



圧電素子を用いた振動発電手法に関する研究

藤本 滋*

Study on Method of vibration Power Generation using Piezoelectric Element

Shigeru FUJIMOTO*

1. 緒言

近年、携帯型の電子機器の普及や環境技術への関心の高まりから、従来は活用されて来なかった構造物や人間の動きに伴う振動を活用した自家発電式の発電手法の開発に注目が集まっている。とりわけ、家屋・建物や橋梁などの構造物や振動する機械設備においては、その振動状態をモニタリングすることで寿命診断や故障診断などが可能となることから、モニター用センサやその電源としての有用性が注目されてきた^{(1)~(4)}。また、腕時計においては人体の動きを利用して1 μW 程度の発電を行うものが開発されている⁽⁵⁾。一方、マイクロデバイスにおいても、振動発電の研究が進んでおり、圧電体を用いた方式とエレクトレットを用いた方式による開発が報告されている^{(6)~(7)}。このうち、発電効率の高い圧電素子を用いた振動発電については、簡素な構成により力学エネルギーを直接に電気エネルギーに変換できるという利点があるが、その出力電力が μW レベルであることから、その出力特性の向上が課題となっている。また、チタン酸ジルコン酸鉛(PZT)等の圧電素子の圧電効果については、組成や添加物、素子作製プロセスに依存することが知られているが^{(8)~(10)}、発電素子としての活用の際には、周辺回路とのインピーダンス整合を取ることも必要となることが知られている⁽¹¹⁾。圧電素子を用いた応用として、人間の歩行時に床に作用する踏み込み力を用いた床発電⁽¹²⁾、硬球の衝撃力を用いた発電機⁽¹³⁾、ドアアラーム⁽¹⁴⁾などがこれまでに報告されている。

これらの圧電素子を用いた発電に関する従来報告においては、以下のような課題がある。

a) 圧電素子は組成や添加剤により圧電効果が変化する

ことは知られているが⁽⁸⁾、圧電効果と動荷重および加振振動数による発電特性は詳細には明らかにされていない。

b) これまでのエレクトレットなどの荷電体や圧電素子では、発生電力が小さく各種マイクロデバイスを駆動するには十分でないため、適用範囲が狭い。

c) 適用する全体回路の検討はなされているものの、圧電素子に作用する動荷重に対する発電特性の定式化が行われていない。

d) 上記の理論的な定式と実験的な結果との比較による検証が行われていない。

上記 a) について著者らが、PZT 素子に高い圧電効果を与えることができるニオブ Nb を添加剤として加えた圧電素子⁽⁸⁾を用いた振動発電実験を行い、ニオブ Nb の添加濃度、動荷重および振動数が圧電素子の発電出力(電圧、電力)に及ぼす影響を明らかにした⁽¹⁵⁾。

本研究では、上記 b) について発電特性をさらに向上させるためにニオブ Nb を最適添加濃度 1.0 mol% を添加した圧電素子^{(8),(15)}を積層した積層圧電素子を用いて、以下のことを目的とした検討を行った。

(1) 動荷重が作用した際の振動条件と積層圧電素子の発電出力(電圧、電力)との関係を明らかにする。

(2) 圧電素子の積層数が発電出力(電圧、電力)に及ぼす効果の定量的な評価を行う。

これにより、実験的な観点から、従来の発電素子にはなかった最適な材料組成と積層構造を組み合わせた積層圧電素子の動荷重に対する電気出力に関する基本的特性を確認するとともに、それらの発電特性向上に資する要因を明らかにする。

2. 積層 PZT 素子の製作および電気的特性

本研究では、PZT 素子に高い圧電効果を与えることができるニオブ Nb を添加剤として最適濃度である 1.0

*教授 機械工学科

Professor, Dept. of Mechanical Engineering

mol %加えた圧電素子^{(8), (9)}を用いてさらなる発電特性向上を図るため、これらを積層化した積層 PZT 素子の試作を行った。本研究では、積層数が 3, 5, 7 層の積層 PZT 素子を試作した。図 1 に単層 PZT 素子および積層 PZT 素子(3, 5, 7 層)の外観と構造を示す。



