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

正 員 梅田 幹雄*

非会員 坂井 康弘**

正 員 中村健太郎***

Self-Generation Door Alarm System using Impact Induced Piezoelectric Vibration

Mikio Umeda*, Member, Yasuhiro Sakai**, Non-member, Kentaro Nakamura***, Member

This paper presents a self-generation piezoelectric sensor device for a wireless alarm system. A piezo-generator composed of a steel ball and piezoelectric vibrators senses the impact-induced vibration, and transforms its mechanical energy into electric energy to drive a wireless transmitter. First, the thickness and poling direction / electrode connection of the piezoelectric vibrator are examined to improve the efficiency of the piezo-generator. Next, the mechanical oscillations of a cantilever spring are used to repeat the impact and accumulate the electric energy up to the level enough for driving a micro-computer and a radio transmitter. A prototype wireless alarm system was assembled and worked successfully.

キーワード：衝撃，振動，圧電振動子，自己発電，警報，無線装置

Keywords : impact, vibration, piezoelectric vibrator, self-generation, alarm, wireless device

1. はじめに

近年，携帯型電子機器が急速に普及すると共に，その目的に合ったさまざまな電池の研究・開発が活発に行われている⁽¹⁾。最近では環境に配慮したクリーンな電気エネルギー源として，化学燃料から電気エネルギーを取り出す燃料電池が脚光を浴びており，早期実用化が期待されている⁽²⁾。これらの電池開発の主目的はそのエネルギー密度を高め，機器の小型・軽量化及び使用時間の拡大などにある。

一方，半導体技術の発展により，各種電子デバイスの小型化や低消費電力化が進み，いわゆる一次・二次電池の不要な自己発電型携帯機器，たとえば，ソーラー式電卓やkinetic 式腕時計⁽³⁾などが普及してきている。これらは，発電するためのエネルギー源と発電方式が適合しており，製造

コスト及び電力の需要と供給のバランスが取れている機器と言える。

機械エネルギーから電気エネルギーへの変換が容易に行える圧電素子も，衝撃や振動センサとして広く活用されているが⁽⁴⁾，電子デバイスを直接駆動するまでの発電能力を引き出すまでには至っておらず，発電素子としての実用はあまり進んでいないようである。機械的振動や衝撃は身の回りで容易に得られるエネルギー源であり，その方式に工夫をこらして発電能力を向上させ，目的と用途を適合させれば，圧電方式による新しい電子機器組み込み用発電機器が提案できるのではないかと考えられる。

このため筆者らは，衝突による機械的衝撃エネルギーを外部から圧電振動子に印加し，振動を励起して圧電効果により電気エネルギーを取り出す発電方式を提案している⁽⁵⁾⁽⁶⁾。その結果，発電に特化した設計を行えば，センサ用素子より少し高い出力を得ることが可能で，用途開拓の可能性があるとの見解を得た。

そこで今回は，その発電方式や発電能力の向上を検討しながら，発電能力と用途の適合をねらった，衝撃・振動による自己発電型センサシステムの開発を行うこととした。具体的には，ドアが開く時の衝撃・振動エネルギーの一部を圧電効果によって電気エネルギーに変換し，整流してキャパシタに一旦蓄電した後，無線装置を駆動し，ドアの開いた

* 長岡工業高等専門学校
〒940-8532 新潟県長岡市西片貝町 888
Nagaoka National College of Technology
888, Nishikata-kai-machi, Nagaoka 940-8532

** (株)ユーエスシー
〒226-0028 横浜市緑区いぶき野 35-4
USC Corporation
35-4, Ibukino, Midori-ku, Yokohama 226-0028

*** 東京工業大学 精密工学研究所
〒226-8503 横浜市緑区長津田町 4259
P & I Lab., Tokyo Institute of Technology
4259, Nagatsuta-chou, Midori-ku, Yokohama 226-8503

