

多自由度系を用いた振動発電装置の設計

Design of Multiple Degree of Freedom Vibration Power Generator

精密工学専攻 31号 寺内 昇平
Shohei Terauchi

1. 緒言

微小電気機械システム(Micro Electro Mechanical System, 以下 MEMS)や自動車や家電などの様々な物がインターネットに繋がる「モノのインターネット」(Internet of Things, 以下 IoT)の技術発展に伴い、ワイヤレスセンサを用いたヘルスマニタリングへの期待が高まっている。しかし、このネットワークを形成するセンサへの配線による電源確保や電池交換がセンサネットワークの課題である。解決策として機械から発生する振動を用いて発電を行う振動発電装置⁽¹⁾がある。しかし、現状の振動発電装置では発電量が少なく、共振周波数から外れると発電量が著しく低下してしまい、周波数が変化する振動に対して発電を行うことが困難である。

本研究では、磁石部分とコイル部分が独立した振動系を持つ多自由度系の電磁誘導型の振動発電装置を用いることで、発電量の増幅と効率の良い発電が行える周波数帯域の広帯域化を行う。また、磁石とコイルの間に作用するローレンツ力による粘性減衰係数と電気抵抗、発電量の関係を明らかにし、発電装置を取り付ける機械の共振周波数を考慮した多自由度系の電磁誘導型の振動発電装置の最適な設計手法を提案する。また、小型化が容易な圧電型の振動発電装置を多自由度化することで発電可能な周波数の広帯域化を行い、振動発電装置の小型化の実現性を考察する。

2. 電磁誘導型の振動発電装置の問題と対策

3D プリンタを用いて電磁誘導型の振動発電装置を製作し、一自由度系と二自由度系の発電量の比較を行う。

2.1 電磁誘導型の振動発電装置の製作

振動発電装置の CAD モデルを Fig. 1 に示す。発電装置はコイルと磁石で構成された二自由度系であり、円筒状に巻かれたコイル(共振周波数 30.5Hz, 内部抵抗 2Ω), その内側にネオジム磁石(共振周波数 35.5Hz)が、それぞれバネによって支持されている。また、コイルを構成するエナメル線の両端に金属皮膜抵抗を接続する。

Fig. 2 に 3D プリンタを用いて製作した振動発電装置を示す。発電装置は、磁石またはコイルに支持部品を取り付け固定することで自由度の変更が容易に行える。

2.2 電磁誘導型の振動発電装置の加振試験

加振機を用いてチャープサイン信号(増加速度 0.5Hz/s)を入力する。加振力の大きさは、発電装置の基礎部分に加わる加速度が常に 10m/s^2 となるように入力信号を制御する。また、コイルに接続した外部抵抗で生じる電力を測定し、高速フーリエ変換(Fast Fourier Transform, 以下 FFT)を行うことで評価する。外部抵抗の大きさはインピーダンスマッチングの影響を考慮して 2Ω とした。なお、本研究では外部抵抗で消費する電力量を回収可能な発電量として評価を行う。

Fig. 3 に一自由度系と二自由度系の振動発電装置の発電量の比較を示す。振動発電装置が一自由度系の場合には、コイル部分と磁石部分どちらの場合においても共振周波数にて発電量が大きくなっている。しかし、共振周波数でない周波数において発電量が小さく、効率の良い発電が行える周波数範囲が狭いことが確認できる。一方で、二自由度系の場合では、コイル部分と磁石部分の共振周波数に挟まれた周波数帯

域にて発電量が大きくなっており、効率の良い発電が行われる周波数の範囲が幅広くなっている。以上のことから発電装置を二自由度系に拡張することで、効率の良い発電を行える周波数の範囲の広帯域化を行うことができた。

