

# MEMS 技術を用いた 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)

Development of Double Resonant 3-axis Energy Harvesting using MEMS Technology  
Kazuhiro Okada, Satoshi Era (Wacoh Corp.)

This paper describes a double-resonant 3 axial **E**nergy **H**arvesting using a MEMS technology. This EH consists of three beams made of SOI-substrate, two masses and piezoelectric thin films. Double resonance is given by two vibration systems, and has two resonance frequencies about all axis. 3-axis EH can generate high power from vibrations in all axis, and with a wide band frequency sufficiently. This EH can be mass-produced using Si-process.

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、PZT、圧電薄膜、SOI, MEMS  
(Energy Harvesting, Double resonance, 3-axis, All directions, PZT, Piezoelectric thin film, SOI, MEMS)

## 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、梁に 1 個の振動体が接続される。EH に対し垂直方向（上下）、或いは水平方向（左右）の振動によって振動体が振動する。エレクトレット型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（圧電型とエレクトレット型）は振動体を上下或いは左右方向に振動させる 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、発電帯域は振動体の形状で自由に変え

ることが出来、効率よく発電することが出来る。

また、本 EH は MEMS 技術を用いて作られ、EH に不可欠な振動体となる振動体基板（ガラス、Si、金属等）と EH を構成する SOI 基板を基板同士で接合することができ、大量生産が可能となる。

## 2. EH の構造

本 EH は SOI 基板と振動体基板から構成され、SOI 基板の表面と裏面をそれぞれ図 1 (a)、(b) に示す。SOI 基板の表面には PZT 圧電薄膜（チタン酸ジルコン酸鉛）が形成され、8 個の電極が配置される。第 1 の梁が中央部に配置され可撓部を有し、第 2 と第 3 の梁が第 1 の梁の両側に配置されている。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る領域と、第 2 と第 3 の梁の先端に第 2 の振動体が接合される領域を有し、共に凸部となっている（図 1 (b) 参照）。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 個ずつ圧電素子（合計 8 個）がそれぞれの梁上に形成されている。

SOI 基板の裏面の 2 か所の凸部に振動体（Si、ガラス、金属等）が接合され、ダイシング等で台座と 2 つの振動体が切り分けられる（図 2 及び図 7 参照）。

2 つの振動体の重心位置は SOI 基板上面より Z 軸下方向にある為、X, Y, Z 方向の振動に対し振動体は Z 軸方向に変位する。そのため、振動体の動きを上下方向に制限すれば、ストッパー構造となる。図 2 の構造では、振動体 1, 2 とベース Si との間に空間 1 が設けられ、振動体 1, 2 はその空間 1 で自由に動けるが、上方向の変位はベース Si で制限される。また、振動体 1, 2 と PKG（図 7 参照）の底面との間に空間 2 が設けられ、振動体 1, 2 はその空間 2 で自由に動けるが、下方向の変位は PKG の底面で制限される。2 つの振動体は Z 軸方向、即ち全方向に対して変位が制限され、ストッパー構造が構成されている。