ことを感知・通報する防犯用自己発電型無線警報装置の開発である。以下にその詳細を述べる。

2. 装置構成と動作原理

図 1 に試作した防犯用自己発電型ドアアラームシステムを示す。自己発電によるセンサ部は、板バネ、圧電型発電装置、整流・蓄電及び無線送信回路、アンテナ等で構成される。Ni-Cd バッテリ等外部電源で駆動される受信部は、アンテナ、無線受信回路、信号受信表示用 LED、圧電ブザー、外部出力端子などで構成される。

図 2 に動作原理の概略を示す。これと、図 3 及び図 4 のセンサ部と受信部のブロック図を用いてその一連の動作を説明する。図 2 のようにセンサ部の板バネが垂直になるよう板バネ下端を壁などに固定する。ドアを開けるとドアに設置されたフックが板バネ上端を右方向に引き、やがてドアフックが外れると板バネは発電部を質量とした振動を繰り返す。この振動により、発電部内では圧電効果により電気エネルギーが生成され、整流された後、蓄電用キャパシタに蓄えられる。このキャパシタの充電電圧が一定以上となると、フリップフロップ(F-F)が ON となり、その静電エネルギーがマイコン及び送信回路に供給され、情報が無線送信される。送信が終わると F-F が OFF となり、送信動作を終

図 2 動作原理の概略図

Fig. 2. Principle of the alarm system.

図 1 自己発電型無線警報装置

Fig. 1. Self-generation type wireless alarm system.

図 3 センサ部ブロック図

Fig. 3. Block diagram of the sensor.

図 4 受信部ブロック図

Fig. 4. Block diagram of the receiver.

了する。すなわち、センサ部はドアの移動を感知するとともに発電し、得られた電気エネルギーで無線信号を送信するものである。蓄電用キャパシタには損失の少ないタンタルコンデンサを使用し、送信は特定省電力無線（ARIB STD-T67 準拠、使用周波数:426.025 MHz、送信速度:4kbps、有効データ長:12 bit）を利用する。これに要する電気エネルギーは 2×10^{-4} J 弱である。これとマイコン及び送信回路の最低動作電圧(2.5 V)を考慮した結果、蓄電用キャパシタ容量を 47 μ F と定め、4 V 充電で F・F が ON になるよう設定した。送信回路部の寸法は $22 \times 17 \times 11$ mm、質量は約 4 g である（発電部及びアンテナ含まず）。

一方、受信部ではその信号が受信されると、どのドアが開いたのかをマイコンで判別し、その情報によりブザー、LED や電磁リレーを動作させると共に、その情報を RS232C で出力する。

3. 発電方式と基礎特性

発電方式は、鋼球を圧電素子に衝突させて圧電素子に振動を励起し、圧電効果により振動に伴う電力を出力するものである。鋼球による加振のしやすさと小型化を考慮し、直方体形状のバイモルフ型圧電素子を採用する。また、構造の簡略化のためと、大きな鋼球の運動エネルギーが万一入力されても、そのエネルギーを分散して圧電素子の機械的破壊を防止するために、圧電素子をスポンジで保持することとした。図 5 に使用する圧電素子の概略図を示す。分極方向・電極結線により、それぞれ(a)直列型、(b)並列型と呼ぶこととする。圧電素子の長さ X と幅 Y をそれぞれ 17.5 mm 及び 5.8 mm に決定し、その厚さ Z と分極方向・電極結線方式から発電に最適な条件を検討する。図 6 に、このための実験装置の概略図を示す。スポンジ上に配置された圧電素子の中心部めがけて鋼球（質量 m ）を高さ $h = 10$ mm より自由落下・衝突させて圧電素子に衝撃を加え、たわみ振動を励起し、負荷抵抗 R_L 等に電気エネルギーを出力する。図 7 はこの電気的等価回路であり、 R_m 、 L_m 、 C_m 、 C_d 、 R_d はそれぞれ圧電素子の等価抵抗、等価インダクタンス、等価キャパシタンス、制動容量、制動抵抗である。

