

# 圧電素子を用いた 2 重共振 3 軸発電素子の開発

岡田和廣, 江良聡 (株式会社ワコー)

高橋秀徳, 大久保健\*, 半田直博, 熊谷清哉 (株式会社ミズサワセミコンダクタ)

Double Resonant 3-axis Energy Harvesting using Piezo-electric Element

Kazuhiro Okada, Satoshi Era, (Wacoh Corp.)

Hidenori Takahashi, Tsuyoshi Okubo\*, Naohiro Handa, Seiya Kumagai, (Mizusawa Semiconductor Co.,Ltd.)

We have developed a double-resonant 3 axial **E**nergy **H**arvesting using a piezoelectric element, so we will describe it in detail. This EH consists of three beams made of SUS and piezoelectric ceramics. Double resonance is given by two vibration systems, and has two resonance frequencies about all axis. 3-axis EH can generate power from vibrations in all axis, and since the resonance frequency of this EH is as low as 10 Hz, it can generate power sufficiently even with hand shaking and walking.

キーワード : エネルギーハーベスティング、2 重共振、3 軸、全方向、圧電セラミック、SUS  
(Energy Harvesting, Double resonance, 3-axis, All directions, Piezoelectric ceramic, stainless steel)

## 1. はじめに

エネルギーハーベストとは、環境に存在するエネルギー（光、熱、振動等）を電気エネルギーに変換する技術である。最も普及しているエネルギーハーベストは光をエネルギー源とした発電で、大規模ソーラー発電から腕時計に内蔵された小規模発電まであり、大きな市場が形成されている。一方、振動エネルギーを電気エネルギーに変換するエネルギーハーベスト（以下、EH）というが種々提案されているが普及に至っていない。

従来の EH は代表的な例として、エレクトレットを使った発電<sup>(1)</sup>と圧電素子を使った発電<sup>(2)</sup>である。両者の特徴的な構造は共に片持ち或いは両持ち型であり、梁の先端に 1 個の振動体が接続される。EH の上面に対し垂直方向（上下）の振動によって振動体が振動する。エレクトレットの場合は振動体の変位によって電荷が発生し、圧電型の場合は梁に発生する応力に基づき圧電効果で電荷が発生する。即ち従来の EH は振動体を上下方向に振動させる 1 軸方向の振動エネルギーしか利用できない。更に、1 個のバネと振動体で構成されるため、単一の共振周波数でしか発電する事が出来ない。その為、発電条件に制限があり、十分に効率よく発電することは困難である。たとえば、人間の動きはランダムな 3 次元的な動作であり、自動車等の輸送機器では、運行中にランダムな方向から振動が加わる。その為、特定の 1 軸方向の振動でしか発電しない EH では発電効率が低い。更に、従来の EH は 1 つの共振系が構成されるため、EH の共振周波数を環境の周波数に合わせる必要があり、EH の普及を妨げ

る一因となっている。

本稿で発表する EH は、振動体が 3 次元空間で自由に振動し、全方向の振動に対し発電（3 軸発電）する事が出来、しかも、2 つの共振系（2 重共振）を有する為、発電可能な周波数帯域が広がり、効率よく発電することが出来る。

共振周波数は梁と振動体の形状で自由に変えることが出来、困難とされていた低周波数の振動でも発電することが出来る。今回開発した EH の共振周波数は 10Hz と低いため、手振れという低周波で微小な振動でも十分に発電することが出来る。