また、EH は2つに振動系が折り返し直列状に配置されることから、EH のサイズを小型化する事が出来き、低価格化が可能となる。

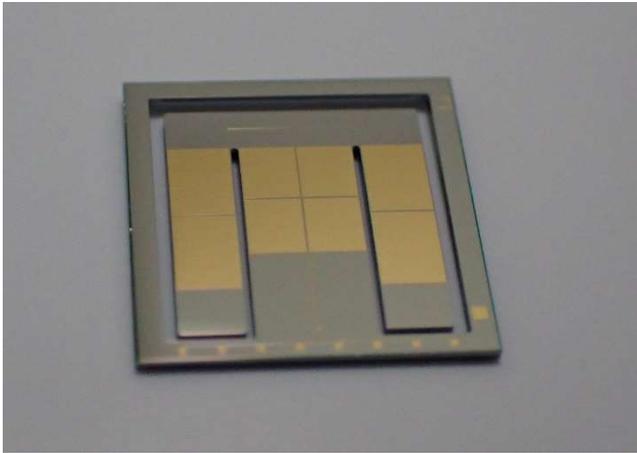


図 1 (a) SOI 基板の表面

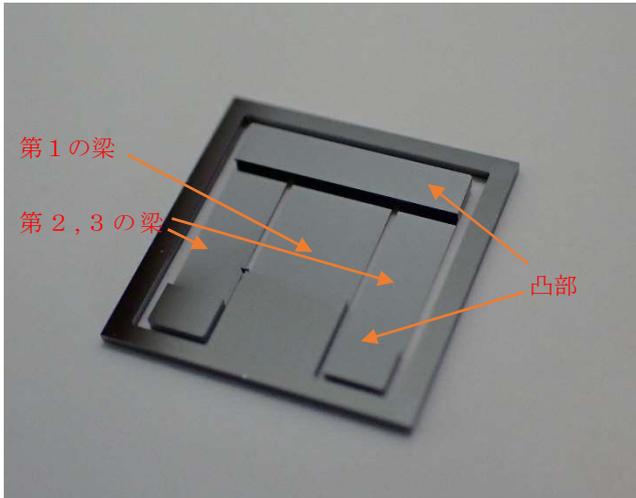


図 1 (b) SOI 基板の表面

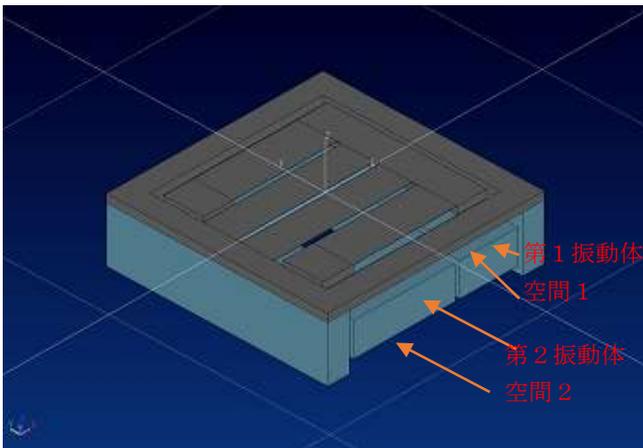


図 2 ストッパー構造

### 3. 2重共振3軸の原理

#### 〈3・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。図1に示されるようにEHは2つの共振系が直列に折り返されて配置され、2組のバネ系と振動体から構成されている。また、2つの振動系が互いに干渉し、幅広い周波数帯域で発電する事ができるようになっている。

##### ・周波数特性

図3に示す測定ポイント (S1~S6) に於けるX軸、Y軸、Z軸の周波数特性を図4 (a)~(c)に示す。単純な片持ち梁の共振特性は1次モードと2次モードが現れるあるが、本EHは1次モードの中に2つの共振ピークが現れる。

