

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 1 日現在

機関番号：32678

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22560232

研究課題名（和文）圧電素子を用いた高出力振動発電装置の実用化に関する研究

研究課題名（英文）Study on practical application of high-efficiency vibration power generation device using piezoelectric element

研究代表者

藤本 滋 (FUJIMOTO SHIGERU)

東京都市大学・工学部・教授

研究者番号：80386888

研究成果の概要（和文）：PZT 素子の発電特性を向上させる添加剤として Nb を添加した PZT 素子の振動発電実験が行われ、PZT 素子の発電特性が最大となる Nb 添加濃度は Nb 1.0 mol% であることが明らかにされた。次に、振動耐久試験を行い、Nb を含む PZT 素子の発電特性は振動荷重 1000 万周期まで変化なく、十分な耐久性を有することが確認された。さらに、PZT 素子を積層化することにより発電特性が大幅に向上し、7 層 PZT 素子では約 8mW の電力を得ることができた。積層 PZT 素子を用いることで高出力発電が可能であることが実証された。

研究成果の概要（英文）：Power generation characteristics of PZT elements doped with niobium (Nb) to improve its electrical properties under vibration loads are evaluated by vibration tests. It is identified that Nb doping concentration to achieve maximum electric power generation is 1.0 mol%. Next, it is confirmed that the PZT element doped with Nb has sufficient durability of up to 10 million cycles by durability vibration tests. Moreover, power generation characteristics are greatly improved by using laminated PZT elements. In this study, the electric power of about 8 mW is obtained by using the laminated PZT element of 7 layers. It is confirmed that very high electric power can be obtained by using the laminated PZT element as the vibration generating device.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,700,000	510,000	2,210,000
2011年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2012年度	600,000	180,000	780,000
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：振動工学

科研費の分科・細目：機械工学・機械力学・制御

キーワード：音響エネルギー・振動エネルギー変換

1. 研究開始当初の背景

日本では大幅なCO₂削減のため、クリーンエネルギーや省エネルギーの創出機運が高まっている。このようなエネルギーとして太陽光発電、風力発電、原子力発電などが有力であるが、高額の初期投資と設備設置のための膨大な資源とエネルギーが必要とされるだけでなくメンテナンスコストがかかり、また、環境破壊リスクも大きい。このような大規模発電方式に対して、建物の照明、小電力電子

機器、センサーなどの独立電源として回生エネルギーを利用するマイクロ発電方式が注目されつつある。回生エネルギーは、構造物の振動、車両振動、車両のブレーキ時などのこれまで無駄に消散されていた運動エネルギーを有効利用するものであり、本来使用されるエネルギーの利用効率を高めることに繋がる。その中で、構造物や車両の振動など、本来有害な振動エネルギーを電気エネルギーに変換する振動発電の試みが多く行われるようにな

って来た。この振動発電のための手段として機械的エネルギー損失がなく発電効率の高いPZT素子（チタン酸ジルコン酸鉛）などの圧電素子が注目されている。しかしながら、市販の圧電素子のエネルギー変換効率は低く、発生電力自体も数十 μ W程度と非常に低い。また、十分な発生電力を得るためには、圧電素子に大きな振動力を与える必要があるが、負荷荷重や振動数が圧電素子の発電特性に及ぼす影響や振動回数に対する耐久性など、未だ不明な点が多い。圧電素子を用いた振動発電の実用化のためには、これらの問題についても明らかにする必要がある。さらに、圧電素子として有力なPZT素子には鉛が含まれているため、環境負荷低減のため、鉛フリーの高効率圧電素子の開発も望まれている。

2. 研究の目的

本研究では、発電素子としてPZT素子に注目し、これに最適な添加剤を添加して高いエネルギー変換効率を有し、かつ高出力と高信頼性を有する振動発電用素子を開発することを主目的とする。さらに、次世代素子として鉛フリーの圧電素子の適用性も検討する。

3. 研究の方法

上記研究目的を達成するため以下の研究を行った。

(1) 発電効率が従来素子を大幅に上回る発電素子を開発するため、PZT素子への添加剤種類、添加濃度、添加剤の組み合わせなど添加剤の最適配合を決定するため、有力な各種添加剤を組み合わせる添加したPZT素子を試作し、これらの素子の振動発電試験を行い、発電特性を把握・評価する。