図 1 積層 PZT 素子の外観

試作した PZT 素子はジルコニウム Zr とチタン Ti の割合を 52 : 48 とし⁽⁸⁾、これにニオブ Nb が 1.0 mol% 添加された⁽¹⁵⁾。文献(15)においては、PZT 素子の電気的特性を改善するために、有力と思われるいくつかの添加剤のうち最も優れた Nb が選ばれた。さらに、Nb 添加濃度を 0 mol% から 5.0 mol% までの PZT 素子 8 種類を製作し、それぞれの振動発電特性が調べられた。その結果、PZT 素子は、Nb 添加濃度が 1.0 mol% の場合に最も優れた振動発電特性が得られることが確認されている。

試作した積層 PZT 素子を構成する各 PZT 素子の全ては直径 16 mm、厚さ 2.5 mm の円盤形である。また、各 PZT 素子の両面の電極面に銀ベースの導電性ペーストを塗布し焼成して電極とした。分極は 200 °C のオイルバス中で 2 kV/mm となるように電圧の印加を行って、エージングが行われた⁽¹⁵⁾。

図 2 に 7 層 PZT 素子の詳細な構造を示す。積層 PZT 素子は各 PZT 素子が向かい合う面が同極となるように積み重ねられる。積層 PZT 素子の各層の PZT 素子の間には直径 16 mm、厚さ 0.2 mm の銅板の電極が挿入され、素子の両端には直径 16 mm、厚さ 2 mm の黄銅電極板がそれぞれ導電性接着剤によって貼り付けられている。

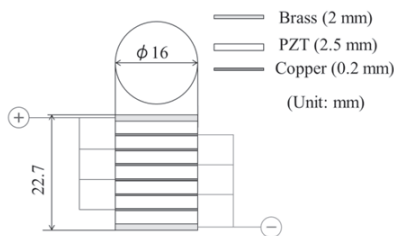


図 2 積層 PZT 素子 (7 層) の構造

同じ極の電極同士はリード線により結線され、+ 極、- 極に分けられている。なお、これら積層 PZT 素子は絶縁のため側面には厚さ約 1 mm のビニールチューブで覆われている。このような電極構造により、各 PZT 素子は

電氣的に並列となる。積層 PZT 素子に軸方向に動荷重が作用すると、各層の PZT 素子はこの動荷重に応じた電荷を放出するので、積層 PZT 素子は、単層 PZT 素子の積層数倍の電荷を放出することのできる効率の良い発電素子である。

このように製作された単層 PZT 素子および積層 PZT 素子(3, 5, 7 層)の圧電定数 d_{33} および静電容量 C の電気的物性が計測された。単層および各積層 PZT 素子の主な電気的物性を表 1 に示す。各物性において、圧電定数 d_{33} は d33 メータ (IACAS 製 MODEL ZJ-6B)、静電容量 C は LRC メータ (網エヌエフ回路設計ブロック製 ZM2353) によって測定された。なお、表 1 の中の 3, 5, 7 層 PZT 素子の d_{33} は上記 d33 メータで測定された結果を参考値として示したものである。

表 1 積層 PZT 素子の電気的特性

Layer number	Piezoelectric constance d_{33} (pC/N)	Capacitance C (pF)
1	320	1053
3	(952)	2843
5	(1582)	4790
7	(2170)	6726

表 1 に示される結果より、積層 PZT 素子の振動発電特性に影響を及ぼす電気的特性である圧電定数 d_{33} および静電容量 C は、単層 PZT 素子のほぼ積層数倍となっていることが確認された。これは、積層 PZT 素子の各層の PZT 素子が並列接続されているために各素子に発生した電荷が全て寄せ集められているためと考えられる。