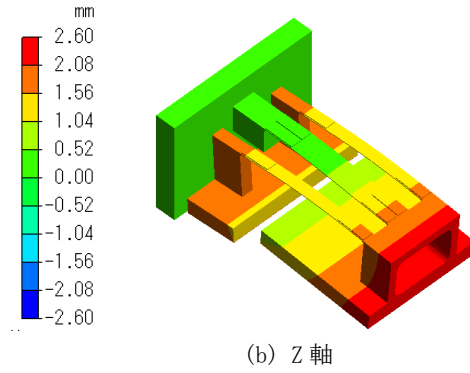
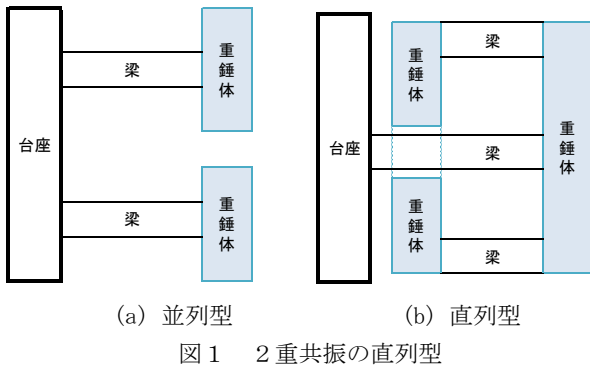
## 2. 2 重共振 3 軸の原理

### 〈2・1〉 2 重共振の原理

#### ・ 2 重共振の原理

ここで 2 重共振とは、1 個の EH が 2 系統の共振系を有するものを言う。具体的に 2 つの構成例を示す。図 1 (a) は単純に共振系を 2 個配置したに過ぎず互いの共振系が干渉することはなく、また、大きさの点からも不利である。それに対し、図 1 (b) は 2 つの共振系を直列に配置され、2 組のバネ系と振動体から構成され、2 つの振動系が互いに干渉するようになっている。2 つに振動系が直列に配置されるも振動体 1 を介して折り返されることから、EH のサイズを小型化する事が出来る。本稿の EH は図 2 を採用した。

図 1 (a) では重錘体の大きさを小さく示したので、図 1 (b) と同程度の大きさになっているが、重錘体の大きさを揃えれば、図 1 (a) が大きくなる事は明らかである。



### 〈2・2〉 3軸発電の原理

振動体に振動による3軸方向の ( $A_x, A_y, A_z$ ) が作用すると、加速度は3軸方向の力に変換され、EHの振動体は図2の如く変位する。2つの振動体の重心位置が梁の面より下面にある事から、振動体はX軸方向力  $F_x$  に対しY軸回りに回転し、Y軸方向の力  $F_y$  に対しX軸周りに回転し、そしてZ軸方向の力  $F_z$  に対してはZ軸方向に変位する。

即ち、振動体は3軸方向の加速度によって3次元空間で自由に変位することが出来、振動体の変位によって、3本の梁に応力が発生する。この領域に圧電セラミックを配置することで、圧電効果で圧電素子の上面電極に電荷が発生する。この電荷を後述の発電用整流回路で電力に変換すれば、あらゆる方向の振動に対し発電することが出来る。

### 3. EHの構造と構造解析

#### ・構造

本EHの構造を図3に示す。図3に示す通り、金属部材(SUS)と圧電セラミックで構成される。

可撓部を有し中央部に配置された第1の梁と、第1の梁と平行に配置された第2と第3の梁を有する。第1の梁の根端部は台座に固定され、先端部には第1の振動体が接続されている。第1梁と、第2と第3の梁は第1の振動体を介して接続され、第2と第3の梁の先端に第2の振動体が接続されている。更に、第1の梁の両端の左右に2個ずつ、第2と第3の梁の両端に1個ずつ圧電セラミック(合計8個)がそれぞれの梁上に接着されている。