特に、X軸とZ軸の周波数特性に顕著に表れる。

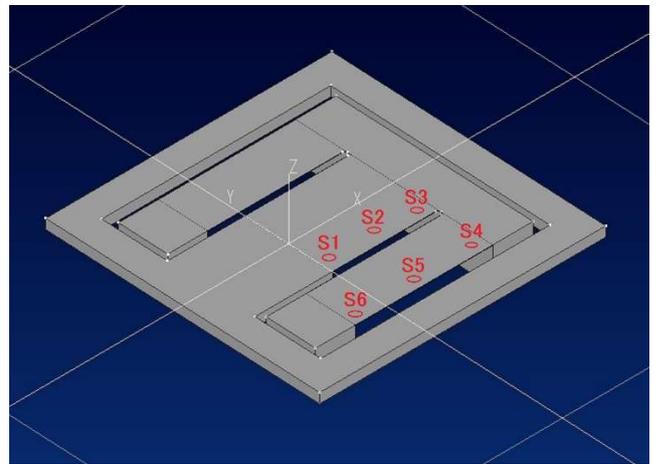


図 3 周波数特性測定点

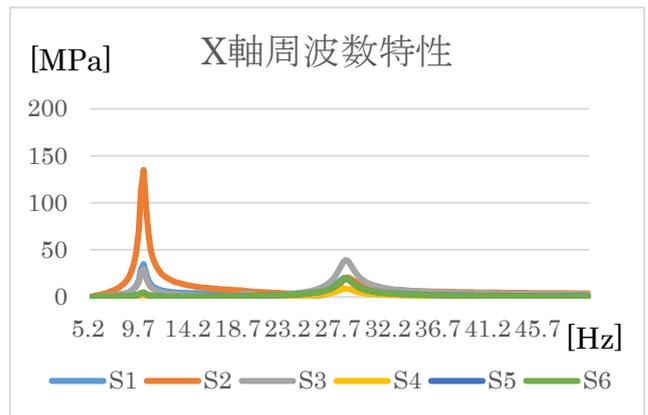


図 4 (a) X軸周波数特性

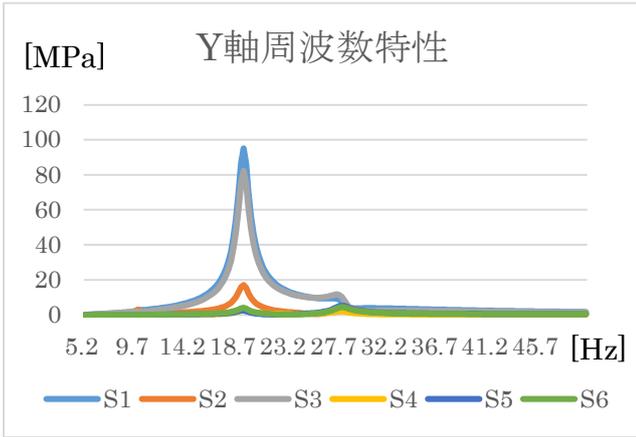


図 4 (b) Y 軸周波数特性

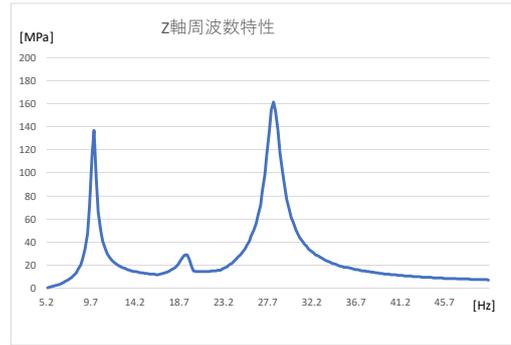


図 5 (c) Z 軸周波数特性 (応力合計値)

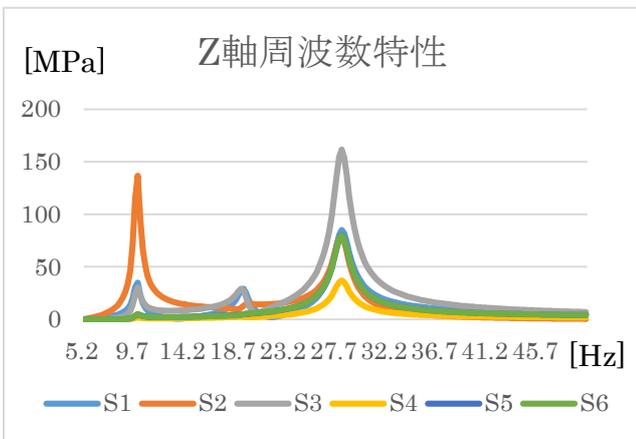


図 4 (c) Z 軸周波数特性

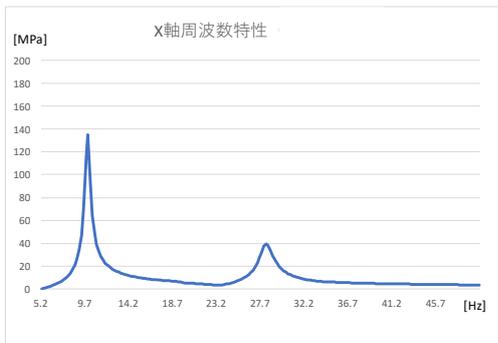


図 5 (a) X 軸周波数特性 (応力合計値)

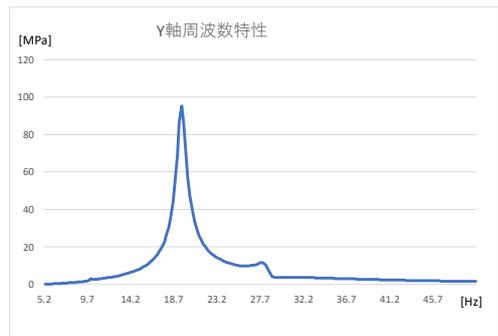


図 5 (b) Y 軸周波数特性 (応力合計値)

EH の発電量は整流回路を通して、各電極の発電量を合算する事が出来る。厳密に言えば、電極が配置された領域の応力の合計にすべきであるが、ここでは各測定点 (S1～S6) の応力を合計とし、それを図 5 (a)～(c) に示す。図 5 (a)～(c) の半値幅から分かる通り、各軸で発電する周波数帯域が広がっている。これは 2 つの振動体の相互干渉によって起こるものと思われる。この特性から広い周波数帯域で発電が可能となる。図 5 (a) と (c) で 1 次共振周波数と 2 次共振周波数のピークが乖離しているが 2 つの振動体の形状 (質量、重心位置) を変えることにより、1 次共振と 2 次共振の間隔を狭めることができ、発電可能な周波数帯域を広げることができる。