(2) PZT素子への負荷荷重や繰り返し荷重が発電性能や耐久性に及ぼす影響を把握し、振動発電のための発電素子の適用条件を明確にするために、試作したPZT素子に対する振動発電耐久試験を行う。

(3) 発生電力を高出力化するためにPZT素子を積層化することを提案した。積層型PZT素子の最適な積層数の決定および発電特性を把握するため、積層数を各種変化させた積層型PZT素子を試作し、これらを用いた振動発電試験を行う。さらに、これまで定式化されていなかった圧電素子の発電特性に関する等価電気回路モデルについて検討を行う。

(4) 本研究で得られた知見を鉛フリー圧電材料に対しても適用し、試作した素子の発電特性を実施することにより、次世代の環境低負荷素材の発電特性向上の検討を行う。

4. 研究成果

(1) PZT素子の添加剤の最適配合と発電特性
①添加剤 Nb 濃度が発電特性に及ぼす影響
〔雑誌論文〕①、〔学会発表〕①、⑤

これまでの研究より、PZT素子の電気的特性を向上させる添加剤としてニオブ(Nb)に注目した。本研究では、図1に示されるような直径16mm、厚さ10mmの円柱形のPZT素子にNbを添加した。添加濃度を0~5 mol%の間で8種類のPZT素子を試作した。試作したPZT素子の添加濃度と各素子の電気的特性を表1に示す。 C_p は静電容量、 ϵ は比誘電率、 d_{33} は圧電定数を示す。

これらのPZT素子は振動発電試験装置に取り付けられ、図1に示されるように円柱軸方向に初期圧縮荷重1.0KNが加えられた後、正弦振動荷重が与えられ、振動発電試験が行われた。加振振動数は3~35Hz間の9ケース、加振荷重振幅は約130~500N間の4ケースの組み合わせとした。

振動発電試験の結果、PZT素子に作用する応力速度振幅と発生電圧の関係を図2に示す。また、同様に応力速度振幅と発生電力の関係を図3に示す。応力速度振幅は、PZT素子に作用する正弦波振動荷重の時間変化（荷重速度）をPZT素子の断面積で除した振幅値であり、荷重振幅と振動数の2つの影響を表すパラメータである。

試験より以下のことが明らかにされた。

- 1) Nbを添加すると電気的特性および発生電圧・発生電力は大幅に向上し、最適な添加濃度は1.0 mol%である。
- 2) 作用する応力速度振幅に対し発生電力は比例する。これは振動荷重と振動数に比例して増加することを示す。発生電力は応力速度振幅の二乗に比例する。
- 3) Nbを添加すると発電特性は大幅に向上。Nb 1.0 mol% 添加のPZT素子では、応力速度振幅が約500MPa (460N, 35Hz)の場合、発生電力は約650 μ Wとなり、無添加PZT素子に比べ約150倍に増加する。

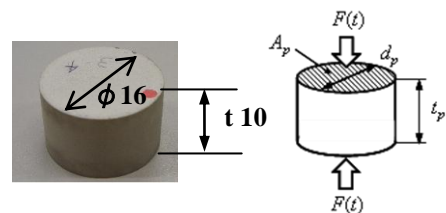


図1 試作PZT素子(Nb 1.0 mol%)と荷重の方向

表1 PZT素子の添加剤濃度と電気的特性

No.	Concentration of Nb (mol%)	Average electrical properties			Test sample
		C_p (pF)	ϵ	d_{33} (pC/N)	d_{33} (pC/N)
1	0	193	1086	21	22
2	0.5	242	1373	194	190
3	0.8	258	1495	301	300
4	1.0	289	1662	332	315
5	1.2	252	1461	285	284
6	1.5	247	1452	262	269
7	3.0	199	1134	75	75
8	5.0	156	828	20	20