以上のように PZT 素子を電氣的に並列に積層することにより、その電気的特性を積層倍できることが確認された。

3. 振動発電実験装置および実験方法

製作された単層 PZT 素子および積層 PZT 素子(3, 5, 7 層)の動荷重に対する発電特性を把握するための振動発電実験が行われた。図 3 に振動発電実験に用いた振動発電実験装置の構造を示す。振動発電装置は、振動台、振動台の動荷重を伝達する加力治具および各圧電素子を固定する圧電素子固定装置からなる。振動台の動荷重は加力治具とゴムブロックを介して横置きされた圧電素子に伝達される。圧電素子固定装置においては、左側に設置された初期圧縮調整治具により加えられた圧縮荷重がゴムブロックを介してゴムアダプタに挟まれた圧電素子に静的な初期圧縮荷重として与えられ、保持される。静的な荷重である初期荷重を与えるのは、振動発電実験時に圧電素子に作用する荷重を常に圧縮荷重状態に保つことである。なお、この初期圧縮荷重は静的荷重であるため

PZT 素子の動荷重による発電には寄与しない。ここで用いた積層 PZT 素子に荷重を与える鋼材(SS400)のアダプタは電極面の径よりも大きく、十分密着しているため、積層 PZT 素子の各 PZT 素子には均等に動荷重が与えられる。また、PZT 素子に作用する初期圧縮荷重および動荷重は PZT 素子の右側に設置された荷重計(共和電業製 LUK-A-5kNSA1)によって計測された。

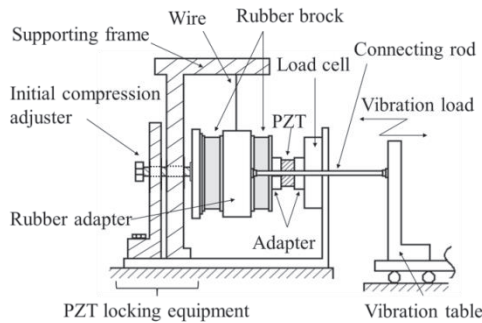


図3 振動発電実験装置

振動台から動荷重を受けることで圧電素子に発生した電圧は、デジタル電圧計(NEC 製 Omnicore RA2300)によって計測、記録された。このような積層 PZT 素子と電圧計との関係、計測される電圧は図4のような抵抗とコンデンサからなる回路図で示される。なお、図中の $q(t)$ および $V_p(t)$ は、PZT 素子から発生する電荷および電圧を示す。ここでは、電圧 $V_p(t)$ は、発生する電圧により生ずる電界の影響は小さく、主に動荷重印加の影響により PZT 素子が電圧を発生する電源と見なし計測を行う。また、 C_p 、 R_l 、 $V_l(t)$ は PZT 素子の静電容量、電圧計の抵抗および計測電圧を示す。電圧計の抵抗 R_l の実測値は 1.012 M Ω である。これら計測されたデータはデジタルデータとして集録される。

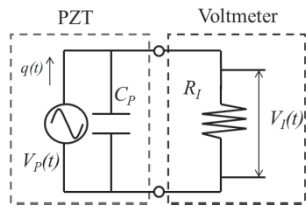


図4 積層 PZT 素子と電圧計の等価回路

また、発生電力については、単位時間当たりのエネルギー量であり電圧計の計測電圧 $V_l(t)$ と実測抵抗 R_l より以下の式を用いて数値的に求められた⁽¹⁵⁾。

$$W = \int_{t_0}^{t_0+1} \{V_l(t)^2 / R_l\} dt \quad (1)$$

なお、式(1)の t_0 は計測電圧 $V_l(t) = 0$ V となる時刻とし

た。このような装置を用いて圧電素子に作用する初期圧縮荷重として 1.0 kN を保持したまま振動台を作動させて、各 PZT 素子に正弦波動荷重を与えた。

振動発電実験においては、次のような実験条件のもとで実験が行われた。初期圧縮荷重 1.0 kN は、各 PZT 素子の軸方向の断面において 4.97 MPa の圧縮応力に相当する。この初期圧縮荷重の目的は、各 PZT 素子が常時圧縮荷重状態を保ち、安定した変動圧縮荷重を受けられるようにすることである。各 PZT 素子の発電出力(電圧、電力)に及ぼす影響を把握するため、正弦波加振条件は、