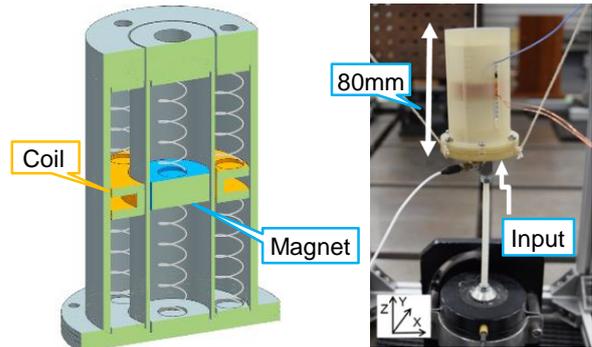


Fig. 1 CAD model

Fig. 2 Experimental setup

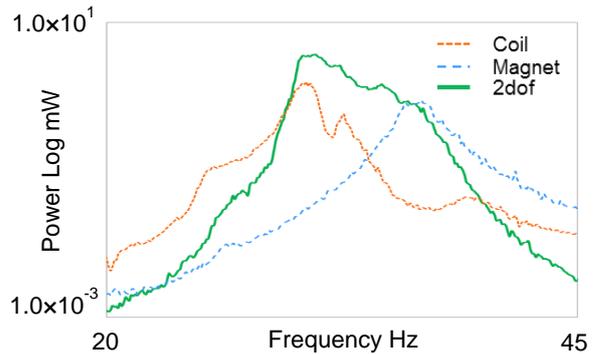


Fig. 3 Generated electric power

3. 電磁誘導型の振動発電装置の最適化

二自由度系の電磁誘導型の振動発電装置にて装置を設置する対象物の共振周波数を考慮した設計条件を考察する。

3.1 発電理論

ローレンツ力とファラデーの法則の関係から粘性減衰係数と発電量の関係を考える。磁束密度 $B[\text{T}]$ の磁界中で長さ $L[\text{m}]$ の導線を速度 $v[\text{m/s}]$ で動かした際に外部抵抗 $R_{out}[\Omega]$ を接続した内部抵抗 $R_{in}[\Omega]$ のコイルに作用するローレンツ力 $F[\text{N}]$ は $F=BIL$ ($I[\text{A}]$:電流)の関係から

$$F = \frac{B^2 L^2}{R_{out} + R_{in}} v \quad (1)$$

ここで、松岡・藤井⁽²⁾によれば上記の式の数値項に掛かる係数を粘性減衰係数 $c[\text{Ns/m}]$ とすると

$$c = \frac{B^2 L^2}{R_{out} + R_{in}} \quad (2)$$

粘性減衰係数は、磁束密度、コイルの長さ、外部抵抗の大きさによって変更が可能である。特に外部抵抗の値は実験でも容易に変更可能なために粘性減衰係数の大きさの調整も容易に行える。ここで、外部抵抗で消費する電力量を回収可能な発電量として考えると起電力 $V[\text{V}]$ が発生するときコイルに接続した外部抵抗で消費される電力 $P[\text{W}]$ はファラデー

一の法則 $V=BvL$ より式(3)となる。

$$P = \frac{R_{out}}{(R_{out} + R_{in})^2} V^2 = \frac{R_{out}}{R_{out} + R_{in}} cv^2 \quad (3)$$

外部抵抗で消費される電力は、粘性減衰係数と速度が大きくなると増加するが、同時にインピーダンスマッチングの影響を受けることが分かる。

3.2 副振動系の共振周波数の選定

発電効率が良い副振動系の周波数の組み合わせを解析により明らかにする。なお、発電装置を取り付ける対象物を主振動系、発電装置の磁石部分とコイル部分を副振動系と呼び³⁾、Fig. 4に示すような主振動系と二つの副振動系を持つ三自由度系にて計算を進める。本研究では、主振動系の共振周波数 f_0 [Hz] を中心周波数として、それぞれ副振動系の剛性値を変化させることによって、副振動系の共振周波数 f_1 [Hz] および f_2 [Hz] を変化させることで計算を行う。

$$f_{1,2} = f_0 \mp \Delta f_{1,2} \quad (4)$$

Fig. 5に主振動系の共振周波数を $f_0=33$ Hz とした場合に各副振動系の共振周波数を変化させた場合の発電量の推移を示す。なお、外部抵抗とコイルの内部抵抗は共に 2Ω とする。主振動系に対する副振動系の共振周波数は発電量に影響を及ぼすことが分かる。また、主振動系の共振周波数において値が大きくなっている。これは副振動系 m_1 と副振動系 m_2 が f_1 [Hz] から f_2 [Hz] の周波数帯域において逆位相の振動を行うので副振動系間の相対速度の増幅が行われ、結果として発電量が大きくなったと考えられる。