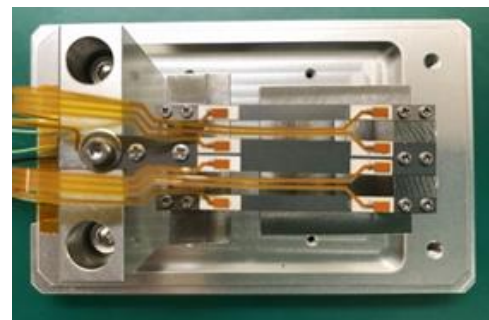
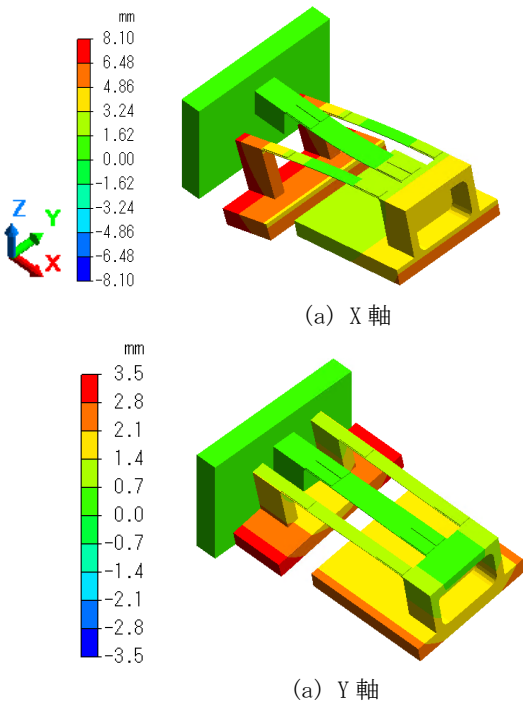


図3 2重共振3軸発電素子

#### ・製造方法

梁(SUS)と圧電セラミック(PZT)との接着は高強度のアクリル系接着剤を使用した。また、圧電セラミックの上部電極はFPCに接続され、下部電極も金属部材を介しFPCに接続される。それぞれの電氣的導通は導電性接着剤を用いた。

梁と台座、梁と振動体はそれぞれネジで固定し、EHが外因の影響を受けぬようケースで全体に覆った。

#### 〈3・1〉 応答周波数の解析値と測定値

EHをX軸、Y軸、Z軸の3軸方向に加振(50mG)した時、FEM解析(Femtet)による応答周波数とその実測値を図4に示す。

概ね、解析値と測定値が一致していることが分かる。測定点は図5に示す赤●の1点としたが、測定点によって周波数特性が異なる。

X 軸と Z 軸に 1 次共振として 2 つの共振ピークが見られ、2 つの共振周波数で大きな応力が発生する事が分かる。Y 軸については大きな共振ピークが 2 つ観察されないが、測定点が異なれば 2 つのピークが観察された。各軸で 2 つの共振ピークは離れているが、梁と重錘体の形状を変えることで 2 つの共振周波数の間隔を狭めることも出来、広い周波数帯域で発電することも出来る。即ち、環境の周波数に EH の共振周波数にチューニングする必要がなく、発電することが出来る。その為、汎用性に優れた発電が可能となり、環境振動に対し振動エネルギーを効率よく電気エネルギーに変換することが出来る。

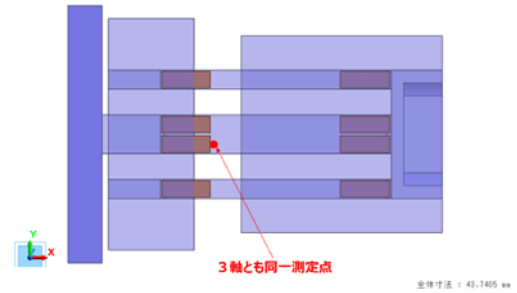
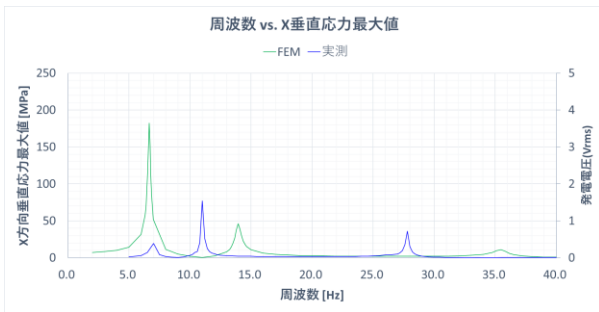