〈3・1〉 弾性振動エネルギーと電気的出力エネルギー ここではまず、鋼球と圧電素子が衝突した際、圧電素子にどれくらいの弾性振動エネルギーが得られるかという点と、得られた弾性振動エネルギーがどれくらい電気エネルギーとして出力されるかという点に分離して考える。前者では、鋼球と圧電素子が衝突した瞬間の挙動すなわち、衝突力や接触時間、圧電素子の並進運動などが問題となるが、ここでは圧電素子の弾性振動のふるまいに着目して考える。動電流 i_m は圧電素子の弾性振動速度に比例するから、圧電素子の電気端子短絡状態での出力電流 i_o 波形を観察すれば、弾性振動の様子を推測できる。このときの出力電流の最大振幅値 $i_{o(max)}$ を測定し、鋼球の持っていた並進運動エネルギー mgh (g は重力加速度)が圧電素子の弾性振動エネルギー $L_m i_{o(max)}^2 / 2$ に変換された効率 η_1 を次式で概算する。

図 5 圧電素子の概略図

Fig. 5. Piezoelectric vibrator.

図 6 実験装置

Fig. 6. Experimental setup.

図 7 電気的等価回路

Fig. 7. Equivalent circuit.

$$\eta_1 = \frac{L_m i_{o(max)}^2}{2mgh} \dots \dots \dots (1)$$

後者に関しては圧電素子と負荷とのインピーダンス整合等が問題となるが、衝突によって得られた圧電素子の弾性振動エネルギーが負荷抵抗 R_L に供給される電気エネルギーへと変換される効率 η_2 を次式で見積もる。

$$\eta_2 = \frac{R_x}{R_m + R_x + \omega^2 C_d^2 R_x^2 R_m} \cdot \frac{R_x}{R_L} \dots \dots \dots (2)$$

(2)式は、図 7 の $L_m + C_m$ を簡易的に $\omega = 1/\sqrt{L_m C_m}$ の交流電源と置き換えて算出されるものであり、 $R_x = R_d // R_L$ である。

また、衝突前に鋼球の持っていた並進運動エネルギーが負荷抵抗で消費された電気エネルギーに変換される効率 η は、

$$\eta = \eta_1 \cdot \eta_2 \dots \dots \dots (3)$$

で算出する。

〈3・2〉 圧電素子の厚さの影響 直列型で厚さ Z の違う 6 種類の圧電素子 (株式会社: N6 材) を用意し, スポンジ上に配置した。各素子の電気的等価回路定数を表 1 に示す。これら圧電素子に $m = 1.07 \text{ g}$ の鋼球を衝突させた時の電気端子短絡電流 i_o を電流プローブで測定した。図 8 に $Z = 1.0, 2.0, 3.0 \text{ mm}$ 時の波形を示す。これらより, 各電流の最大振幅 $i_{o(\max)}$ を求め, (1) 式を用いて η_1 を算出した (表 2)。今回の条件では, $Z = 2.0 \text{ mm}$ の時に $i_{o(\max)}$ 及び η_1 が最大となると概算される。

図 9 に, 負荷抵抗 R_L を変化させたときのエネルギー変換効率 η を示す。計算は (3) 式を用い, 実測は出力電圧波形 e の数値積分値と R_L より求めた。多少の差はあるものの, 実測値と計算値の傾向は類似している。よって今回の場合, 最大効率を与える負荷抵抗は圧電素子と負荷抵抗のインピーダンス整合で決定され, 圧電素子の厚さにより効率最大値が異なると考えられる。

〈3・3〉 分極方向・電極結線の影響 次に, 厚さを $Z = 2.0 \text{ mm}$ に固定し, 直列型と並列型で比較する。ここでは (株) 富士セラミックス製圧電素子 (C203 材) と, 質量 $m = 1.4 \text{ g}$ の鋼球を用い, 同様な実験を行った (表 3, 図 10)。表 3 よ

表 1 使用する圧電素子の電気的等価回路定数

Table 1. Equivalent constants of the piezoelectric vibrators.

