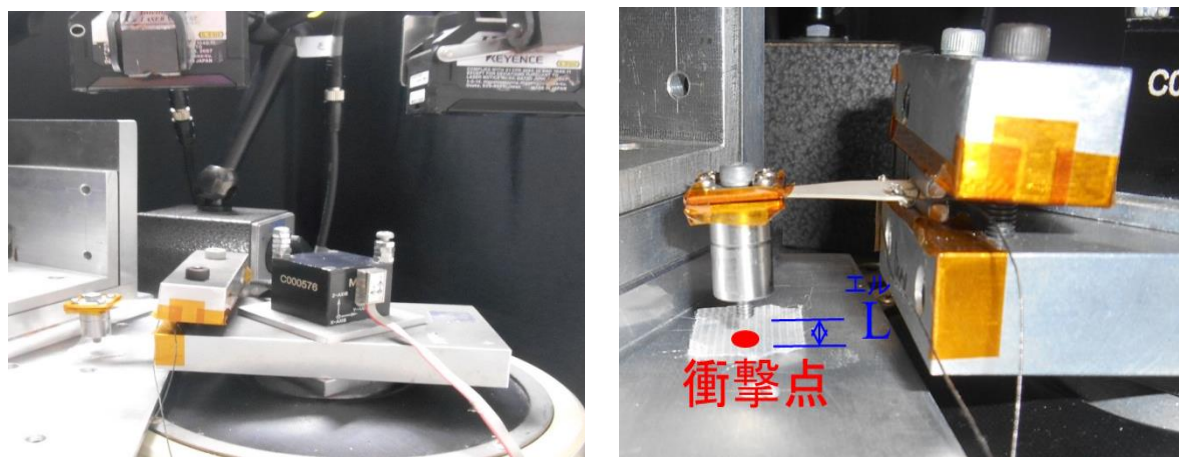


図 6.2 : 試験構成写真

表 6.1 に具体的な試験条件明示した。先端に付加した錘の荷重は以下の通り、2.6g と 10.5g の二種類を試した。

ならびに試験で得られた電圧波形を図 6.3 に示した。電圧波形より単一モードによる振動でなく、波形が欠けていることが図 6.3 より確認できる。出力の定量評価に関しては後述することとする。錘が 10g の時の波形はプラス 10V 付近で電圧波形が鋭角に折れ曲がっている。この時点が衝撃荷重の印加した点だと考えられる。

表 6.1 : 衝撃荷重曲げ荷重合成試験の試験条件

	衝突体条件		その他の実験条件
衝突面	ねじの先端	高さ	可変
錘	2.6g と 10.5g	サンプリング周波数	10 $\mu$ s
	被衝突体条件	測定時間	3s
ピエゾ素子	PZTC	変位測定点	① 錘変位 ② ベース変位
衝突箇所	先端の中心	加振周波数	39Hz と 23Hz
負荷抵抗	82k $\Omega$ と 150k $\Omega$	入力振幅	0.9Vp-p

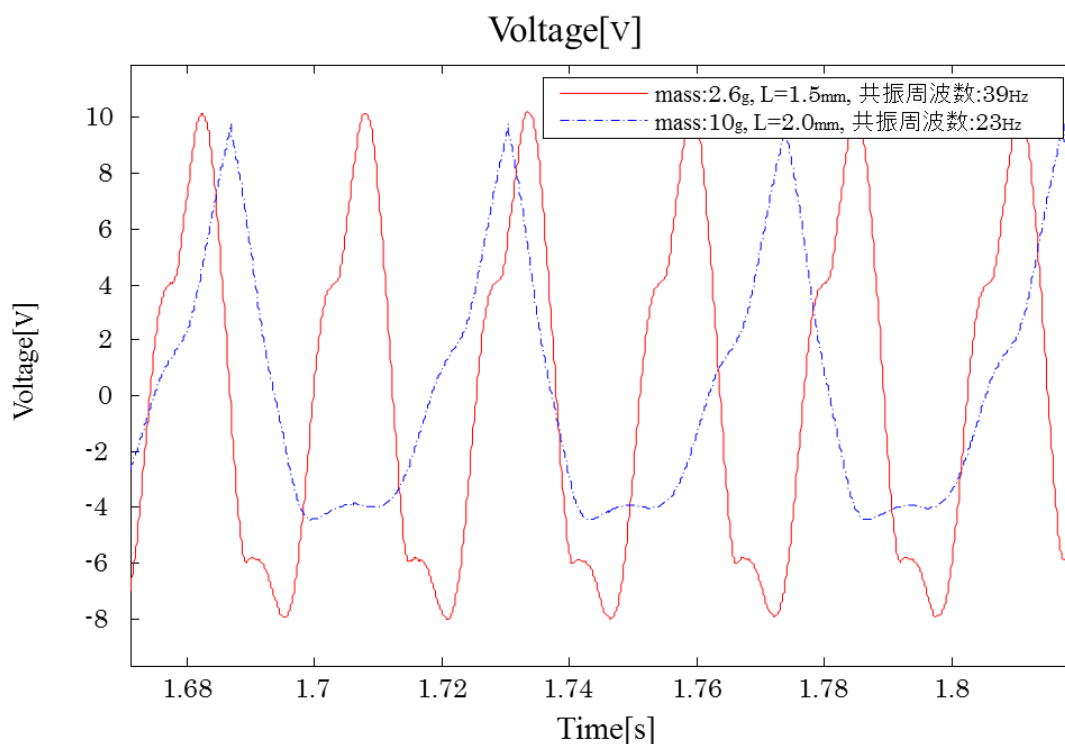


図 6.3 : 曲げ衝撃荷重による電圧波形

以下、図 6.4, 6.5 に錘の荷重別に電圧 PSD と変位 PSD を示した。まずは 2.6g の結果である。変位 PSD より、高さを 0 にして衝撃荷重を印加した際に全体的な Power が大きいことが確認できた。対し、強制加振した際の Power が全体的に小さくなることがわかる。

図中※で表した共振周波数は以下の表において定量的に比較している。電圧 PSD も同様に共振点において以下の表で定量比較を行っている。以下の表 6.2, 6.3 より明らかであるが変位、電圧共に共振点では衝突なしの強制加振した時が最大の Power であることがわかっている。加えて、衝突までの距離が近づくに従い、共振点の Power が小さくなることを確認した。変位 PSD において共振周波数の 39Hz 以外にも 19.5, 58.5, 78Hz に共振が表れていることがわかる。機械振動において共振周波数の 0.5, 1.5 倍そして 2 倍であることが確認できる。上述より、一質点の単一モードの振動においても衝撃荷重を印加することにより、単一モードの振動デバイスに多モード特性をもたらすことを示唆しており、多モードを持つ振動源を利用したアプリケーションの際に有効である。

## 2.6g

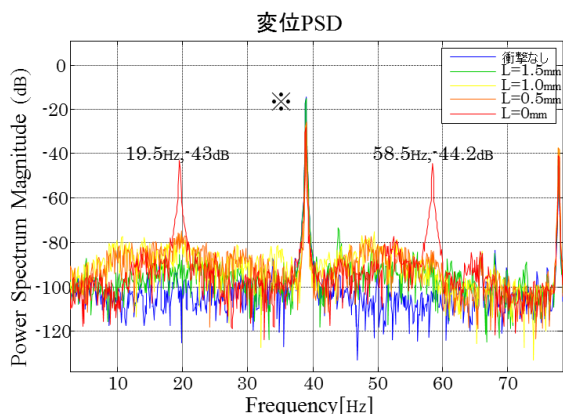


図 6.4 : 曲げ衝撃荷重による  
変位 PSD(2.6g)

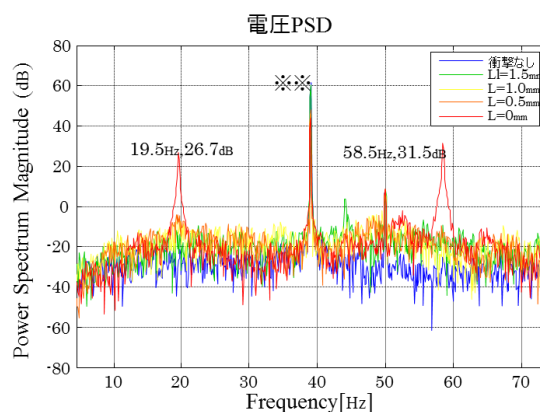


図 6.5 : 曲げ衝撃荷重による  
電圧 PSD(2.6g)

表 6.2 : ※共振点の比較

変位 PSD	Primary=39Hz
衝撃あり, L=0mm	-28.1[dB]
衝撃あり, L=0.5mm	-25.7[dB]
衝撃あり, L=1.0mm	-26.2[dB]
衝撃あり, L=1.5mm	-14.9[dB]
衝撃なし	-14.3[dB]

表 6.3 : ※共振点の比較

電圧 PSD	Primary=39Hz
衝撃あり, L=0mm	43.9[dB]
衝撃あり, L=0.5mm	47.7[dB]
衝撃あり, L=1.0mm	46.3[dB]
衝撃あり, L=1.5mm	60.8[dB]
衝撃なし	61.5[dB]