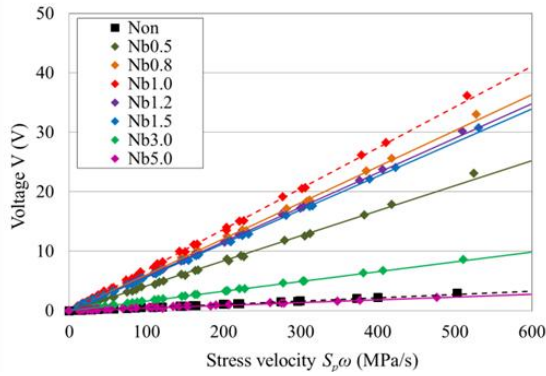


図 2 PZT 素子の応力速度と発生電圧の関係

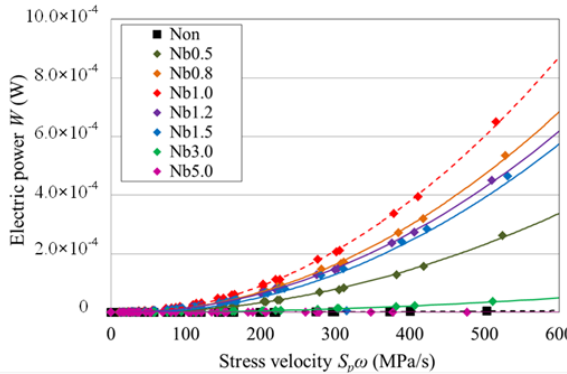


図 3 PZT 素子の応力速度と発生電力の関係

振動発電試験の結果、各 PZT 素子に作用する応力速度振幅と発生電圧の関係を図 4 に示す。試験より以下のことが確認された。

- 1) Nb, Ni, Zn を添加すると電気的特性および発生電圧・発生電力は大幅に向上する。最適な添加濃度は 1.0 mol% である。
- 2) 複数の添加剤を混合した場合には、Nb を 0.2, Ni を 0.4, Zn を 0.4 mol% を添加した場合が最も発電特性が高い。
- 3) 全ての添加剤の組み合わせの中で Nb を 1.0 mol% 添加した場合が最も発電特性が優れ、複数の添加剤を混合した PZT 素子はその発電性能を上回らなかった。

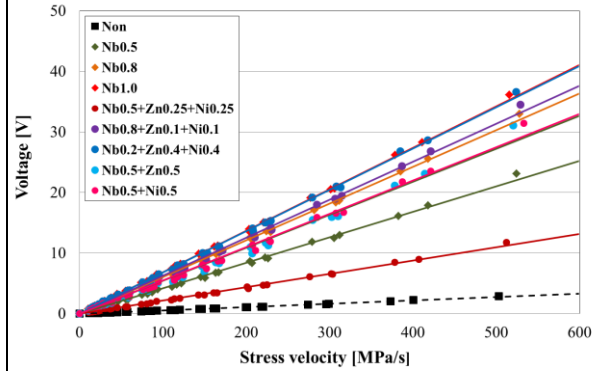


図 4 PZT 素子の応力速度と発生電力の関係 (Nb, Ni, Zn の影響)

② 添加剤の組合せが発電特性に及ぼす影響
([学会発表] ③, ④)

これまでの研究より、PZT 素子の電気的特性を向上させる添加剤として電子を放出する材料であるニオブ(Nb)、ニッケル(Ni)、亜鉛(Zn)に注目した。本研究では、図 1 に示されるような直径 16mm、厚さ 10mm の PZT 素子に Nb を添加した場合、Nb、Ni、Zn を混合し、これらの合計濃度が 1.0 mol% となるよう添加した場合、無添加の場合の素子を試作した。試作した PZT 素子の添加剤種類と濃度の組み合わせを表 2 の黒枠内に示す。また、表 2 には、比較のため、すでに特性が把握されている Nb のみを添加した PZT 素子の添加濃度も示す。これらの PZT 素子の発電特性を比較・評価した。

試作した PZT 素子を振動発電試験装置により、上記(1)で示した振動試験条件と同じ試験条件で振動発電試験を行った。

表 2 PZT 素子の添加剤種類・組合せと濃度

PZT No.	D [mm]	t [mm]	Concentration of additive [mol%]		
			Nb	Zn	Ni
1	16	10	0.0	0.0	0.0
2			0.5	0.0	0.0
3			0.8	0.0	0.0
4			1.0	0.0	0.0
5			1.2	0.0	0.0
6			1.5	0.0	0.0
7			0.8	0.1	0.1
8			0.5	0.25	0.25
9			0.2	0.4	0.4
10			0.5	0.5	0.0
11			0.5	0.0	0.5