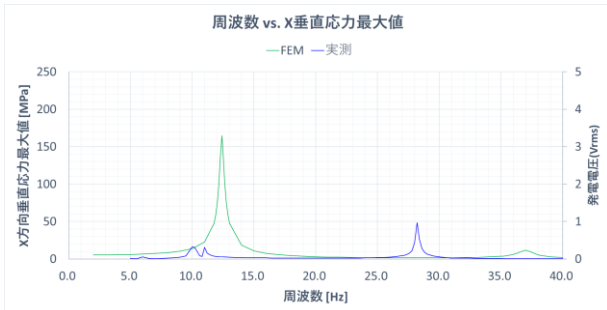
図5 応答周波数の測定点

(1) X 軸加振時の応答周波数



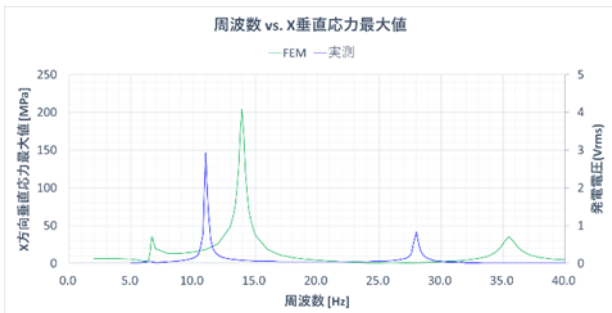
(b) X 軸

(2) Y 軸加振の応答周波数



(c) Y 軸

(3) Z 軸加振の応答周波数



(d) Z 軸

図4 X 軸, Y 軸, Z 軸加振の応答周波数

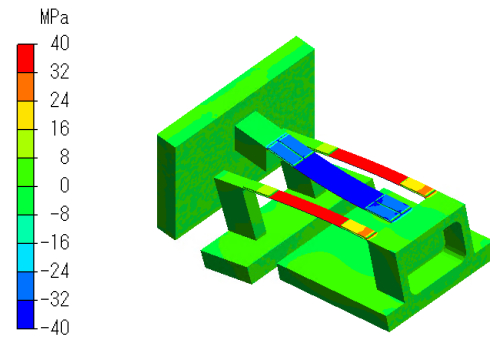
〈3・2〉 応力分布

EH を X 軸、Y 軸、Z 軸の 3 軸方向に加振した時の応力分布を図 6 に示す。X 軸加振の時は各梁に同一符号の応力が作用する。Y 軸加振の時は中央の梁は中心軸の左右で応力の符号が異なり、また根端部と先端部の梁で応力の符号が異なる応力が発生する。両脇の梁では根端部と先端部で異なる符号の応力が発生する。

Z 軸加振の時は中央に梁は根端部と先端部で応力の符号が異なり、両脇の梁では同一符号の応力が発生する。

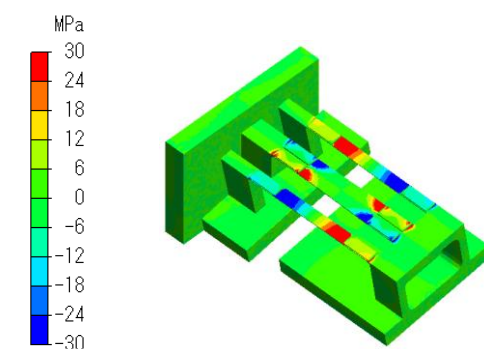
このように 3 軸加振で 8 個の電極に符号の異なる電荷が発生する。その為、ダイオードを使った発電用整流回路が不可欠となる。