下図 6.6 に変位 PSD において 0.5, 1.5 倍そして 2 倍の共振が表れる仮説を示す。まず図 6.6 を参照されたい。下図 6.6 には 2.6g の機械振動である 39Hz 相当の sin 波を示した。本来 39Hz の強制加振であれば以下のような変位波形になるはずであるが、高さ 0mm の位置に固定された金属板を配置すると、半周期ごとに固定された板に衝突するため、半周期ごとの振動になる。つまり以下の図 6.6 で記載するところの半周期、0.0128s 毎に衝撃荷重が加わり、39Hz の曲げ変形と 78Hz 毎の衝撃変形を合わせた変位波形になるため共振周波数が 39Hz と 78Hz に現れる。さらに、振動の合成を考える。39[Hz]と 78[Hz]機械振動の合成を考える際、以下、波の合成の式を参照する。(29)式において  $\omega'=2\times\pi\times 78 \text{ Hz}$  であり、 $\omega=2\times\pi\times 39 \text{ Hz}$  である。以下の波の合成の式に代入して合成波を導出すると、合成波は 58.5Hz と 19Hz に周波数が表れることが確認できる。よって単一モードで曲げ振動をさせても衝撃荷重を印加することによって倍の周波数に共振が表れ、一部が波の合成をすることによって複数の共振が表れることを示唆した。先端から振動が固定端に向けて振動が伝達していき伝達過程で振動合成が生じることが考えられるため、衝撃荷重を用いて発電を行う際、素子の構造によって振動伝達の容易性が決まる可能性もある。

ただし、非線形であるインパルスに類似している衝撃と線形である曲げを合成できるか保証はないため、今後本現象に関してより深く検証していく必要がある。

$$\text{波の合成: } \sin\omega t + \sin\omega' t = 2\sin\frac{(\omega+\omega')t}{2} \cos\frac{(\omega-\omega')t}{2} \quad (29)$$

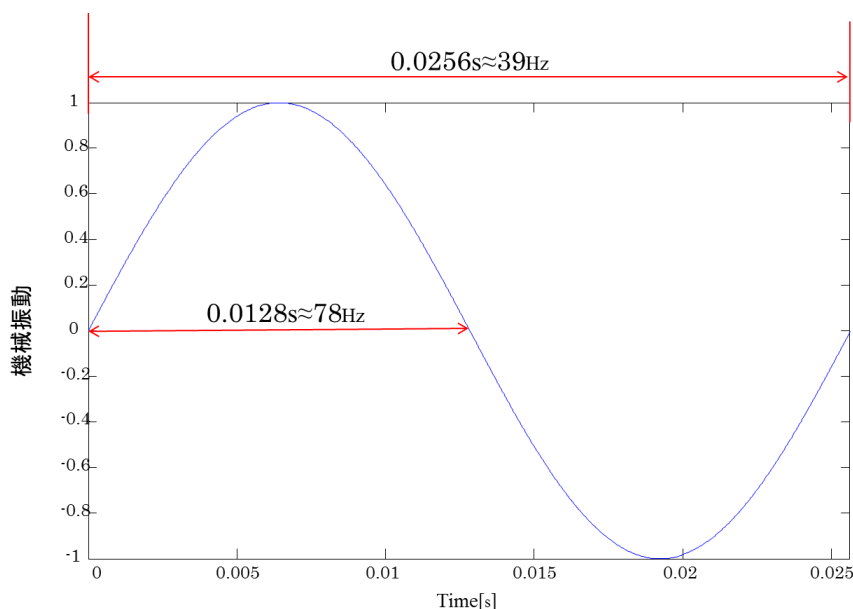


図 6.6 : 機械振動の波形モデル

図 6.7, 6.8 に 10.5g を付加した時, 曲げ衝撃振動の変位 PSD と電圧 PSD を示した。並びに, 前頁同様共振点における定量評価を以下の表 6.4, 6.5 で行っている。前回同様, 変位電圧の両図において衝撃なしの時に共振点以外の Power が低いことが確認できる。共振点における Power は衝撃荷重なしの強制加振の場合が最大 Power となっている。衝撃入力でも衝撃までの距離が短くなるに従い, 共振点の Power が低くなり, 共振点以外の Power が高くなる傾向を確認した。衝撃荷重の入力によって発電に寄与する帯域を改善することができる可能性を示唆している。紙面の都合上, 次頁においてそれぞれの錘を付加した際の実出力パラメータを定量評価する。

### 10.5g

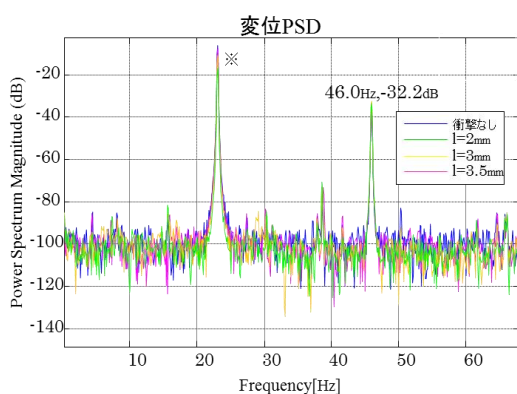


図 6.7 : 曲げ衝撃荷重による  
変位 PSD(10.5g)

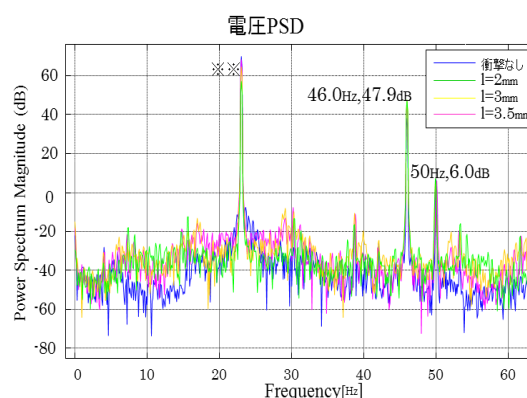


図 6.8 : 曲げ衝撃荷重による  
電圧 PSD(10.5g)

表 6.4 : ※共振点の比較

変位 PSD	Primary=23Hz
衝撃あり, L=2mm	-16.8[dB]
衝撃あり, L=3mm	-10.8[dB]
衝撃あり, L=3.5mm	-7.64[dB]
衝撃なし, 強制加振	-6.12[dB]

表 6.5 : ※※共振点の比較

電圧 PSD	Primary=23Hz
衝撃あり, L=2mm	57.2[dB]
衝撃あり, L=3mm	64.6[dB]
衝撃あり, L=3.5mm	68.1[dB]
衝撃なし, 強制加振	69.9[dB]

以下の表 6.6, 6.7 に出力パラメータを定量評価した。衝撃荷重を加えない時に出力が最大であることが二つの表よりわかる。ならびに衝突までの距離が短くなるにつれ出力パラメータが減少することも確認した。つまり、今回、曲げ荷重に衝撃荷重を印加したが、衝撃を印加した際に出力が減少するため、衝撃荷重の入力方法が芳しくないことが分かった。図 6.3 の 10g の波形からなるべく曲げ振動を阻害しないように衝撃荷重を印加する必要があることも試験結果から考えられる。本項における目的である衝撃荷重と曲げ荷重の合成とその具体条件は不明確なままである。従って、衝撃荷重の入力方法も一考する必要があるが、合成に際し、厳密な条件検討ならびにその提案を行う。

### 2.6g

表 6.6 : 衝撃荷重曲げ荷重合成試験の出力結果

実験条件	Acceleration[G]	電圧[V <sub>p-p</sub> ]	電流[mA <sub>p-p</sub> ]	電力[mW]	一周期出力 E[μJ]
衝撃あり, L=0mm	2.6	4.2	5.0E-02	0.2	0.5
衝撃あり, L=0.5mm	2.6	5.8	7.0E-02	0.23	0.8
衝撃あり, L=1.0mm	2.6	5.2	6.4E-02	0.18	0.6
衝撃あり, L=1.5mm	2.6	18.4	22.4E-02	1.30	11.9
衝撃なし 強制加振	2.6	19.8	24.2E-02	1.40	14.3

### 10.5g

表 6.7 : 衝撃荷重曲げ荷重合成試験の出力結果

実験条件	Acceleration[G]	電圧[V <sub>p-p</sub> ]	電流[mA <sub>p-p</sub> ]	電力[mW]	一周期出力 E[μJ]
衝撃あり L=2mm	1.1	14.4	9.6E-02	0.66	5.4
衝撃あり L=3mm	1.1	29.8	19.8E-02	2.00	26.7
衝撃あり L=3.5mm	1.0	41.9	27.9E-02	3.30	57.9
衝撃なし 強制加振	1.0	50.4	33.6E-02	4.40	86.0

## 6.2 荷重合成の検討

前節では衝撃荷重の入力方法に問題があるため出力が減少してしまうことを確認し、衝撃荷重の入力方法に関して具体条件を明確化したい。本節では、入力方法の検討として以下のような試験を行った。試験方法としては、強制加振しているピエゾ素子に対しハンマーを用い、無作為のタイミングで衝撃荷重を印加する。その際、変位波形と電圧波形を細かく計測することによって衝撃の影響を解析するものである。具体的な試験条件は以下の表 6.8 にまとめた。加えて、試験の構成写真と試験に使用したハンマー代わりであるボールペンを以下、図 6.10 に掲載した。