(2) PZT 素子の振動発電耐久性
([学会発表] ①, ③)

PZT 素子は振動荷重を受け続けるため、その強度的な劣化や発電特性の劣化について調べておく必要がある。本研究では、振動荷重の繰り返し数が PZT 素子の発電特性に及ぼす影響を把握するため、PZT 素子の振動耐久試験を行った。試験は以下の手順で実施した。

- a) まず、試作直後の各種 PZT 素子について、(1)および(2)の場合と同様に振動荷重、加振振動数を変化させた振動発電試験を実施し、各種 PZT 素子の発電特性を把握した。
- b) 次に、各種 PZT 素子について初期圧縮荷重 1.0kN、加振振動数 35Hz、荷重約 500N、加振周期 1000 万サイクルの耐久振動発電試験を実施した。100 万サイクル毎に発生電圧時刻歴を記録した。
- c) 加振 1000 万サイクル終了後、a) の試験を実施した。

耐久振動発電試験を実施した結果の代表例を図 5 に示す。図 5 は振動サイクル数に対する各種 PZT 素子の発生電圧の関係を表している。主な結論は以下の通り。

- 1) Nb を添加した PZT 素子および複数の添加剤を添加した PZT 素子ともに、振動サイクル 1000 万回までは発生電圧の変化はなく、発電特性は安定していた。これら

各種 PZT 素子の振動発電特性は十分な振動耐久性を有していることが確認された。
2) 耐久試験後、各種 PZT 素子の外観を点検したが、傷や欠損は特になかった。

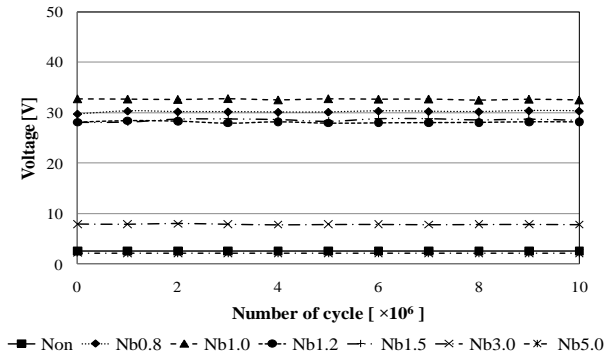


図5 振動サイクル数と発生電圧の関係

(3) 積層型 PZT 素子の発電特性
〔学会発表〕②, ⑦, ⑧)

本研究の(1)において、圧電素子の中でも電気的特性の優れた PZT 素子に添加剤を添加することにより、PZT 素子の発電特性を大幅に向上させ得ることがわかった。しかしながら、その発生電力は本研究の範囲では最大でも 600 μ W 程度であり、電子機器や照明の電源としては十分ではない。

本研究では、PZT 素子の発電特性をさらに大幅に向上させるために Nb 1.0 mo% を添加した PZT 素子を積層化することを提案した。これを実証するため、積層型 PZT 素子を試作し、これを用いて、PZT 素子の積層数、作用する荷重、振動数が積層型 PZT 素子の発電特性に及ぼす影響を把握し、高出力化の可能性を評価した。

振動発電試験のために試作した単層 PZT 素子および積層 PZT 素子 (3, 5, 7 層) の形状を図 6 に示す。これらの素子には、円柱軸方向に初期圧縮荷重 1.0kN が加えられた後、正弦振動荷重が与られ、振動発電試験が行われた。振動試験では、加振振動数は 5~50Hz 間の 8 ケース、加振荷重振幅は約 100~500N 間の 5 ケースを組み合わせた。

振動発電試験の結果として、積層 PZT 素子に作用する振動荷重振幅と発生電圧および発生電力との関係をそれぞれ図 7, 図 8 に示す。また、加振振動数と発生電力の関係を図 9 に示す。振動発電試験より、以下のことが確認された。