$Z(\text{mm})$	1.0	1.4	2.0	2.5	3.0	3.5
$R_m(\text{k}\Omega)$	2.31	1.75	1.28	1.25	1.24	1.22
$L_m(\text{H})$	3.88	2.87	2.02	1.88	1.52	1.49
$C_m(\text{pF})$	54.5	42.1	28.9	21.4	19.4	15.6
$C_d(\text{pF})$	1150	858	595	494	412	355
$R_d(\text{M}\Omega)$	33	40	55	79	96	111

図 8 電気端子短絡時の出力電流波形

Fig. 8. Short circuited waveforms of the output current.

表 2 電気端子短絡時の出力特性

Table 2. Short circuited characteristics of the specimen vibrators.

$Z(\text{mm})$	1.0	1.4	2.0	2.5	3.0	3.5
$i_{o(\max)}(\text{mA})$	3.38	4.21	5.17	5.00	3.95	3.57
$\eta_1(\%)$	21.1	24.4	25.9	22.5	11.4	9.1

り直列型と並列型の η_1 はほぼ同じ値であるが, $i_{o(\max)}$ は約 2 倍の差があり, さらに図 10 より最大 η を与える R_L に 4 倍程度の差があることがわかる。

さらに, 圧電素子の電気的出力端子に全波整流回路と蓄電用キャパシタ C を接続し, その蓄電効率を測定した (図 11)。ここで, η_1 の計算には, 表 3 の $i_{o(\max)}$ を L_m に与えて C に蓄電される静電エネルギーを PSPICE で解析した結果を用い, 実測では C の充電電圧より算出した。並列型のほうが, $C = 1 \mu\text{F}$ 以上では蓄電効率が良いことがわかる。

いずれにせよ, 負荷への電気的出力特性は圧電素子とのインピーダンス整合に大きく影響をうける傾向が確認された。

図 9 負荷抵抗とエネルギー変換効率の関係

Fig. 9. Transformation efficiency versus the load resistance.

表 3 等価回路定数と短絡特性

Table 3. Characteristics of the serial and parallel type piezoelectric vibrators.

	Serial type	Parallel type
$R_m(\text{k}\Omega)$	1.49	0.45
$L_m(\text{H})$	2.1	0.54
$C_m(\text{pF})$	29.2	120
$C_d(\text{pF})$	545	2160
$R_d(\text{M}\Omega)$	70	17
$i_{o(\max)}(\text{mA})$	5.53	11.2
$\eta_1(\%)$	23.4	24.5

図 10 抵抗負荷とエネルギー変換効率の関係

Fig. 10. Transformation efficiency versus the load resistance.

図 11 蓄電キャパシタ容量と変換効率

Fig. 11. Transformation efficiency versus the storage capacitance.

4. 発電装置と蓄電特性

〈4・1〉 反復発電方式 前述したように、無線送信するためには、 $C = 47 \mu\text{F}$ の蓄電キャパシタに最低 4 V まで充電する必要がある。これを一回の衝突で実現するには、それだけの大きな運動エネルギーを鋼球に与える必要があるばかりか、衝突時における圧電素子の機械的強度や耐久性などにも問題が発生すると予想される。そこで、ある程度の大きさの機械的エネルギーを分散して入力することを考えた。具体的には、図 12 に示すような、1 個の鋼球と 2 個の圧電素子で構成される発電部を板バネで支持するという構造で検討する。すなわち、ドアが開けられる際に、板バネに十分大きなたわみエネルギーを蓄え、これが開放されて生じる発電部の質量と板バネによるゆっくりとした振動により、その周期ごとに鋼球を左右の圧電素子と繰り返し衝突させることで、はじめに蓄えられた大きなエネルギーを分割して電気エネルギーに変換する方式である。