以下の図 6.9, 6.10 試験構成写真には錘を先端に 6.0g 付加した時の写真を掲載した。試験に使用したボールペンの重量は 38.0g であり、試験の際、膨らんでいるボールペンの頭でピエゾ素子の先端に衝撃荷重を加えた。強制振動しているピエゾ素子への衝撃荷重の入力タイミング、入力量そして入力による素子変形、それに伴う電圧を具体的に試験検証した。本試験により、前項に示した。曲げ衝撃合成試験において、なぜ剛体の板にピエゾを衝突させたにもかかわらず出力が減少したのという問題が解明できると考えた。

表 6.8 : 荷重合成試験の試験条件

	衝突体条件		その他の実験条件
錘	6.0g と 16.8g	サンプリング周波数	1 $\mu$ s
	被衝突体条件	測定時間	3s
ピエゾ素子	PZTE	変位測定点	①錘変位 ②ベース変位
衝突箇所	先端	加振周波数	39Hz と 23Hz
負荷抵抗	23k $\Omega$ と 57k $\Omega$	入力振幅	1.0V <sub>p-p</sub>

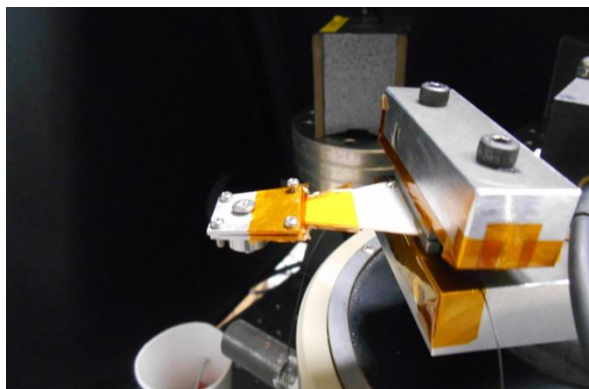


図 6.9 : 荷重合成試験写真



図 6.10 : 試験に使用したボールペン

以下の図 6.11 と表 6.9 に本試験における試験結果を以下に示した。まずは **6.0g** の錘を先端に付加した場合の波形を一部切り出した図とその際の出力パラメータを表にまとめた。図 6.11 には無作為のタイミングで印加した衝撃荷重の変位波形ならびに電圧波形を示している。赤の点線で示したタイミングが衝撃荷重入力のタイミングであり、マイナスの変位からプラスに戻ろうと振動している際に印加した。大きなマイナス方向への変位入力をしたために、戻る振動をキャンセルしてマイナスに振動していることを確認できた。それに伴い、出力電圧の振動もプラスからマイナスの領域に戻ろうと振動している際に衝撃荷重を印加したため、再度、大きなプラスの変位方向へ振動していることがわかる。このことから変位波形に比例して出力電圧がでることが示唆されるだろう。前試験においても強制加振の振動を固定された金属板に衝突させることによって変位を制限するため、出力パラメータ全てが減少したと考えられる。下記図 6.11 において衝撃入力後に両波形の共振周波数が乱れていることも確認した。

表 6.9 において電圧波形の結果を定量的に評価している。表より、衝撃荷重を加えた際、強制加振した結果よりも出力パラメータが高出力化していることが確認できた。しかし、出力エネルギーは導出に切り出した一周期が異なったのか、減少した。よって単に衝撃荷重を入力すれば高出力化するということではないことが分かった。

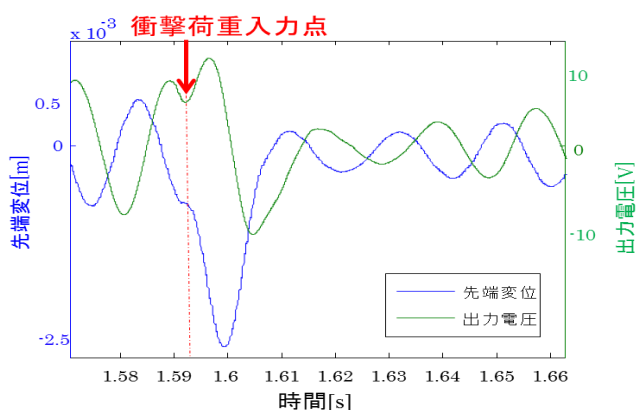


図 6.11 : 無作為に印加した衝撃荷重

表 6.9 : 荷重合成試験の試験条件

	強制加振試験	衝撃強制加振試験
ベース加速度[G]	0.16	0.32
電圧[Vp-p]	19.8	39.5
電流[mAp-p]	0.86	1.7
最大電力[mW]	4.3	20.7
出力エネルギー[μJ]	56.7	39.3



以下の図 6.12, 6.13, 6.14, 6.15 に上記同様 6.0g を付加した時, それぞれ別の時間を切り出した電圧・変位波形を掲載した。加えて, それぞれの波形に特徴的なポイントの時間を明記した。変位波形と電圧波形には少しのズレが生じていることが確認できた。この現象に関しては, 今後の検証すべき課題である。

前述同様, 衝撃荷重によって生じる出力電圧は変位に従属していることがわかる。変位波形に伴って出力電圧がでるため, 衝撃荷重を印加することで, 強制加振によって生じる変位よりも大きな変位を与えることができれば高出力になると考えられる。さらに, 印加するタイミング又は入力量の影響によって図 6.12, 6.13 では衝撃荷重を印加した後に大きく波形が乱れていることを確認した。対し, 図 6.14, 6.15 では衝撃荷重入力後も波形が乱れていないことが確認できた。波形の乱れによって出力が低下するのであれば上記原因の特定と考察をするべきであろう。

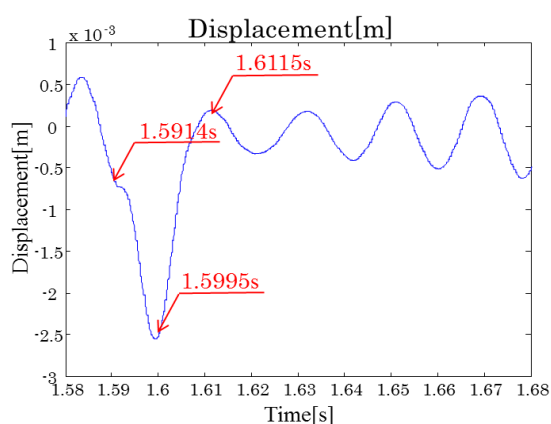


図 6.12 : 荷重合成試験変位波形

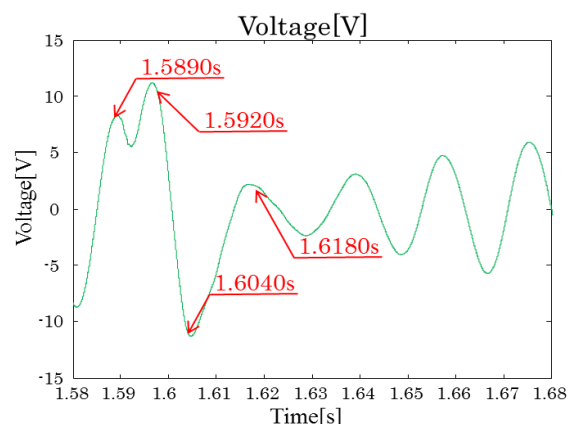


図 6.13 : 荷重合成試験電圧波形

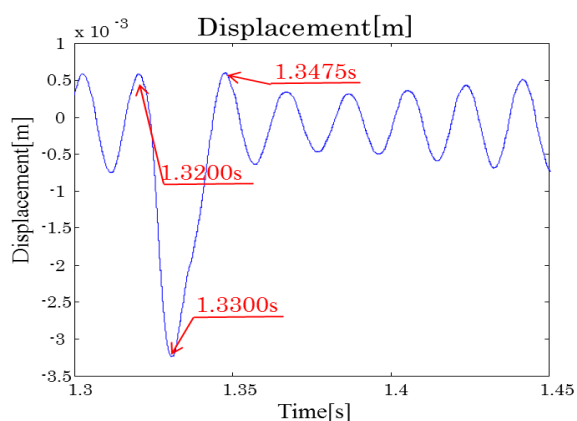


図 6.14 : 荷重合成試験変位波形

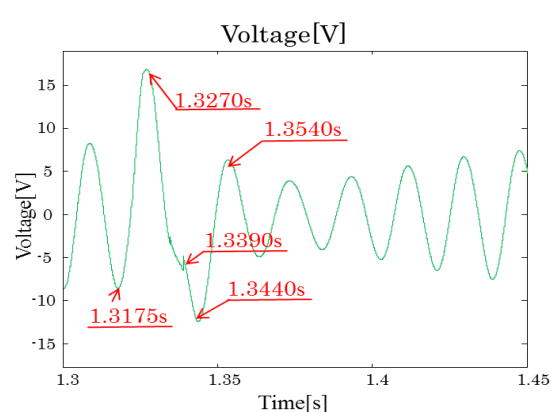


図 6.15 : 荷重合成試験電圧波形

次に **16.8g** の錘を先端に付加した場合の波形を一部切り出した図 6.16 とその際の実出力パラメータを表 6.10 にまとめた。赤の点線で示した時間が衝撃荷重入力のタイミングであり、マイナスの変位からプラスに戻ろうと振動している際に印加した。プラスに振動した際、強制加振の振幅よりも衝撃荷重によって大きく振れ、複雑な振動をしながら定常振動に戻っていく様子が確認できる。今回の波形も一貫して変位に比例した出力電圧が確認できるが、衝撃荷重後の複雑に振動が乱れた領域においては電圧変位の比例関係が一部見られない箇所もある。