〈3・2〉 3 軸発電の原理

振動体に振動による 3 軸方向の加速度 ( $A_x, A_y, A_z$ ) 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 6 の如く応力が発生する。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、振動体 1, 2 は Z 軸方向に変位し、応力分布は図 6 (a) の如くなる。また、Y 軸方向の力  $F_y$  に対し X 軸回りに回転し、振動体 1, 2 は Z 軸方向の±方向に変位し、応力分布は図 6 (b) の如くなる。そして Z 軸方向の力  $F_z$  に対し Y 軸周りに回転し、振動体 1, 2 は Z 軸方向に変位し、応力分布は図 6 (c) の如くなる。

即ち、振動体は 3 軸方向の加速度 (振動) によって 3 次元空間で自由に変位し応力が発生し、3 本の梁に圧電素子を配置すれば、圧電効果で圧電素子の電極に電荷が発生する。この電荷を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。

尚、図 6 は特定の周波数での応力分布を示したが、応力分布は周波数で異なり、共振或いは非共振でも異なる。

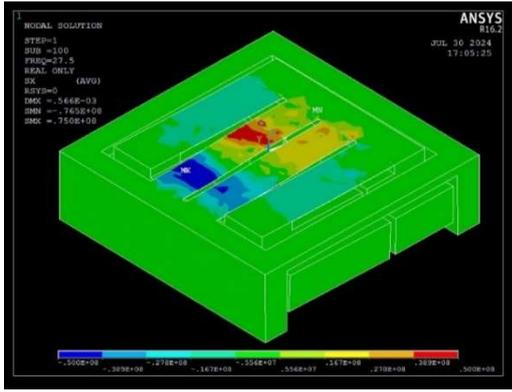


図 6 (a) X軸加速度作用時の応力分布

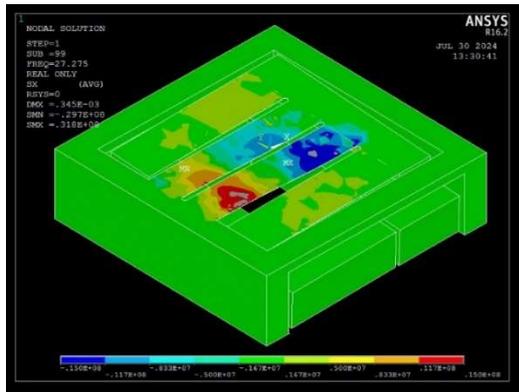


図 6 (b) Y軸加速度作用時の応力分布

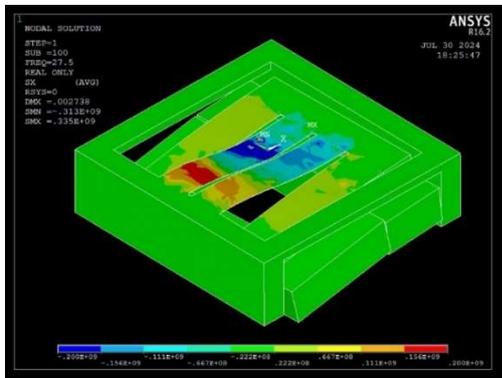


図 6 (c) Z軸加速度作用時の応力分布

#### 4. 製造方法

EHの製造工程を図7に示す。図7はEHの正確な構造の製造方法を示すものではなく、概略の製造方法を示すものである。

- Step1 : SOI 基板の表面に下部電極 (Ti/Au/Pt/SRO) と圧電膜 PZT を成膜する。
- Step2 : 上部電極を形成し、上部電極と PZT 膜をエッチングする。
- Step3 : 上部電極をパターンニングする。
- Step4 : 下部電極をエッチングする。
- Step5 : 活性層と BOX 層をエッチングする。

- Step6 : ベース Si を deep エッチングする。
- Step7 : 溝付振動体基板を準備し、SOI 基板と溝付振動体基板を接合する。
- Step8 : ダイシングで振動体と台座を切り分ける。
- Step9 : SOI 基板と振動体基板をダイシングし、個片化する。