- (1) 加振振動数は 5, 10, 15, 20, 25, 30 Hz の 6 ケース
- (2) 動荷重は 50, 100, 150, 200, 250, 300, 350, 400 N の 8 ケース

の組み合わせである合計 48 ケースとした。

これらの加振条件は、産業施設において振動源となっているエアコンプレッサー、ディーゼル・ガソリンエンジン、ポンプなどが稼働した際に支持脚を介して床に伝わる動荷重や人間が床や階段などを通行する際に床に伝わる動荷重を参考にして決定した。なお、動荷重は次のような条件を考慮して設定された。文献(16)によると PZT 素子に数百回程度の繰り返し圧縮応力を与えると 50 MPa 前後で電気的物性の劣化が生じ始める。このため、本実験では、長期動荷重に対して電気的物性に劣化が生じないよう PZT 素子に作用する最大圧縮応力が 10 MPa を下回るように安全側の動荷重を設定した。最大動荷重ケースである 400 N においては、PZT 素子断面に作用する動的な最大圧縮応力は 2.0 MPa 程度である。初期圧縮応力を加えると最大圧縮応力は約 7.0 MPa となるが、十分安全側の応力である。なお、PZT 素子の縦弾性係数は 30 GPa 程度であるため、10 MPa の応力が作用しても PZT 素子 1 枚に対するひずみは 3.3×10^{-4} 、変位は 8.3×10^{-7} m と非常に小さいため、変形量の影響は無視できる。ただし、積層 PZT 素子については電極と各 PZT 素子を導電性接着剤で張り付けた構造であるため、作用する初期圧縮応力や動的な応力が積層構造に及ぼす影響は不明であるが、この実験条件で実験を行い、振動発電特性を把握することとする。

以上の実験条件のもとで振動発電実験が行われ、各 PZT 素子に作用する動荷重および PZT 素子から発生する電圧が時刻歴データとして計測された。

4. 実験結果

振動発電実験結果の例として、1, 3, 7 層 PZT 素子の動荷重振幅 400 N、加振振動数 30 Hz の場合における積層 PZT 素子に作用する動荷重振幅および発生電圧の時

刻歴を図5~7示す。本実験では、目標の動荷重を振動台の振動出力を手動により調整している。このため、ここで示されている動荷重は荷重計の実測値である。これらの図に示されるように、動荷重が正弦波であると7層PZT素子の出力電圧も正弦波となる。なお、図5~7においては、実際の測定波形には電気ノイズなどが含まれているためバンドパスフィルターによってフィルタリング処理が行われ、動荷重および発生電圧の加振振動数の ± 5 Hzの範囲の成分が取り出されている。この周波数範囲では加振振動数成分が卓越しており、ほぼ正弦波状の波形である。各PZT素子には、初期圧縮荷重1.0 kNが静荷重として作用しているが、静的荷重であり振動発電に寄与しないため、荷重時刻歴には含まれていない。

図5~7における、動荷重時刻歴と発生電圧時刻歴には約90°の位相差がある。これは、積層PZT素子からの発生電圧が荷重の時間的変化(荷重速度)に比例して発生するためであると考えられる¹⁵⁾。この結果は、PZT素子の発生電圧は荷重の時間変化とほぼ同位相の関係にあることを示している。

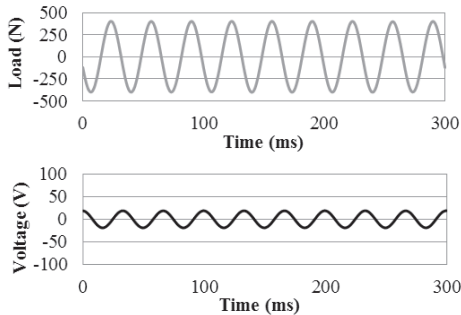


図5 単層PZT素子に作用する動荷重と発生電圧時刻歴 (動荷重30Hz, 400Nの場合)