前回の 6.0g の結果と異なり、16.8g の今回は全ての出力パラメータによって高出力化できていることが確認できた。

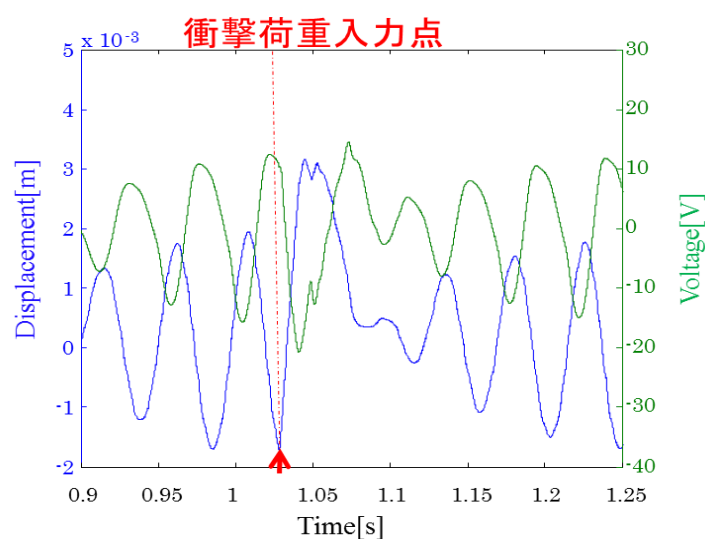


図 6.16 : 無作為に印加した衝撃荷重

表 6.10 : 荷重合成試験の試験条件

	強制加振試験	衝撃強制加振試験
ベース加速度[G]	0.14	0.21
電圧[Vp-p]	37.5	54.5
電流[mAp-p]	0.66	0.96
最大電力[mW]	7.3	18.7
出力エネルギー[μJ]	29.5	88.6

図 6.17, 6.18, 6.19, 6.20 に前回同様 16.8g を付加した時, それぞれ別の時間を切り出した電圧・変位波形を図 6.17, 6.18, 6.19, 6.20 に記載し, 合わせてそれぞれの波形の特徴的な時間を明記した。試験結果としては前回の 6.0g 同様の結果となった。変位波形においては衝撃荷重の入力が大きすぎるためにレーザー変位計が飽和を起しているが, 印加したタイミングを導出することに影響はないと考える。

本節のまとめとして, 衝撃荷重によって出力の高出力化が可能であることを確認した。しかし, 衝撃荷重と曲げ荷重の合成のためには曲げ荷重以上の変位を衝撃荷重によって与えることが必要条件であることも考察できた。さらに, 周期が乱れるため一周期を決定することが容易ではないことに加え, 衝撃荷重によって高出力化しないこともあり(出力エネルギーの観点で), どのような条件において高出力化可能であるか検討することが今後の課題となる。もう一つの今後の課題として, 効率的な衝撃荷重の入力方法であり, 強制加振の変位以上の変位を衝撃荷重による入力方法が最重要検討課題である。上記入力方法を確認することで, 高出力化を期待できる。

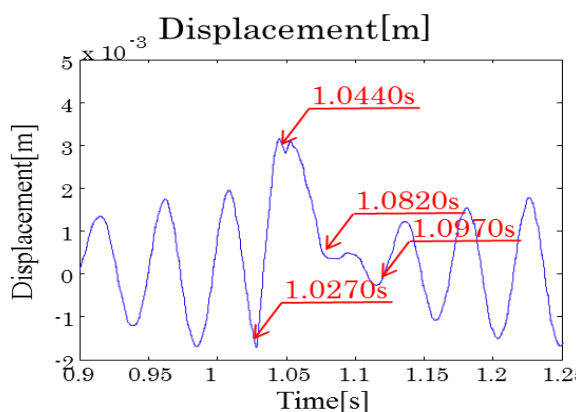


図 6.17 : 荷重合成試験変位波形

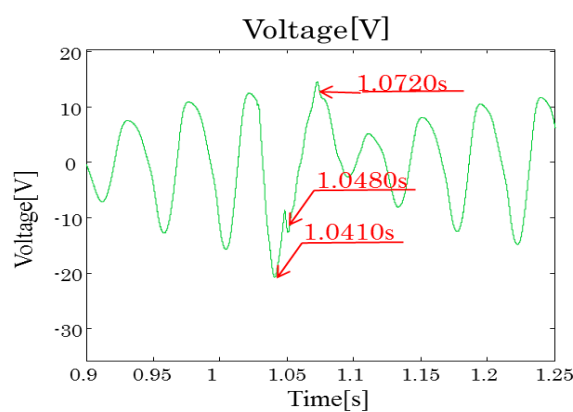


図 6.18 : 荷重合成試験電圧波形

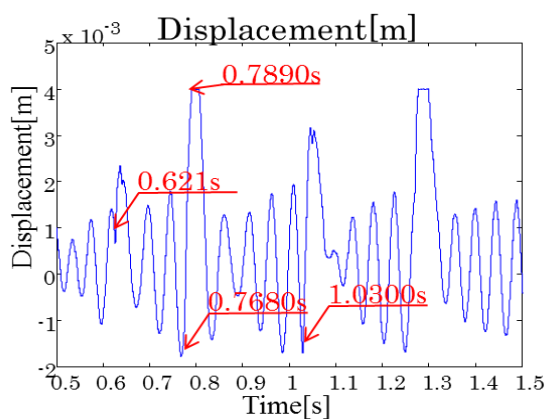


図 6.19 : 荷重合成試験変位波形

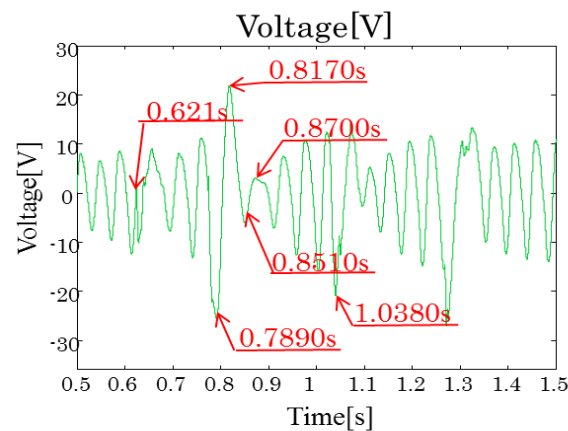


図 6.20 : 荷重合成試験電圧波形

### 6.3 単一モード実用化検討

前節では衝撃荷重によって高出力化が期待できることを確認した。しかし、入力方法はまだ確立されていないため、実用化にむけて課題が残る。よって本節では、入力方法の検討として単一周波数振動をターゲットとし、単一周波数において強制加振した際に衝撃荷重と曲げ荷重を合成し、高出力化と高効率発電を目指す。以下の図 6.21, 6.22, 6.23 表 6.11 に試験構成と試験方法ならびに具体的な試験条件を示した。試験方法は以下のとおりである。図 6.22 に示した提案デバイスを用い、衝撃荷重と曲げ荷重を合成した加振(以下、衝撃強制加振試験)を行った。ならびに、図 6.21 に示した一質点デバイスの強制加振試験を行い、出力パラメータの比較、荷重合成有用性の検証、そして実用化を検討する。図 6.22 の提案デバイスは二階層をもつ構造をとっており、一層には 24.0g、二層には 20g の錘を付加している。下記提案デバイスを強制加振することによって二層を振動させ、一層のピエゾ素子を叩いて衝撃荷重を印加するように設計したデバイスである。図 6.22 に写る青色のテープはピエゾ素子を保護するためのモノであり、大きな意味はないことに注意されたい。上述の提案デバイスと一質点デバイスの出力比較を定量的に行い、有効性を検証するものである。

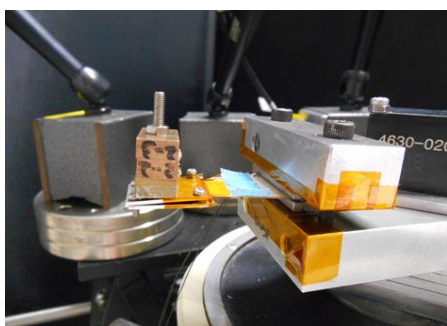


図 6.21 : 強制加振試験写真

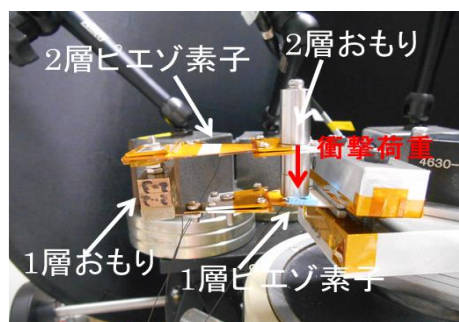


図 6.22 : 衝撃強制加振試験写真

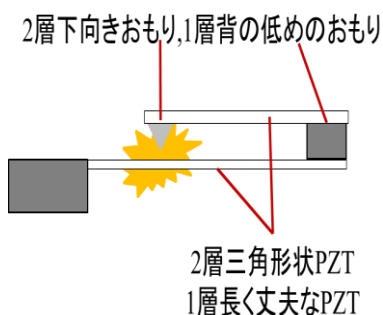


図 6.23 : 衝撃強制加振試験モデル

表 6.11 : 試験条件

	衝撃強制加振試験	強制加振試験
PZT	PZT E×2 枚	PZT E×1 枚
錘	1層 : 24.0g, 2層 : 20.0g	24.0g
負荷抵抗値	110.0kΩ	55.0kΩ
共振周波数	12Hz	25Hz
サンプリング周波数	1μs	1μs
試験時間	3.0s	3.0s