- 1) 積層 PZT 素子の静電容量 C_p および圧電定数 d_{33} は、ほぼ積層数倍に比例して増加する。
- 2) 積層数を増やすと発生電力は大幅に向上する。7 層 PZT 素子では本試験範囲では最大約 8mW となり、単層 PZT 素子の 18 倍の電力を得た。
- 3) 発生電圧は振動荷重に対してほぼ比例

して増加するが、振動数および積層数に対しては飽和する。この要因は、積層 PZT 素子の静電容量および回路中の負荷抵抗 (電圧計抵抗) の影響が大きい。従って、積層 PZT 素子の発電効率を高めるには、PZT 素子の静電容量や負荷抵抗のインピーダンス整合を図る必要がある。

- 4) 積層 PZT 素子を用いることにより高出力化が可能であることが実証された。

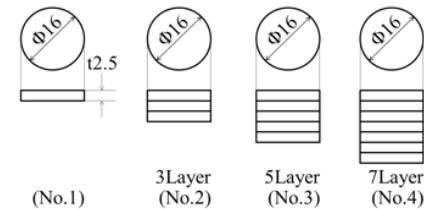


図6 試作した積層型 PZT の構造

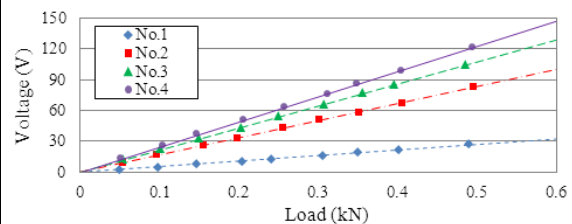


図7 積層 PZT 素子の振動荷重振幅と発生電圧の関係 (加振振動数 35Hz)

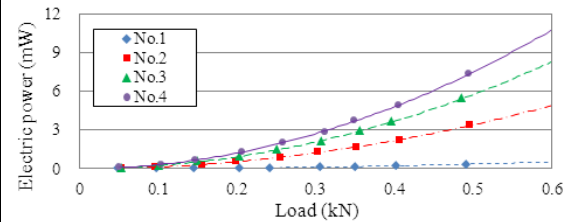


図8 積層 PZT 素子の振動荷重振幅と発生電力の関係 (加振振動数 35Hz)

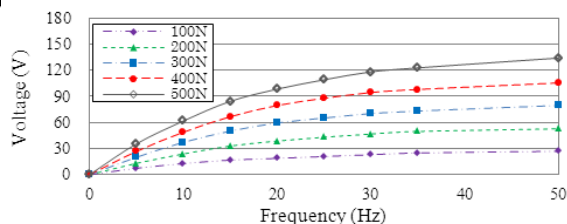


図9 積層 PZT 素子の加振振動数と発生電圧の関係 (振動荷重: 100, 200, 300, 400, 500N)

(4) 鉛フリー圧電素子の発電特性
〔学会発表〕⑥)

近年では、環境に対する配慮から鉛フリー材を用いた圧電素子の開発が望まれているが、PZT 素子と同等の圧電特性を有する鉛フリー圧電素子は未だ開発されていない。本研究では、直径 8.45mm, 厚さ 1.23mm の Li を添加したニオブ酸カリウムナトリウム ((K,Na)NbO₃: 以下 KNN 素子) を試作し、これと従来の PZT 素子および Nb を添加した PZT

素子を用いた振動発電実験を行い、これらの発電特性を比較し、KNN素子の振動発電素子としての性能について評価した。

振動発電実験は(1)と同じ方法で行った。図10にKNN素子とPZT素子の応力速度とPZT素子の単位面積あたりの発生電圧の関係を示す。これは、KNN素子の直径が8.45mm、PZT素子の直径が16mmであることから単位面積あたりの発電性能を比較したものである。試験より以下のことが確認された。

- 1) KNN素子の発生電圧、発生電力は、無添加PZT素子より優れているが、Nb1.0mol%添加のPZT素子に比べ、半分程度である。
- 2) KNN素子は、今後の添加剤の改良次第でPZT素子に代替し得る発電特性を得る見通しが得られた。