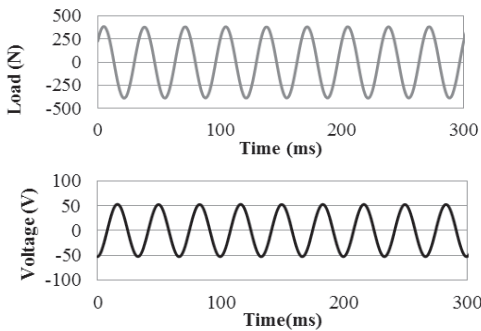


図6 3層PZT素子に作用する動荷重と発生電圧時刻歴 (動荷重30Hz, 400Nの場合)

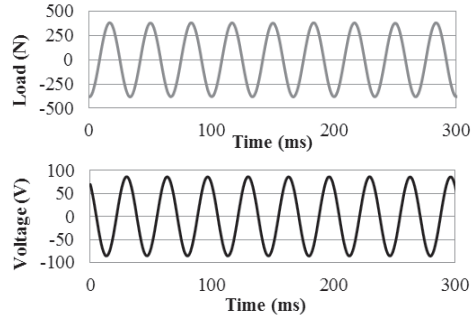


図7 7層PZT素子に作用する動荷重と発生電圧時刻歴 (動荷重30Hz, 400Nの場合)

4種類のPZT素子について、加振振動数30 Hzにおける動荷重に対する各PZT素子の発生電圧および発生電力の関係をそれぞれ図8, 9に示す。なお、発生電力は発生電圧より式(1)を用いて求めた。また、動荷重に対する発生電圧の関係を示した図8中では、実験プロットに対し、最小二乗法で求めた近似直線を図示した。動荷重に対する発生電力の関係を示した図9中では、実験プロットに対し、最小二乗法で求めた近似2次関数曲線を図示した。ここには示されていないが、この回路を流れる電流については示されている図8の電圧特性を電圧計の抵抗値 R_f (1.012 M Ω)で除することにより推定ができる。7層PZT素子を例とすると、その値は本実験の範囲では3.9 μ A~87 μ A程度である。

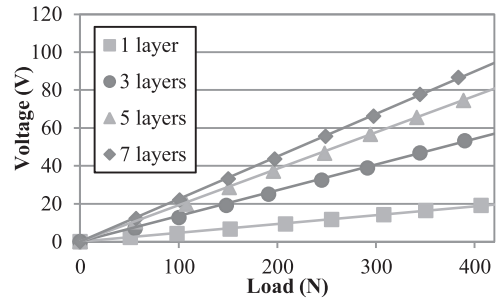


図8 動荷重が積層PZT素子の発生電圧に及ぼす影響 (動荷重30 Hzの場合)

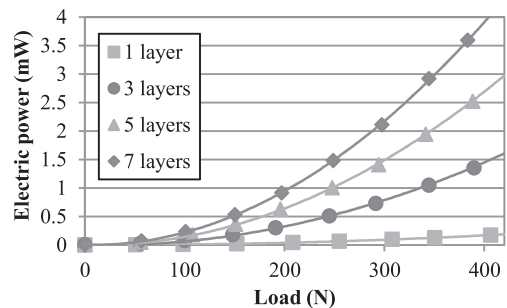


図9 動荷重が積層PZT素子の発生電力に及ぼす影響 (動荷重30 Hzの場合)