Fig. 6に外部抵抗が 2Ω の場合の発電量の累積の結果を示す。副振動系の共振周波数が主振動系の共振周波数から $\Delta f_{1,2}$ [Hz] 変化することによって発電量の合計値が変化し、ある値で極大値を持つことが分かる。また、副振動系の共振周波数が主振動系の共振周波数に近い場合、発電量の合計値が小さいことが分かる。これは二つの副振動系が逆位相で振動する周波数の範囲が狭いためである。特に $\Delta f_{1,2}=0$ Hz の場合、二つの副振動系が同位相の振動を行うので、相対速度は大きくならない。結果として、発電量の合計も大きくならないと考えられる。 $\Delta f_{1,2}=2.5$ Hz 付近に最大値が得られていることから $\Delta f_1 = \Delta f_2 = 2.5$ Hz を最適条件として研究を進める。

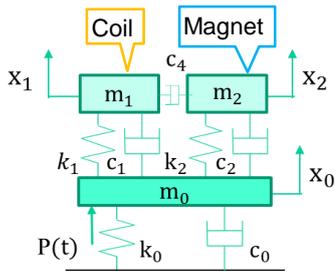


Fig.4 model (3dof)

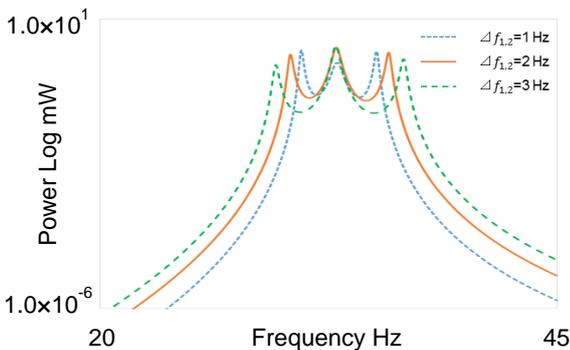


Fig.5 Calculated power

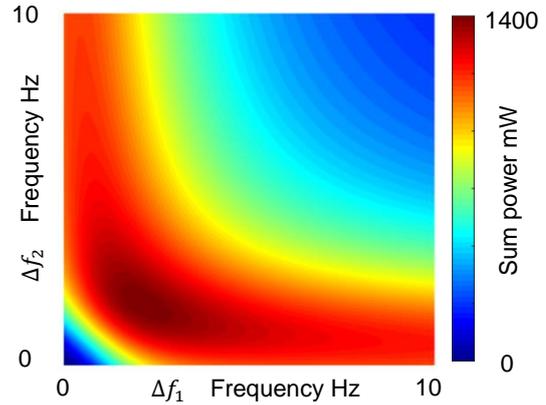


Fig.6 Power relationship with respect to Δf_1 and Δf_2

3.3 外部抵抗の影響

外部抵抗が磁石とコイルの間に発生する粘性減衰係数と発電量に与える影響について実験と解析を行うことで検証する。

3.3.1 外部抵抗と粘性減衰係数の関係

発電装置のコイル部分に加速度ピックアップを取り付け、加振実験を行い周波数応答関数(Frequency Response Function, 以下 FRF)を計測する。また、コイルに接続した外部抵抗 R_{out} の値を変化させて粘性減衰係数の変化について検証する。