図 6.24, 6.25, 6.26 に提案デバイスの衝撃強制加振試験結果を示した。比較波形は以下の通り、出力電圧、ピエゾ先端変位、電力の三つの波形を示した。それぞれの波形からわかる通り、強制加振による振動と共に衝撃荷重による高次モードが波形の中に確認できる。一層の波形は強制加振による低周波が支配的であることがわかるが、二層の波形には見られない。それぞれの波形を確認すると二層の変位は十分に出ているが、出力電圧が非常に小さいため、電力波形も小さくなっている。

下図 6.26 より、一層では発電できているが、二層の発電量がきわめて少ないことが確認できた。対し、次頁で一質点デバイスの強制加振の結果を示す。

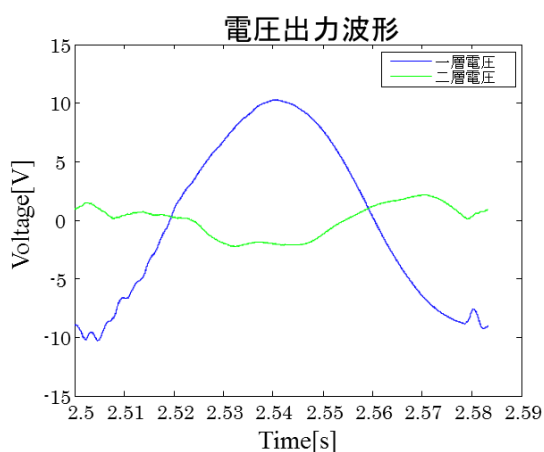


図 6.24 : 電圧波形

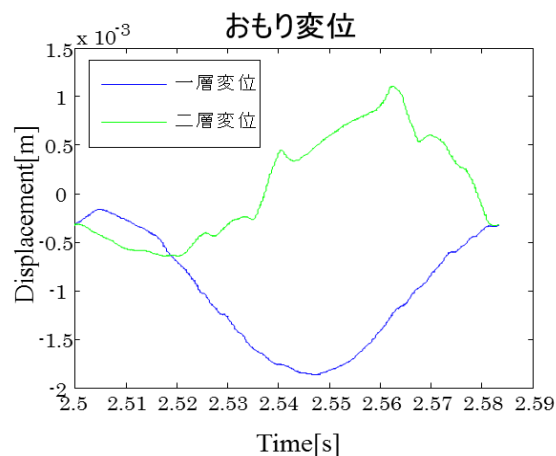


図 6.25 : 変位波形

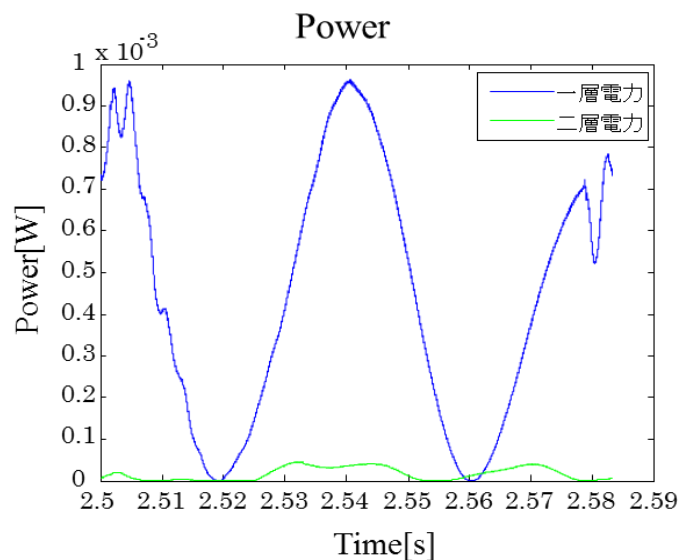


図 6.26 : 電力波形

図 6.27, 6.28, 6.29 に一質点デバイスに対する強制加振試験の結果を示した。先ほどの衝撃荷重試験と比べ波形に高次モードが確認できない。ピエゾ素子一枚当たりの出力が明らかに強制加振の時の方が大きい傾向にあるため、前頁における衝撃強制加振はあまり得策ではない。しかし、強制加振の際より、変位量がでていないため素子安全性という観点では利がある可能性がある。次頁では定量的にそれぞれのパラメータの比較を行う。

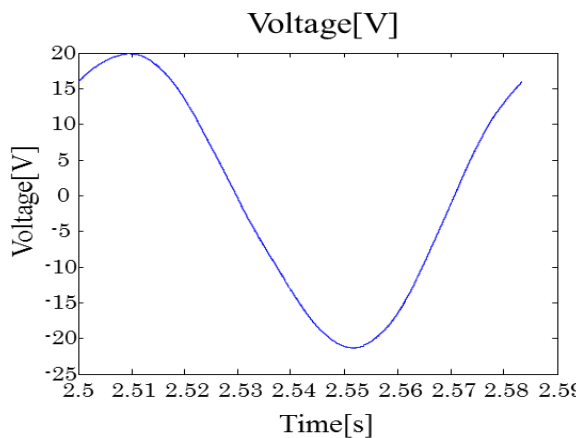


図 6.27 : 強制加振電圧波形

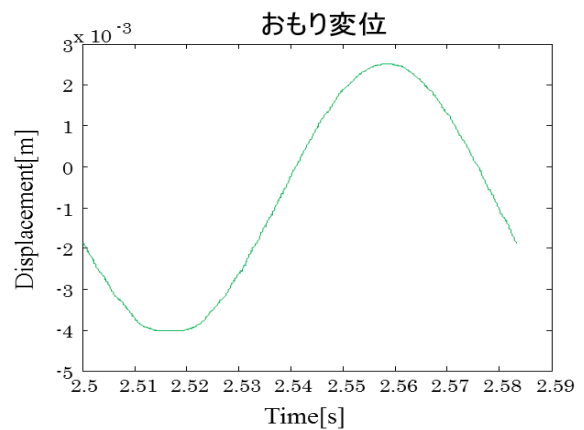


図 6.28 : 強制加振変位波形

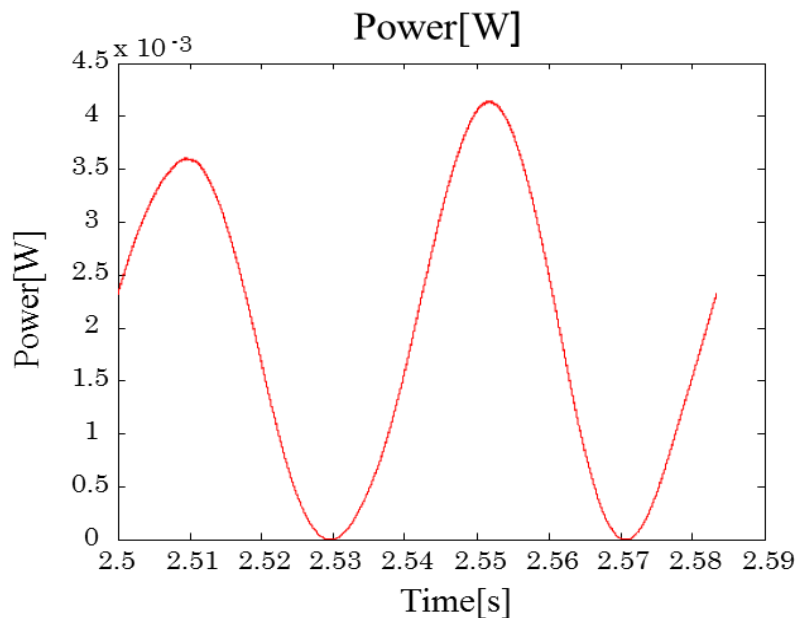


図 6.29 : 強制加振電力波形

強制加振試験と衝撃荷重それぞれのパラメータを以下の表にまとめた。以下の表 6.12 より、まずそれぞれのベース加速度が異なることがわかる。加振器に印加した電圧は同一であるが、デバイスの重量や共振周波数の影響によってベース加速度が異なっている。強制加振試験の場合、衝撃強制加振試験の 4.5 倍の加速度である。ベース加速度がことなるため、他の出力パラメータが異なっている。よってそれぞれのパラメータを 1/4.5 して比較することとする。強制加振試験の表内に括弧書きしている数値はそれぞれの 1/4.5 した数値である。

それぞれの結果を比較すると、電圧のみ衝撃強制加振試験が大きく、それ以外は全て強制加振試験の出力が大きいことがわかる。これは前項に示した試験のように大きな衝撃を入力できていないことが示唆される。さらに、二階層構造をとっているために運動エネルギーが二層へ分散され、強制加振よりも効率よく振動できていないことが想定される。上述の変位波形を比較してみても強制加振試験の場合、最大変位 4.0mm 程度に対し、衝撃強制加振試験では 1.5mm と 1.0mm であり、足し合わせても 2.5mm 程度という結果となった。