以上の結果より、以下のようなことが明らかにされた。

- (1) 動荷重に対して、積層 PZT 素子の発生電圧は比例して増加し、発生電力はほぼ 2 乗に比例して増加する。発生電力について、このような結果となったのは、式 (1)でも示されているように、発生電力は発生電圧の 2 乗に比例するためであると考えられる。このように、発電特性は、動荷重の大きさに依存するものと考えられる。
- (2) 発生電圧に関して、各積層 PZT 素子は単層 PZT 素子の場合に比べ、3 層 PZT 素子は 2.9 倍、5 層 PZT 素子は 4.1 倍、7 層 PZT 素子は 4.8 倍に増加する。これは、発生電圧の増加率は積層数に比例せずに低下することを示している。
- (3) 発生電力に関して、7 層 PZT 素子においては加振振動数 30 Hz、動荷重が 400 N の場合、約 3.8 mW であり、単層 PZT 素子に比べ約 23 倍の電力が得られた。発生電圧と同様に、積層数の増加割合に対して発生電力の増加率は低下する。

次に、動荷重振幅が 200 N、400 N の場合における加振振動数に対する各 PZT 素子の発生電圧および発生電力の関係を図 10～13 に示す。また、加振振動数 30 Hz、動荷重 400 N における PZT 素子の積層数に対する各 PZT 素子の発生電圧の関係を図 14 に示す。

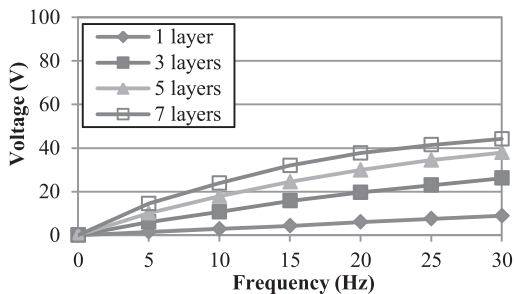


図 10 動荷重振動数が積層 PZT 素子の発生電圧に及ぼす影響 (動荷重 200 N の場合)

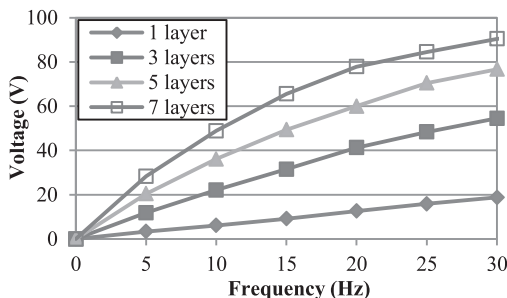


図 11 動荷重振動数が積層 PZT 素子の発生電圧に及ぼす影響 (動荷重 200 N の場合)

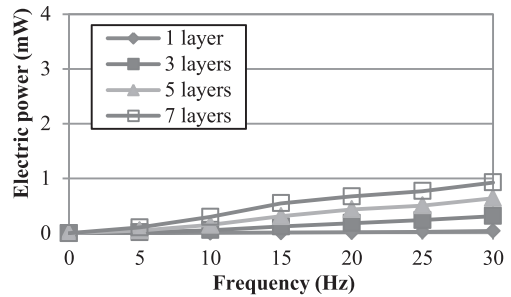


図 12 動荷重振動数が積層 PZT 素子の発生電力に及ぼす影響 (動荷重 200 N の場合)

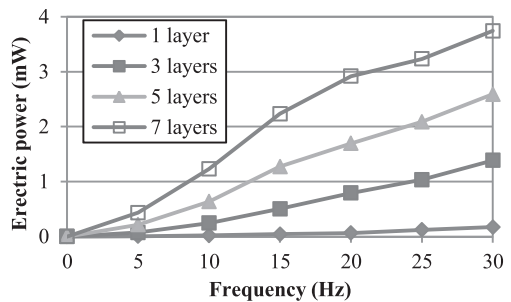


図 13 加振振動数が積層 PZT 素子の発生電力に及ぼす影響 (動荷重 400 N の場合)