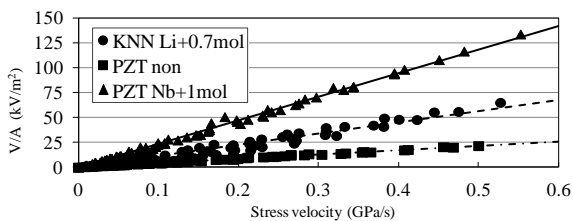


図10 KNN素子およびPZT素子の応力速度と単位面積あたりの発生電圧の関係

(5) 結論

以下に研究成果を述べる。

- ①PZT素子に添加剤Nbを1.0mol%添加することにより、従来のPZT素子に比べ、発電特性を大幅に向上させることができた。
- ②PZT素子や添加剤を添加したPZT素子に振動荷重を1000万サイクル加えても、発電特性の変化や損傷はなかった。PZT素子の発電素子としての耐久性を確認した。
- ③PZT素子の発電特性をさらに大幅向上させるためにNb1.0mol%を添加したPZT素子を積層化した。積層化することによりPZT素子の8mWの電力を得ることができた。積層PZT素子を用いることにより高出力化が可能であることを実証した。
- ④KNN素子は、今後の添加剤の改良次第でPZT素子に代替し得る発電特性を得る見通しが得られた

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計1件)

- ①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発電特性), 日本設計工学会誌, 査読有, Vol.47, No.12, 2012-12, p596-p602.

[学会発表] (計8件)

- ①矢野聡, 一木正聡, 北原時雄, 藤本滋; 構造物振動を利用した発電手法に関する研究 (圧電素子の振動耐久性), 日本機械学会2010年度年次大会 講演論文集(No.10-1), Vol.6, 2010-9, 名古屋工業大学.
- ②藤本滋, 一木正聡, 北原時雄, 矢野聡; 構造物振動を利用した発電手法に関する研究 (Nb添加のピエゾ素子の発電特性), 第60回理論応用力学講演会 USBメモリー論文集, 2011-3, 東京工業大学.
- ③矢野聡, 一木正聡, 北原時雄, 藤本滋; 構造物振動を利用した発電手法に関する研究 (複数の種類の添加剤を含む圧電素子の発電特性), 日本機械学会関東支部第17期総会講演会講演論文集(No.110-1), 2011-3, 慶應義塾大学.
- ④藤本滋, 一木正聡, 北原時雄, 矢野聡; 構造物振動を利用した発電手法に関する研究 (添加剤種類が圧電素子の発電特性に及ぼす影響), 日本機械学会2011年度年次大会 DVD-ROM論文集(No.11-1), 2011-9, 東京工業大学.
- ⑤飯村慶太, 一木正聡, 藤本滋, 伊藤寿浩, 須賀唯知; 圧電体を用いた振動発電デバイスの構造設計と素形材に関する研究, エレクトロニクス実装学会第26回春季講演大会 講演論文集, 2012-3, 中央大学.
- ⑥藤本滋, 一木正聡, 北原時雄, 森田剛, 石原博; 構造物振動を利用した高出力発電素子に関する研究 (鉛フリー素子の発電特性), 第19期総会講演会 講演論文集(No.130-1), 2013-3, 首都大学東京.
- ⑦藤本滋, 一木正聡, 北原時雄, 山岸昇平; 構造物振動を利用した発電手法に関する研究 (積層化された圧電素子の発電特性), 日本機械学会関東支部 第19期総会講演会 講演論文集(No.130-1), 2013-3, 首都大学東京.
- ⑧S. YAMAGISHI, S. FUJIMOTO, M. ICHIKI, T. KITAHARA and T. MORITA; Characterization of the piezoelectric power generation of PZT ceramics under mechanical force, Proc. of Symposium on Design, Test, Integration & Packaging of MEMS/MOEMS 2013/ DTIP 2013, 2013-4, Barcelona - Spain.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

藤本 滋 (FUJIMOTO SHIGERU)
 東京都大学・工学部・教授
 研究者番号: 80386888

(2) 研究分担者

一木 正聡 (ICHIKI MASAOKI)
 (独)産業技術総合研究所・集積マイクロシステム研究センター・研究チーム長
 研究者番号: 00267395