上述より、衝撃荷重の入力方法が悪く、衝撃荷重自体も弱いのではないかと考える。よって衝撃荷重合成のためには何らかの効果的な入力方法を提案する必要があり、今後の課題とした。効果的な衝撃荷重入力方法が確立できない今、一質点デバイスを単一の共振周波数を用いて強制加振することが最大出力をえる方法である。

よって次頁では最後に現状本稿内で研究してきた最大出力条件を用いて身近な振動源かつ影響力の大きい振動源である自動車振動を用い、応用例として通信機器を稼働できるか実用化検討を行う。

表 6.12 : 出力パラメータの定量比較

		強制加振試験	衝撃強制加振試験
	ベース加速度[G]	0.9 (0.2)	0.2
一層	電圧[Vp-p]	51.7 (11.5)	20.7
	電流[mAp-p]	0.94 (0.21)	0.19
	最大電力[mW]	14.1 (3.1)	0.97
	出力エネルギー[μJ]	558 (124)	61.1
二層	電圧[Vp-p]	/	4.4
	電流[mAp-p]		0.04
	最大電力[mW]		0.05
	出力エネルギー[μJ]		0.68

## 6.4 自動車振動を用いた実用化検討

本項では一質点デバイスに対し、身近な応用例であり、世界中に広く普及しているため実用化できた際に影響力の大きい振動源である自動車振動を用いて、市販の通信デバイスを稼働できるか実用化検討する。

表 6.13 には使用したデバイスの試験条件と実際に使用した市販の通信機器のスペックを示した。本来はなるべく先端に付加する錘を軽くしたかったが、車種 HONDA オデッセイの持つ共振周波数とピエゾ素子の共振を合わせるために非常に重い錘を付加した。

図 6.30, 6.31 にそれぞれの入力振動に対する出力電圧と電力波形を記載した。それぞれの振動をどのように作成したかに関しては共同実験者である高橋の「多軸ステージによる自動車振動の高精度再現手法に関する研究」<sup>[10]</sup>を参照されたい。以下の波形より定常的に発電得るのは難しく、時折、瞬間的に大電力が得られていることが確認できる。最大電力は 5.3mW, 総エネルギーは 13.6mJ, 平均電圧 2.8V, 平均電力 0.13mW であった。

表 6.13 : 試験条件

	試験条件		通信機器スペック
PZT	台形形状厚さ 0.3mm	型番	MB39C811-EVBSK-01
錘	130g	用途	温度センサー情報の送信
負荷抵抗値	150kΩ	通信内容	無線送信
共振周波数	13Hz	容量	1mF コンデンサ使用
サンプリング周波数	500μs	外部電源	振動発電又は太陽光発電
試験時間	120s		

### ワインディングロード鉛直方向加振

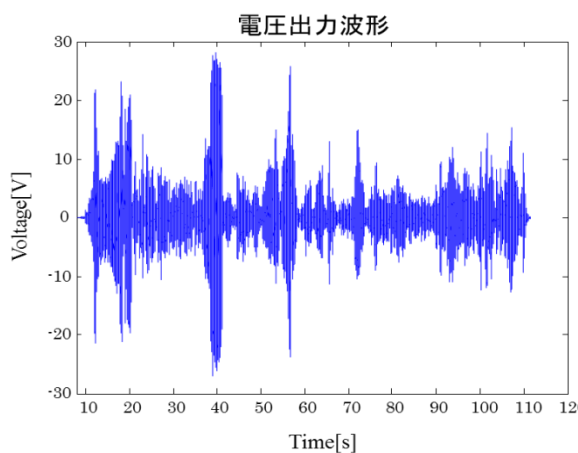


図 6.30 : 電圧出力波形

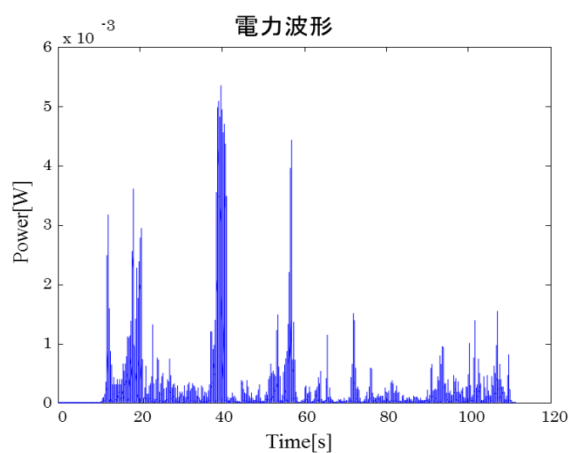


図 6.31 : 電力波形



図 6.32, 6.33 にワインディングロードを走行した際の鉛直方向の振動と前後方向の振動を同時に印加した際の電圧電力波形を示した。前述の波形は鉛直方向のみであることに注意されたい。波形として最大値はあまり変化していないが、先ほどより定常的に大きな電圧が得られていることが確認できる。最大電力は 4.0mW, 総エネルギーは 13.7mJ, 平均電圧 3.3V, 平均電力 0.13mW であった。

図 6.34, 6.35, 6.36 に 0.5G で強制加振した際の実出力電圧とキャパシタ電圧を示した。キャパシタ電圧は通信機器の回路から取得計測しており、電波通信にどれほどのエネルギーを消費したか検証するために測定している。強制加振による出力電圧は通信機器の回路による影響で徐々に電圧が上昇するような波形になっている。初期送信までに必要なエネルギーは 3.9mJ, 一度温度情報を通信するのに必要なエネルギーが 0.42μJ であった。加えて、平均電圧 4.1V, 平均電力 61.2μW, 総エネルギー18.4mJ であった。

### ワインディングロード鉛直+前後方向加振

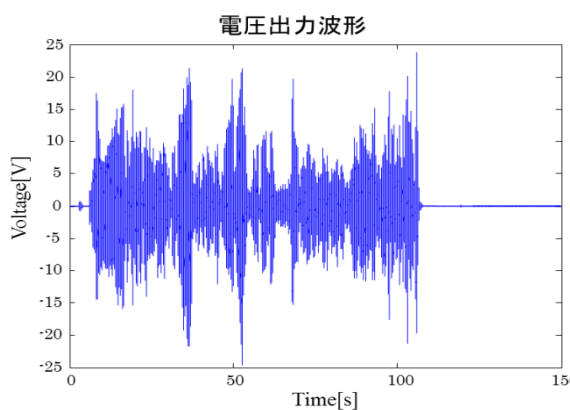


図 6.32 : 電圧出力波形

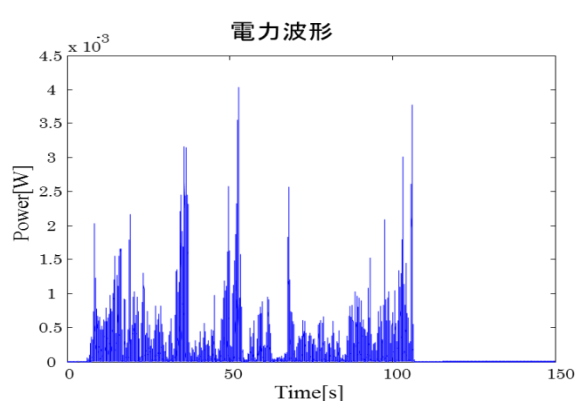


図 6.33 : 電力波形

### Sin 波 13Hz0.5G 強制加振

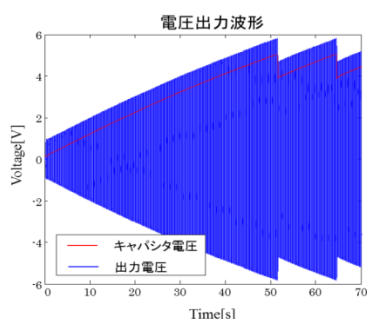


図 6.34 : 電圧出力波形

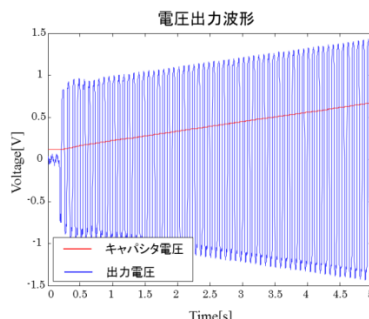


図 6.35 : 電圧波形(拡大)

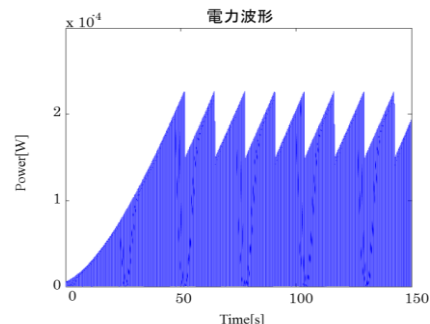


図 6.36 : 電力波形

図 6.37, 6.38 にワインディングロードを走行した時の鉛直方向振動による強制加振の出力電圧とキャパシタ電圧を示した。前述同様、強制加振による出力電圧は回路による影響で徐々に電圧が上昇するような波形になっている。最大電力は  $40.3\mu\text{W}$ 、平均電力  $9.2\mu\text{W}$ 、総エネルギー  $1.0\text{mJ}$ 、平均電圧  $1.0\text{V}$  であった。ワインディングロード鉛直方向のみの振動だけでは通信するために必要なエネルギーを蓄えることができず、通信は行われなかった。120s 間加振し続けても温度情報を送信できなかったため、このままでは実用化できない。出力エネルギーが不足している結果となってしまった。