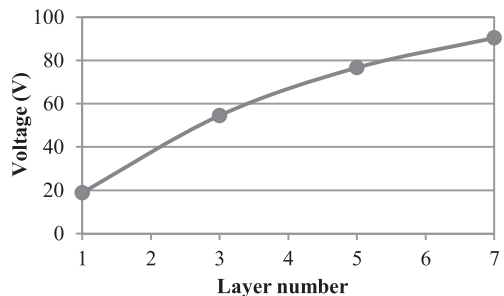


図 14 PZT 素子の積層数が発生電圧に及ぼす影響 (動荷重 30 Hz、400 N の場合)

これらの結果より、以下のようなことが明らかにされた。

積層数および加振振動数が増加すると、発生電圧、発生電力ともに増加する。これは、加振振動数が大きくなると荷重速度すなわち動荷重振幅と振動数の積は大きくなり、電荷が荷重速度に比例して増加するためである。ただし、増加率は飽和する傾向にある。これは、次のように説明できる。図 4 に示された積層 PZT 素子のコンデンサ (静電容量 C_p) と電圧計の抵抗 R_v で構成される RC 回路全体のインピーダンスは、積層 PZT 素子の積層数が

増え静電容量が大きくなると、周波数依存性が強くなる。すなわち、積層数が増え、静電容量が大きくなるとインピーダンスが大きくなり、発生電圧の増加率は低下すると考えられる。また、動荷重の振動数が増加すると、同様にインピーダンスが大きくなり、発生電圧の増加率は抑制されるため、その周波数特性は加振振動数が増加するに連れて飽和する傾向にあると考えられる。図 10, 図 11 に示されるように、動荷重 200 N, 400 N 両方において同様の傾向があることから、積層 PZT 素子の発電特性は動荷重に関わらず加振振動数にも依存するものと考えられる。

以上の結果より、積層 PZT 素子は単層に比べ、大幅に発生電圧、発生電力を向上させることができた。その中でも 7 層 PZT 素子は単層、3, 5 層の PZT 素子に比べ、発電出力が高振動数帯で飽和する傾向にあるが、積層化によって発生電圧、発生電力ともに大幅な向上を確認できた。

5. 結言

PZT 素子の発電特性を向上させるため、Nb を添加した PZT 素子を積層し、それらの電気的物性を調べるとともに、振動発電実験を行い、動荷重下での PZT 素子の発生電圧を計測し、評価した。その結果、本実験結果の範囲では、以下の結論を得た。

- (1) 単層 PZT 素子および 3, 5, 7 層の積層 PZT 素子を製作し、電気的物性としてそれぞれの圧電定数 d_{33} 、静電容量 C を計測した。その結果、PZT 素子を積層すると圧電定数 d_{33} 、静電容量 C は積層数倍に増加することがわかった。
 - (2) 積層数を増加させると発電特性は大きく向上する。また、全ての素子において発生電圧は動荷重に対してほぼ比例して増加し、発生電力は 2 乗に比例して増加する。また、7 層 PZT 素子においては、本試験範囲(加振振動数 30 Hz, 動荷重 400 N まで)では最大 3.8 mW 程度の発電能力があり、単層の約 23 倍の電力を得た。
 - (3) PZT 素子の積層数および加振振動数の増加に伴い発生電圧および電力は飽和して行く。これは、PZT 素子の積層数を増加させると積層数に比例して圧電定数は大きくなるが、静電容量も比例して大きくなることから積層 PZT 素子のインピーダンスが増加し、加振振動数が大きい領域では発生電圧を強く抑制するようになるためである。このような特性は、PZT 素子の積層数には、最大電圧および最大電力を得るための最適値が存在し得ることを示している。
- 以上より、PZT 素子を積層することにより効率的に大

幅な電力が得られる見通しを得た。このように、動荷重が作用している場所に積層 PZT 素子を設置すると mW クラスの電力を得ることができるので、加速度センサ、圧力センサ、温度センサおよび送受信デバイスなどの様々なマイクロデバイスの駆動が可能となる。これらを組み合わせると外部電力不要の機器設備やインフラ施設の状態モニタリングシステムの構築も可能となり、産業施設のメンテナンス効率化や安全性の向上を図ることができるので、積層 PZT 素子の有用性は大きい。