(1) X 軸加振の応力分布



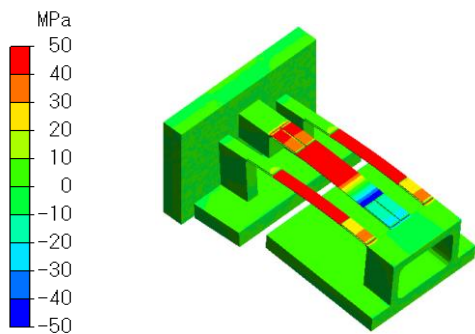
(a) X 軸

(2) Y 軸加振の応力分布



(b) Y 軸

(3) Z軸加振の応力分布



(c) Z軸

図6 X軸,Y軸,Z軸方向の力による応力分布

4. 発電用整流回路

本EHの発電用整流回路(LED点灯用)を図7に示す。8個の圧電素子毎にダイオードで整流し、倍電圧整流後の出力を合成(並列接続)する。倍電圧整流回路の出力段のコンデンサに8個の圧電素子に発生した電荷が徐々にチャージされる。

負荷回路に於けるLED間欠ドライバの動作として、前述のコンデンサがある一定電圧に達したときにLEDが発光するようにし、LEDの順方向電圧を下回ったら無駄な電流が流れないように回路を切断する。

発電量に応じて整流効率が最適化されるように、負荷側の電圧を2.0Vまたは3.3Vに切り替え用SWを設けた。微小な加速度20mGrmsでは整流効率は80%程度であった。

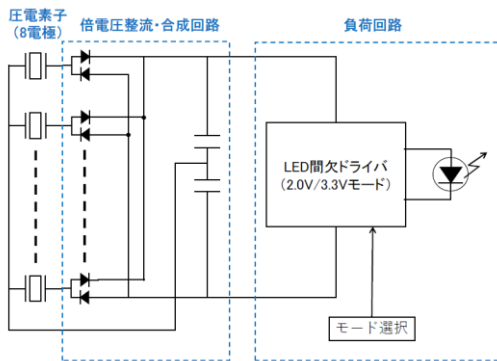


図7 発電用整流回路

5. 発電量の理論式と発電量

EHの発電量は、発電量=電圧×電流で示され、交流理論から発電量Pは次式となる。

$$P = \frac{\pi f d \sigma_p^2 d_{31}^2 Q_m^2}{\epsilon}$$

ここで、d:電極間距離(PZT厚)、ε:誘電率、d<sub>31</sub>:圧電定数、Q<sub>m</sub>:振動系のQ値、σ<sub>p</sub>:応力、S:電極面積、f:周波数である。

この式から分かる通り、誘電率:低い、圧電定数:大、周波数:高いという条件で発電量は増大する事が分かる。

本EHの圧電素子はPZT(チタン酸ジルコン酸鉛)であるが、AlN(窒化アルミニウム)の圧電定数は低いものの誘電率が大幅に低い事から、PZTに代わる候補と考えられる。非鉛を前提とするならKNNも有力な候補となる。また、発電量は周波数に比例する事から、本来なら高い共振周波数のEHを開発すべきであるが、環境の主な周波数は低い事を考慮して、敢えて共振周波数10Hzを目標に開発を行った。