(9) 振動体基板と SOI 基板のダイシング



図7 製造工程

上記製造工程で Step1～Step6 は一般的な圧電型デバイス（例えば、ジャイロセンサ）の製造工程と同じであるが、本 EH の特徴的な製造工程は Step7～Step9 である。Step7 で機械加工、ダイシングやエッチングで予め溝を形成した振動体基板を用意し、Step6 で作られた SOI 基板と振動体基板と接合する。Step8 で振動体基板の裏面をダイシングして、振動体と台座を切り分ける。Step9 で SOI 基板と振動体基板をダイシングして個片化する。以上の工程を以って EH 素子が完成する。

図8はEHがDIP PKG に内蔵された写真であり、Lid は取り外されている。

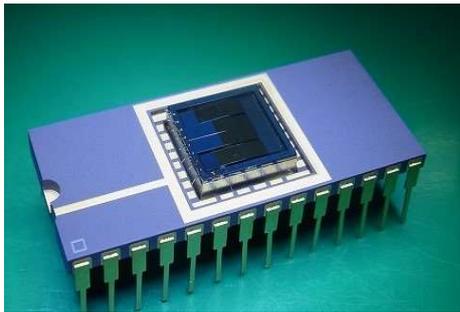


図8 PKG 後の EH

5. 発電量の理論式と発電量<sup>(3)</sup>

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。

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

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 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周波数領域にあることから、この領域で発電できる EH の開発が望まれる。

〈5・1〉非共振時の発電量

非共振時の発電量を図9に示す。各軸とも理論式と同様に2次曲線となっている。各軸の発電量はほぼ FEM 解析による応力の大きさに準じている。

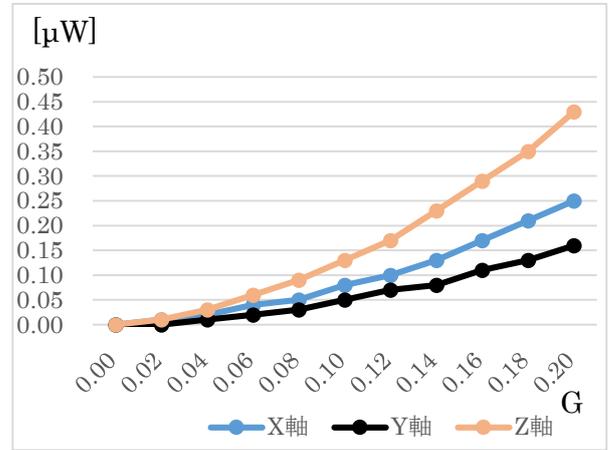


図9 非共振時の発電量

〈5・2〉共振時の発電量

本稿の1個のEHで2つの共振系を有することから、図2で示した第1番目（低い周波数）の共振周波数を一次共振周波数といい、2番目（高い周波数）を2次共振周波数といい、2つの共振周波数で測定した。

(1) 1次共振周波数の発電量

各軸の1次共振周波数での発電量を図10に示す。発電量は通りほぼ2次曲線的に変化する。

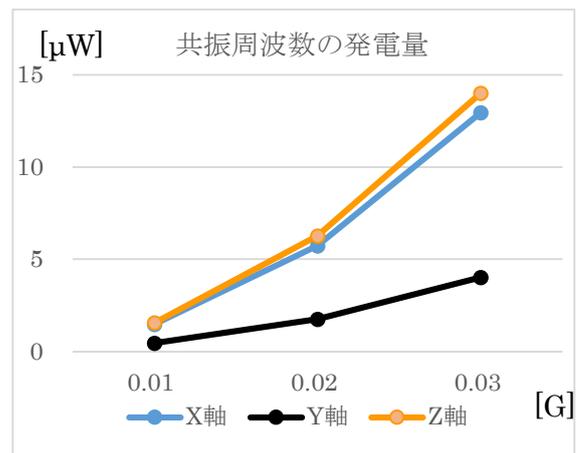


図10 共振時の発電量

(1) 2次共振周波数の発電量

各軸の2次共振周波数の発電量を図11に示す。発電量は全軸ともほぼ直線的に変化している。以上の事から、1次共振では二次曲線的に変化し、2次共振では直線的に変化する。2次共振で直線的に変化する原因は不明で、今後、解析する必要がある。