図 6.39, 6.40 にワインディングロードを走行した時の鉛直方向と前後方向の振動による強制加振の出力電圧とキャパシタ電圧を示した。最大電力は  $0.23\text{mW}$ 、平均電力  $56.7\mu\text{W}$ 、総エネルギー  $6.2\text{mJ}$ 、平均電圧  $2.5\text{V}$  であった。鉛直前後振動では 60s で温度情報を送信することができた。

#### ワインディングロード鉛直方向加振 評価ボード付き

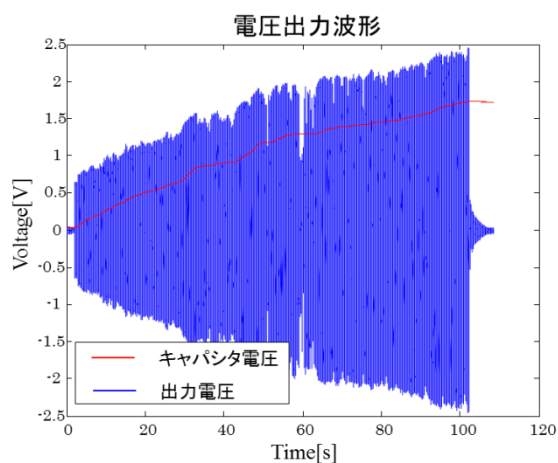


図 6.37 : 電圧出力波形

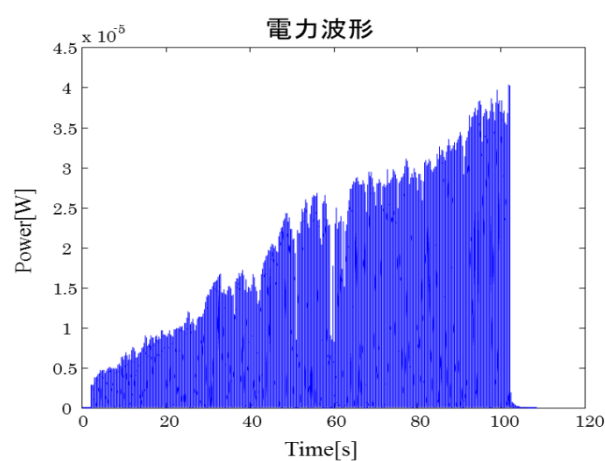


図 6.38 : 電力波形

#### ワインディングロード鉛直+前後方向加振 評価ボード付き

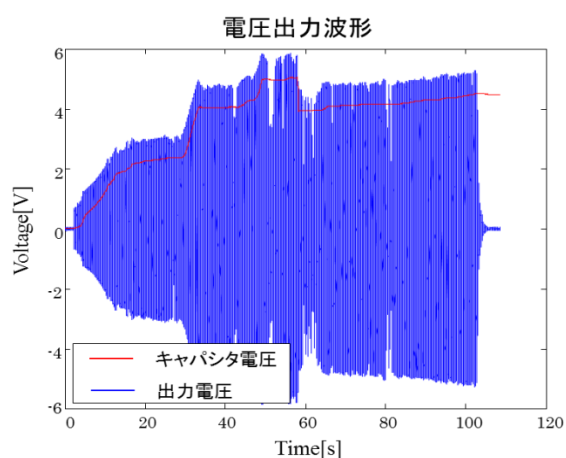


図 6.39 : 電圧出力波形

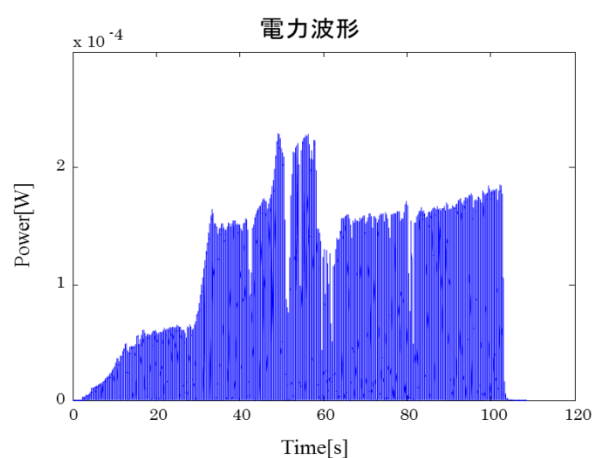


図 6.40 : 電力波形

本節では本稿で検証してきたデバイスを用い、市販の通信機器を稼働させることができるか検証下。鉛直方向振動のみでは稼働させることができなかつたが、鉛直前後振動では稼働させることができた。以上より、条件を選定ことによって振動発電システム実用化可能であることを示唆した。

本章 2 節 3 節において衝撃荷重合成を試みたが、稼働電力を発電できない場合もあった。しかし、2 節において入力条件、方法によっては高出力化できることも確認した。よって、今後衝撃荷重の入力方法を確立することによって確実に振動発電システムを実用化できるであろう。

上述の共同実験者<sup>[10]</sup>高橋の「多軸ステージによる自動車振動の高精度再現手法に関する研究」においては他種の走行路の振動再現も行っており、本稿に掲載したワインディングロードだけではなく、舗装路、砂利道に対しそれぞれ三軸の振動再現を行っている。

上記砂利道振動を利用し、振動発電を行えば高加速度成分を多く含むと考えられ、さらに高出力化を期待できるが、砂利道における振動発電は根本的な出力改善ではないため、今回本稿において扱っていない。しかし、欧州などでは石畳の走行路も含まれており、走行路によっては既に十分な発電量が得られる可能性もある。

## 第7章 まとめ

本稿において、多くの試験結果より得られた知見を箇条書きで要約すると以下の通りである。

- ・ piezo素子は変位に比例した電圧を出力することを確認した。(2章2節, 2章4節より)
- ・ piezo素子は負荷抵抗値に依存した電圧を出力することを確認した。(2章3節, 2章5節より)
- ・ FEM解析と理論式より, 台形形状は面全域に応力を分散し, 応力集中を防ぎ, 高効率であることを確認した。(2章6節, 2章7節, 3章5節より)
- ・ FEM解析と理論式より, 長方形形状は固定端で応力集中を生じ, 形状の中で最も軽い荷重で高出力を出力する形状であることを確認した。(2章6節, 2章7節, 3章5節より)
- ・ 同じ材料を用いたpiezo素子に対し, 効率試験を行い, それぞれの効率を導出した。並びに効率の大小関係は理論式と一致することを確認した。(3章4節より)
- ・ 先端に付加する錘の荷重によっては応力集中と出力飽和を生じ, 効率が悪くなる現象を確認した。(3章5節より)
- ・ 先端に錘を固定付加することにより, 高出力化可能であり, 錘の重量によって整合抵抗値が変化することを確認した。(4章1節より)
- ・ システム同定試験より, 錘の重心位置により共振周波数が変化することで出力が変化することを確認した。しかし, **Primary** モードに **Gain** の差はなく **Secondary** モードの **Gain** に差が出ることを確認した。多モードを利用する場合, 積極的に重心位置をずらして利用すべきであることも確認した。(4章2節より)
- ・ 衝撃荷重試験より, ベース加速度に比例して出力電圧が大きくなることを確認した。(5章2節より)
- ・ 衝撃荷重試験より, 衝撃荷重を加えた際には素子の固有周波数で振動するため, 抵抗値依存が生じ, 理論式で整合抵抗値を導出できることを確認した。(5章3節より)
- ・ 衝撃荷重試験より, piezo素子の入力箇所により出力波形と最大電力や出力エネルギーが変化し, 固定端で電力最大, 先端で出力エネルギー最大となることを確認した。(5章4節より)
- ・ 曲げ荷重と衝撃荷重を合成する強制加振試験を行い, 二層の出力がきわめて少ないことを確認した。衝撃のエネルギーが少ないためと考える。(6章1節より)
- ・ 一質点piezo素子を用いて, 自動車加振試験を行い, 通信機器の稼働によってデータ送信を確認した。これによって振動発電システム実用化可能であることを確認した。(6章3節より)

これらの結果より, 実用化可能であることが示唆される。しかし, 条件によっては稼働させるための電力を確保できないために, あと少し高出力化することで実用化確実と考える。

今後における実用化のためには以下の課題があると考えられ、大きく分けて高出力化と安全性が検討課題となる。具体的には以下に箇条書きとした。

- ・最適形状の素子の開発
- ・重心位置による出力特性の理論式による裏付け
- ・衝撃荷重による出力特性の理論式による裏付け
- ・高効率多モードデバイスの開発
- ・単一モードデバイスの開発
- ・高出力化に向けて衝撃力の定義と衝撃荷重入力方法の決定
- ・荷重付加領域と動作領域の決定
- ・後段回路の設計
- ・繰り返し荷重から素子の破壊を防ぐ構造の決定
- ・ターゲット選定