(5・1) 非共振時の発電量

非共振時の発電量を図8に示す。各軸とも理論式に従い2次曲線となっている。発電量はほぼFEM結果に準じている。

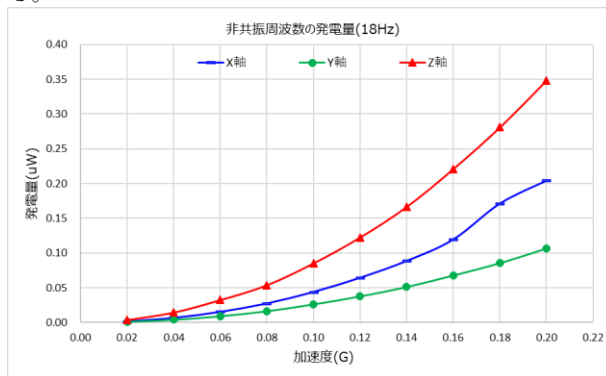


図8

(5・2) 共振時の発電量

一次共振時の発電量を図9に示す。発電量はZ軸加振のみ、2次曲線となっているが、X軸は曲線となり、Y軸は直線的である。解析結果と同様にY軸は発電しなかった。

(1) 一次共振周波数の発電量

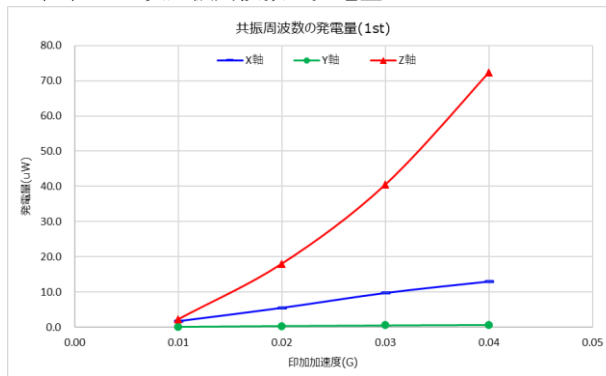


図9

(2) 二次共振周波数の発電量

二次共振時の発電量を図10に示す。発電量は全軸ともほぼ直線となる。

以上の事から、発電量が小さいときは二次曲線的に変化し、発電量が大きくなると一次曲線的になる。原因については今後に解析する。

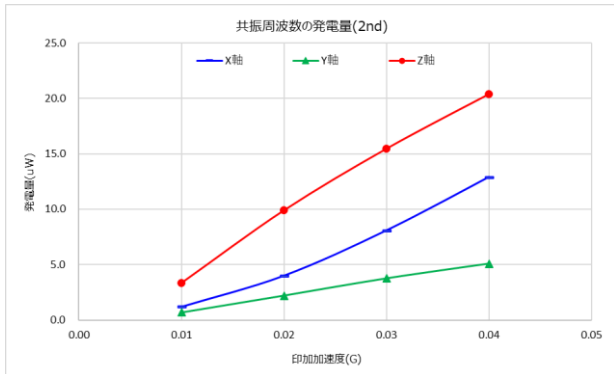


図10

共振時の発電量が極めて高い事から、本EHを手のひらに乗せて、僅かな手振れでも発電し、図7発電回路でLEDを間欠的に点灯させることができる。

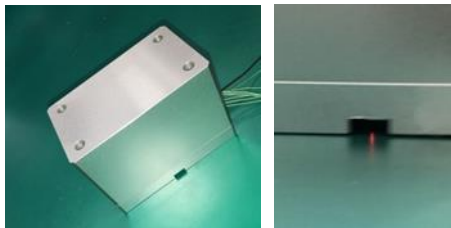


図11 手ぶれによる発電

6. まとめ

様々な方向成分を含んだ振動エネルギーを無駄なく電気エネルギーに変換することにより、高い発電効率を得ることが可能な発電素子（2重共振3軸発電型のEH）を開発した。

従来の発電素子は、工場内の装置等の稼働によって発生する比較的高い周波数（200Hz程度）の振動下に於いて適していたが、本発電素子は人の歩行等による、低い周波数（10Hz程度）の振動下においても発電可能であることがわかった。

今後、MEMS技術を用いたEHの開発を目指し、小型化を図る。小型化により日常の生活で携帯する事が出来、モバイル端末等の補助電源として用途が広がる可能性がある。加速度センサや角速度センサと同様に大きな市場が創出される可能性があると考えられる。

(1) 本間浩章・山田駿介・三屋裕幸・橋口原・年吉洋：「高パワー密度（31Mw/cm<sup>3</sup>/G<sup>2</sup>）を実現したMEMS環境振動発電素子とそのIoT応用」、第35回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム論文集, 30am3-PS-21 (2018)

(2) 平井翔太・神田健介・藤田孝之・前中一介：「多層PZT薄膜を用いた圧電エネルギーハーベスタおよび回路シミュレータモデル」、第35回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム論文集, 30pm4-PS-22 (2018)