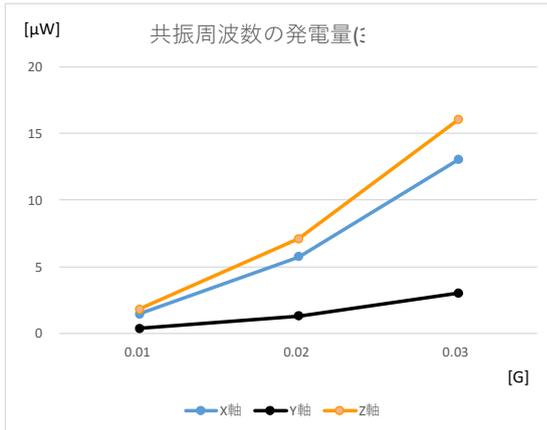


図 1 1 共振時の発電量

X軸、Y軸、Z軸方向の振動（各軸とも1次共振）に対し、0.03GでX軸の発電量が16.0μW、Y軸が3.0μW、Z軸が13.5μWであった。0.04G以上ではX軸加振の時ストッパーが作用し、振動体の動きが制限され、発電が不安定となる。前述の式に従えば、図11の結果から加速度1Gでの各軸の発電量は図12の如くなり、大きな発電量が得られることが分かる。なお、図10と図11の発電量は各電極の合算値である。共振時の発電量は周波数のずれでも大きく変化し、加振する加速度でも共振周波数は変わる。図10と図11の測定結果は誤差を含むので注意を要する。

	0.03G加振(μW)	発電量(mW/G <sup>2</sup> )参考値
X軸加振	16.0	17.6
Y軸加振	3.0	3.3
Z軸加振	13.5	14.9

図 1 2 各軸の発電量

## 6. 課題解決法

本EHは図2に示した通り、ストッパー構造を有するが、数十Gで破損する恐れがある。解決策として加速度センサやジャイロセンサで使われている技術を応用することが考えられる。加速度センサやジャイロセンサはスマートフォンやゲーム機器（勿論、自動車）に多く使われ、1.5mからの落下に耐える必要がある。1.5mからの落下で発生する加速度は10,000G程度であり、この加速度に耐える構造はメカニカルストッパーとエアードンピング効果である。

エアードンピングは空気の粘性を使うものであり、固定部と可動部の間隔を狭める必要がある。図1は片持ち梁構造に為、応力を大きくするために変位を大きく必要があるが、両持ち梁構造は変位が少なくても大きな応力が発生する。実際の開発した両持ち梁型のEHを図13に示す。図13は2重共振3軸EHであり、サイズは左図が10mm□、右図5mm□である。

図13は振動体が接合されていないが、図7で示した製造法を利用でき、SOI基板と振動体基板を接合すること

で、バッチ処理ができ大量生産が可能となる。今後両持梁の開発を進める予定である。

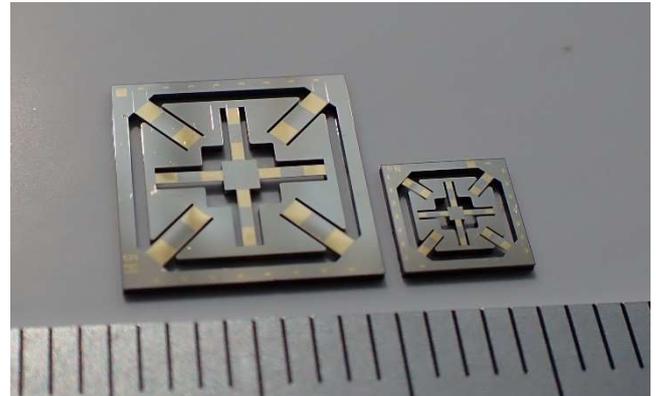


図 1 3

## 7. 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、高い発電効率の小型発電素子(EH)をMEMS技術を用いて開発した。

本EHは、振動体が3次元空間で自由に変位し、3軸方向の振動に対し発電し、しかも、2つの共振系を有する為、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。また、本EHはMEMS技術を用いて作られ、振動体となる振動体基板（ガラス、SI、金属等）とSOI基板を基板同士で接合することができ、バッチ処理ができ大量生産が可能となる。

更に、本EHは小型化(10mm□⇒5mm□)を図ることができ、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。加速度センサやジャイロ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。

今後は、ストッパーの構造を最適することで環境にある加速度でも発電できるようにし、更にモバイル端末で求められる耐衝撃性を実現する。

## 文 献

- (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ナジーハーベスタおよび回路シュミレータモデル」、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)
- (3) 岡田和廣、江良聡、高橋秀徳、大久保健、半田直博、熊谷清哉：「圧電素子を用いた2重共振3軸発電素子の開発」、第39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, 14P5-P-35(2022)