## 平成 26 年度 修士公聴会 質疑応答

石川先生

**Q. 太陽光発電の単位は  $\text{mW}/\text{cm}^3$  と表記があったが、表記の意図は？**

A. 太陽光の照射を受け、発電に寄与する単位は面積であるが、実際に太陽光発電には占有する体積があるため、本稿においては体積で表記した。本稿では一例として市販製品の値を引用し、値を導出している。

**Q. 整合抵抗に関する発表があったが、実際の回生ターゲットである通信デバイスは既に抵抗値が決まっている。そのうえで抵抗値を負荷して試験を行う意味は何か？**

A. 整合抵抗を導出することで最高出力を確認できると共に最低限必要なエネルギーが導出可能であるため。加えて、現在当研究室内で並行して MPPT 制御に関する研究を進めており、別途応用検討中である。

**Q. ばね定数が高いほうが良い素子であるという理由は？**

A. (10)式の入力エネルギー： $\frac{1}{2}kx^2$ より、入力変位が同一の場合、ばね定数  $k$  によって入力エネルギーが決まる。よって  $k$  が大きいく、効率が高い素子ほど出力エネルギーが大きいと推察される。本稿より効率は素子形状によって数%であることが確認できている。以上より、入力エネルギーを多く蓄積できる素子の出力が大きくなる。

**Q. ばね定数が高いほうが良い素子であるならば曲げられないほど大きいほうがいいのか？**

A. はじき試験において、ばね定数は高い方がいいと記述したが、上述の理論式より変位量の方が入力エネルギーへの寄与が大きいため、変位量を大きくとれる構造の方が望ましい。

**Q. 素子の耐久性は？**

A. PZT は本稿で記述したように脆性材料のため、応力に比例して歪を生じ、突然破断する素子である。よって今後の検討課題としてどのような荷重の範囲で動作させるかという動作領域の決定やどれくらいの荷重まで耐えられるのか、どれくらいの回数荷重を繰り返しかけられるのかという指標を明確に決める必要がある。

高橋先生

**Q. 衝撃試験を繰り返すと劣化してしまうのではないかと？**

A. 衝撃荷重は応力を大きく部材に与える一方で素子に大きな負荷を与えやすい荷重である。よってデバイスをそのまま使用そのままでは使用できない。衝撃荷重のような大きな荷重を印加する際には薄い金属板を添えるなどしてピエゾ素子を保護する必要がある。

## 参考文献

- [1]. 日本学術会議 電気電子工学委員会:「21 世紀における電気電子工学とのあり方と果たすべき役割」
- [2]. 日本学術会議 電気電子工学委員会:「電気電子工学分野の展望—変革期の電気電子工学, 今後の展開に向けて—」
- [3]. NE アカデミー:「1400 兆円市場の行方を左右するエネルギー “収穫” 技術」 日経エレクトロニクス
- [4]. 速水 浩平:「振動力発電のすべて」, 日本実業出版社, (2008)
- [5]. 速水 浩平:「振動発電の応用技術～ 「発電床」 の原理と商品化事例～」, 応用物理, Vol.79,No.9,pp846-847(2010)
- [6]. 富士セラミックス:「圧電セラミック テクニカル・ハンドブック」
- [7]. 学献社:「圧電セラミックスの応用」 ニューケラスシリーズ編集委員会
- [8]. 池田 拓郎:「圧電材料学の基礎」 オーム社
- [9]. 永井伸幸:「自動車振動に対する多モード振動発電デバイスの開発」
- [10]. 熊谷俊司「自動車振動向け発電デバイスの開発」, 電気研究発表会資料, p225-226
- [11]. 須藤健二:「自動車振動を目的として PZT デバイスの基礎特性評価」, 電気研究発表会資料, p227-228
- [12]. モノづくりスペシャリストのための情報ポータル:  
「<http://monoist.atmarkit.co.jp/mn/articles/0806/30/news113.html>」
- [13]. 「第 32 話 カスチリアノの定理を知っていますか」:  
<http://myhagisan.la.coccan.jp/zairiki/yomoyama/yomoyama3/yomoNo32.pdf>
- [14]. 中嶋 洋:「材料力学 京都大学農学部地域環境工学科 Ver.2.0」:  
<http://ocw.kyoto-u.ac.jp/ja/faculty-of-agriculture-jp/5937000/pdf/lecture.pdf>
- [15]. 高橋 良宗:「多軸ステージによる自動車振動の高精度再現手法に関する研究」  
群馬大学大学院 修士論文
- [16]. 山本 敦:「環境発電技術としての熱電変換 現状と展望」, 電子情報通信学会誌,Vol.93,No.11 pp.969-973(2010)
- [17]. 篠原 真毅:「バッテリーレス社会に向けたエネルギーハーベスティング技術」, 電子情報通信学会誌,Vol.92,No.8,pp695-699(2009)
- [18]. 堀口 睦弘:「エネルギーハーベスティング 圧電振動発電技術の紹介 〈ワイヤレスセンサノードのバッテリーレス化に向けて〉」, 計測技術,Vol.39,No.6,pp.35-38(2011)
- [19]. 樋口 龍雄:「自動制御理論」 森北出版株式会社
- [20]. 涌井 伸二・橋本 誠司・高梨 宏之・中村 幸紀:「現場で役立つ制御工学の基本」 コロナ社

- [21]. 井口 浩志 : 「ボデー,シート系の乗り心地への寄与解析」,
- [22]. 北崎 智之 : 「自動車の振動評価 (乗り心地を含めた振動評価)」, 日本音響学会誌, Vol.53, No.1 pp.39 - 43(1997)
- [23]. 辻 義之, 田中 宏彦, 大野 哲 靖 : 「相関とスペクトル解析」, J. Plasma Fusion Res. Vol.85, No.9 (2009)620-630
- [24]. Katsuhide TANOSHIMA, Tamoo ARAKI, and Mitsuyoshi TSUKADA Oki Electric Industry Co.,Ltd 550-5 Higashiasakawa-cho, Hachioji-shi,Tokyo 193,Japan: 「A STUDY ON THE DYNAMIC BEHAVIOR OF THE PIEZOELECTRIC-DRIVING ACTUATORS」,international Symposium on Design and Synthesis July 11-13,1984 TOKYO
- [25]. 足立 修一: 「MATLAB による制御のためのシステム同定」, 電気大出版社(2007)
- [26]. 足立 修一: 「MATLAB による制御のための上級システム同定」, 電気大出版社(2004)
- [27]. 野波 健蔵, 西村 秀和, 平田 光男: 「MATLAB による制御系設計」, 東京電機大学出版局(1998)
- [28]. 小林 一行: 「最新MATLAB ハンドブック」, 秀和システム(2005)
- [29]. 須藤 健二 : 「自動車振動を目的として PZT デバイスの基礎特性評価」, 電気研究発表会資料,p227-228
- [30]. Seiji Hashimoto, Nobuyuki Nagai, Yoshimitsu Fujikura, Jyunpei Takahashi, Shunji Kumagai, Makoto Kasai, Kenji Suto, Hiroaki Okada 「A Multi-Mode Vibration-Based Power Generator for Vehicles」 Seiji Hashimoto et al., 2012, Applied Mechanics and Materials, 251, p124
- [31]. Shunji Kumagai, Kenji Suto, Hiroaki Okada, Makoto Kasai, Seiji Hashimoto, Nobuyuki Nagai, Yoshimitsu Fujikura, Junpei Takahashi 「Multi-Axis Vibration Power Generation Device for Automobiles」 Shunji Kumagai et al., 2012, Applied Mechanics and Materials, 251, p119-123
- [32]. Huan Xue,Yuantai Hu,Qing-Ming Wang : 「Broadband Piezoelectric Energy Harvesting Devices Using Multiple Bimorphs with Different Operating Frequencies」 IEEE Trans Ultrason Ferroelectr Freq Control. 2008 Sep;55(9):p2104-8.
- [33]. 安達 和彦, 坂本達哉 : 「圧電コンポジットを用いた振動発電装置のエネルギー変換効率に関する研究」 日本機械学会論文集 (C 編) 78 巻 789 号 (2012-5)



## 発表論文

- (1) 淡路 創介：「振動発電用圧電デバイスの発電特性とその効率」  
平成 25 年 3 月 第 3 回電気学会群馬・栃木合同研究発表会
- (2) 淡路 創介：「振動発電用圧電デバイスの発電特性とインピーダンス整合について」  
平成 25 年 8 月 電気学会全国大会産業応用部門
- (3) 淡路 創介：「振動発電用デバイスに対する荷重条件と高出力化の検討」  
平成 26 年 3 月 第 4 回電気学会群馬・栃木合同研究発表会
- (4) 淡路 創介：「Shape Effect of Piezoelectric Energy Harvester on Vibration Power Generation」  
平成 26 年 9 月 Power Engineering and Automation Conference (PEAM2014)

## 謝辞

最後に本論文をまとめるにあたり、多くの方々にお世話になったことをこの場を借りて感謝いたします。

まず本研究を進めるにあたり、多大なるご指導・ご鞭撻を頂きました橋本誠司准教授には甚謝の意を表します。

共同研究並びに研究指導して頂きました株式会社ミツバの須藤様を初めとする熊谷様, 笠井様, 岡田様, 奥野様, 本間様, 小林様並びに関係各位の皆様がこの場を借りて、衷心より感謝すると共に、今後、ますますのご活躍をお祈りいたします。

また本研究において多くの有益な御助言を頂いた橋本研究室のみなさん、特に既卒である高橋氏、藤倉氏、研究補助も務めてくださった坂本氏、上野氏に深く感謝いたします。

本稿において本研究分野の進展を願って非常に簡素で具体的な文章になるように気をつけた。エネルギーハーベスティングテクノロジーが広く実用化されることを切に願う。