ここでは、一回の衝突時に与える鋼球の並進運動エネルギーと、衝突回数の影響についてシミュレーションし、その傾向を予測した。図 13 は、衝突時に持つ鋼球の運動エネルギーを図 11 の実験時における mgh の十倍 ($=1.37 \times 10^{-3} \text{ J}$) に固定し、これを繰り返し与え、 $C = 50 \mu\text{F}$ の蓄電キャパシタに充電することを想定した場合のシミュレーション結果である。これより、直列型では 4 V まで充電するのに 12 回の衝突を要するが、並列型では 8 回の衝突で 4 V 充電が完了すると予想される。効率は直列型では約 2.4% 、並列型で約 3.6% と高くはないが、今回の応用では実用上問題にはならなかった。

〈4・2〉 反復蓄電特性 図 13 でのシミュレーション結果等をふまえ、ここでは質量 $m = 1.07 \text{ g}$ の鋼球と、スポンジで保持された直列型バイモルフ圧電素子（長さ $X = 17.5 \text{ mm}$ 、幅 $Y = 5.8 \text{ mm}$ 、厚さ $Z = 2.0 \text{ mm}$ ）、これらを全波整流回路と共にプラスチックケース ($30 \times 22 \times 9 \text{ mm}$) に挿入し（ここまでの質量 7.5 g ）、長さ 160 mm の板バネ先端部に配置して、図 12 の装置を試作した。なお、無線送信回路部も発電部ケース側面に仮設置した。

図 12 発電部の構造

Fig. 12. Construction of the piezo-generator.

図 13 衝突繰り返しによる充電電圧のシミュレーション
Fig. 13. Output voltage versus the impact number calculated by SPICE.

図 14 圧電発電装置による蓄電の様子

Fig. 14. Output voltage change for multiple impacts using the piezo-generator.

図 15 無線回路を動作させたときの充電電圧波形

Fig. 15. Output voltage change with the transmitter circuit.

この発電装置のバネ下端を図 2 のように固定し、その上端を δ だけ右方向に変位させてバネを歪ませた後、バネを振動させて発電を行い、 $C=47\text{ }\mu\text{F}$ の蓄電用キャパシタにおける充電電圧を測定した。結果を図 14 に示す。なお、板バネ上端部に $\delta = 50\text{ mm}$ だけの歪みを与えるのに要する力はおおよそ 0.6 N であった。バネに与える歪み量により、充電電圧は異なるが、いずれも衝突の繰り返しによって充電電圧が上昇していく様子が観察でき、 $\delta = 50\text{ mm}$ 時では 15 回の衝突で 4 V の充電電圧に達し、それに要する時間はおおよそ 1.3 s であった。引き戸を想定した場合、この程度の歪みをバネに加えることは容易であり、その存在を意識するほどの負荷レベルではなかった。

5. システム動作確認

図 14 の実験で使用した発電部と仮設置した無線送信回路を配線し、受信部の電源を入れて本システムの動作確認を行った。図 15 に $\delta = 50\text{ mm}$ としたときのキャパシタ充電電圧波形を示す。これより、センサ部では正常に充電が行われた後、送信回路が作動し、時刻 2 s で一連の送信動作が終了した様子がうかがえる。なお、この波形より、発電により蓄電された静電エネルギーは $3.8 \times 10^{-4}\text{ J}$ 程度であり、送信等で使用された電気エネルギーはその半分以下の、 $1.7 \times 10^{-4}\text{ J}$ 程度であったことが推測される。一方、受信部ではその受信と信号処理が正常に行われたことを、ブザーや LED 等の作動の様子や RS232C 出力信号で確認した。

現在、断続運転試験を行っているが、懸念された圧電素子の耐久性も含め、大きな問題点は発生していない。

6. まとめと今後の課題

圧電素子を使った発電装置を用いて、その発電方式や発電能力の向上を検討しながら、防犯用自己発電型無線装置を試作した。その際に明らかとなった点や検討課題を以下にまとめる。

1) 鋼球と圧電素子を使った発電方式では、圧電素子の寸法や分極処理・結線方式、さらには与える負荷素子等によ

りエネルギー変換効率が変化する。したがって、これらに留意した発電部の設計が必要となる。

2) バネの弾性エネルギーを利用することにより、入力エネルギーの増大と分散が可能である。このバネ系の設計も重要である。

以上の点に留意し、さらに極力無駄な消費電力を省くよう回路設計を行えば、今回の装置においては、より小さな入力エネルギーで、より多くの情報を送信することが可能であろうし、さまざまな用途への応用も期待できる。