なお、本研究は平成 25~27 年度文部科学省科学研究費補助金(基盤研究 C 課題番号 25420196)により実施されたものである。

参考文献

- (1) Glynne-Jones, P., Beeby, S.P. and White, N.M.: Towards a Piezoelectric Vibration-Powered Microgenerator, IEEE Proc. Science, Measurement and Technology, 148, 2 (2001), 68.
- (2) Arms, S.W., Townsend, C.P., Churchill, D.L., Galberath, J.H. and Mundll, S.W.: Power Management for Energy Harvesting Wireless Sensor, Smart Structures and Materials 2005: Smart Electronics, MEMS, BioMEMS and Nanotechnology, edited by Varadan, V.K., Proc. SPIE, 5763 (2005), 267.
- (3) Ng, T.H. and Liao, W.H.: Sensitivity Analysis and Energy Harvesting for a Self-Powered Piezoelectric Sensor, J. Intelligent Material Systems and Structures, 16, 10 (2005), 785.
- (4) Adachi, K. and Tanaka, T.: A Preliminary Study Piezoelectric Vibration Energy Harvester for Vibration Condition Monitoring Applications of Rotating Machinery, Proc. ASME Conference on Smart Materials, Adaptive Structures and Intelligent Systems, SMASIS2008-483 (2008), 739.
- (5) 春日政雄: 腕時計にみるマイクロエネルギー技術の最前線, マイクロメカトロニクス(日本時計学会誌), 44, 4 (2000), 1.
- (6) Shu Y.C. and Lien I.C.: Efficiency of energy conversion for a piezoelectric power harvesting system, J. Micromech. Microeng. 16 (2006), 2429.
- (7) Beegy, S.P. Tudor M. J. and White N.M.: Energy harvesting vibration sources for microsystems applications, Meass Sci. Technol. 17 (2006), 175.
- (8) Kulсар, F.: Electromechanical properties of lead titanate zirconate ceramics modified with certain three or five- valent additions, J. the American Ceramic Society, 42(1959), 343.
- (9) Chu, S.Y., Chen, T.Y., Tsai, I.T. and Water, W.: Doping effects of Nb additives on the piezoelectric and dielectric properties of PZT Ceramics and its application on SAW device, Sensors and Actuators, 113(2004), 198.

-
- (10) Fujii, T., Hishinuma, Y., Mita, T. and Arakawa, T.: Preparation of Nb doped PZT film by RF sputtering, *Solid State Communications*, 149(2009), 1799.
 - (11) Lefeuvre, E., Badel, A., Richard, C., and Guyomar, D.: Piezoelectric Energy Harvesting Device Optimization by Synchronous Electric Charge Extraction, *J. Intelligent Systems and Structures*, 16, 10 (2005), 865.
 - (12) 速水浩平: 圧電素子一究極のエコ発電, *マテリアルインテグレーション*, 21, 9 (2008), 20.
 - (13) Umeda, M. Nakamura, K. and Ueha, S.: Analysis of the transformation of Mechanical Impact Energy to Electrical Energy Using Piezoelectric Vibrator, *J. J. Applied Physics.*, Vol.35, (1996), 3267.
 - (14) 梅田幹雄,坂井康弘,中村健太郎: 圧電素子を用いた衝撃・振動による自己発電型ドアアラームシステム, *電気学会誌*, 123, 12, (2003), 534.
 - (15) 藤本滋, 一木正聡, 矢野聡, 北原時雄, “圧電素子を用いた振動発電手法に関する研究(第1報, 添加剤を加えた圧電素子の圧電素子の発電特性)”, *日本設計学会誌, 設計工学*, 47, 12, (2012), 54.
 - (16) 水野徹, 小田切望, 岡安光博: 圧電セラミックスの機械的負荷による材料特性変化と内部損傷評価, *日本機械学会論文集 A 編*, 74, 739 (2008), 167.