発電・充電方式に工夫をこらしてその能率と効率を向上させ、その特性・能力と用途を適合させれば、また新しい自己発電機器が提案できる可能性も持ち合わせているのではないかと考える。

今後は、Power MEMS⁷⁾のすなわち、マイクロマシンやモバイル製品の電源としての活用をも念頭におき、合わせて発電部の小型化や並列運転、さらには電子デバイスとの複合・集積化なども検討していきたい。

(平成 15 年 3 月 5 日受付)

文 献

- (1) 門間聰之・逢坂哲彌:「最新電池材料」, 電学誌, **119**, 7, pp.408-411 (1999-7)
- (2) 梅田 実・内田 勇:「携帯機器用マイクロ燃料電池」, 電学誌, **122**, 8, pp.545-548 (2002-8)
- (3) 長尾昭一:「ウォッチ用自動巻発電機構の改良」, 日本時計学誌, No.144, pp.22-30 (1993)
- (4) K. Nakamura: "Acoustic Sensors", *T. IEE Japan*, Vol.122-E, No.4, pp.187-192 (2002-4) (in Japanese)
中村健太郎:「音響・振動センサ」, 電学論誌 E, **122**, 4, pp.187-192 (2002-4)
- (5) M. Umeda, K. Nakamura, and S. Ueha: "Analysis of Transformation of Mechanical Impact Energy to Electric Energy Using Piezoelectric Vibrator", *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol.35, No.5B, pp.3267-3273 (1996)
- (6) M. Umeda, K. Nakamura, and S. Ueha: "Energy Storage Characteristics of a Piezo-Generator using Impact Induced Vibration", *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol.36, No.5B, pp.3146-3151 (1997)
- (7) S. Tanaka: "Power Micro-electromechanical Systems (Power MEMS)", *T. IEE Japan*, Vol.122-E, No.1, pp.1-9 (2002-1) (in Japanese)
田中秀治:「パワー微小電気機械システム (Power MEMS)」, 電学論誌 E, **122**, 1, pp.1-9 (2002-1)

梅 田 幹 雄

(正員) 1961 年 5 月 5 日生。1984 年静岡大学卒業後、アルプス電気(株)に入社。新潟職業能力開発短期大学校講師、助教授を経て、2001 年より長岡工業高等専門学校助教授。この間、上智大学で圧電デバイス、東京工業大学で強力超音波デバイスを研究。博士(工学)。現在、圧電及び超音波デバイスのハイパワー特性評価システムやその応用などの研究に従事。電子情報通信学会、日本音響学会各会員。

坂 井 康 弘

(非会員) 1947年4月1日生。1970年東京電機大学電子工学科卒業。同年日本システム工業(株)に入社。1973年同社の4人のメンバーと共にユニー(株)を設立。開発担当取締役。その後2度の社名変更を経て現在(株)ユーエスシーとなる。主な開発に、マイコンによるクレーン制御、ガスクロマトグラフデータ処理、スカラ型ロボット制御、小型 NC 制御、サーボモータ制御 LSI、防犯用リモコンキー、\$ 紙幣鑑別機などがある。現在、圧電発電の応用製品(フラッセル)の事業化プロジェクトを推進中。

中 村 健太郎

(正員) 1963年7月3日生。1992年東京工業大学総合理工学研究科・博士課程修了。博士(工学)。東京工大・助手、講師を経て同大・精密工学研究所・助教授。超音波モータなど圧電超音波デバイス、光ファイバ音響センサなど光波を用いた音響センシングの研究に従事。日本音響学会栗屋潔学術奨励賞、電子情報通信学会論文賞受賞。音響関係の著書に「音のなんでも小事典」(講談社ブルーバックス・共著)、「音のしくみ」(ナツメ社)などがある。