Fig. 7に外部抵抗を変化させたときの FRF の比較を示す。外部抵抗が大きくなるにつれて FRF のピークが大きくなっている。これは外部抵抗の値が大きくなるにつれて粘性減衰係数が小さくなったためである。計測した FRF から半値幅法を用いて減衰比を算出し臨界粘性減衰係数との関係を用いて粘性減衰係数を算出した結果、外部抵抗 $R_{out}=0.1, 1, 10, 30, 50\Omega$ のとき、粘性減衰係数は $c=0.66, 0.57, 0.46, 0.45, 0.43$ Ns/m となった。この結果から外部抵抗と粘性減衰係数は反比例の関係になっており、式(2)の傾向と一致した。以上のことから外部抵抗の大きさによって減衰値の調整が可能であることがわかった。

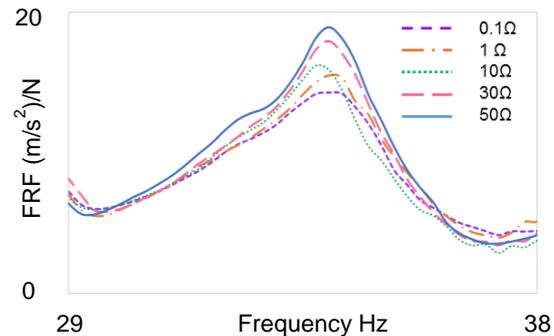


Fig.7 System FRF change in function of external resistance

3.3.2 外部抵抗と発電量の関係

外部抵抗が粘性減衰係数に影響を及ぼすことは、3.3.1 項にて明らかになった。その一方で粘性減衰係数は副振動系間の相対速度にも影響を及ぼす。そこで本項では、Fig. 4に示した解析モデルにおいて式(3)を用いて外部抵抗と発電量の関係を計算と実験から検証する。なお、この計算では主振動系の共振周波数を $f_0=33$ Hz、コイルの内部抵抗 $R_{in}=2\Omega$ として計算を進める。

Fig. 8に外部抵抗と副振動系の周波数の組み合わせによる発電量の累積の関係を示す。外部抵抗の値に関係なく $\Delta f_1 = \Delta f_2 = 2.5$ Hz を最適条件として研究を進める。

$f_{1,2}=2.5\text{Hz}$ 付近に最大値が現れていることから外部抵抗の値は、最適な副振動系の周波数の組み合わせに影響を及ぼさないことが分かる。また、どの周波数の組み合わせの場合においても外部抵抗 $R_{out}=2\Omega$ 周辺において最大値が現れていることからインピーダンスマッチングの影響が現れていることが分かる。その一方で、 $\Delta f_{1,2}=2.5\text{Hz}$ 付近において外部抵抗がインピーダンスマッチングでない値のときも他の周波数の組み合わせの場合と比較すると比較的大きな発電量が確保できることが分かる。

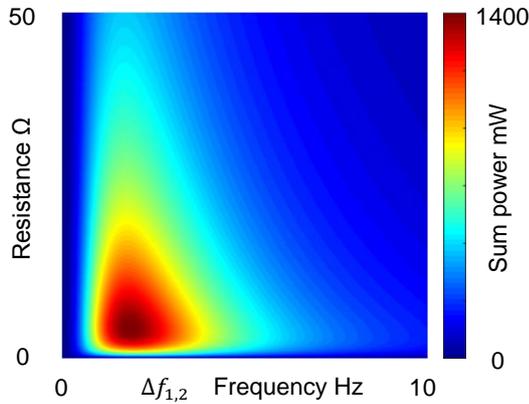


Fig.8 Power relationship with respect to $\Delta f_{1,2}$ and external resistance

外部抵抗と発電量の関係を発電装置単体での加振実験を行うことで確認する。本実験では、コイルの共振周波数を $f_1=30.5\text{Hz}$ 、磁石の共振周波数を $f_2=35.5\text{Hz}$ ($\Delta f_1=\Delta f_2=2.5\text{Hz}$)、コイルの内部抵抗 $R_{in}=2\Omega$ として実験を行い、外部抵抗の値を変化させて発電量を測定した。

Fig. 9 に外部抵抗と発電量の累積の関係を示す。外部抵抗 $R_{out}=2\Omega$ の際に発電量の累積が最大値となっている。内部抵抗と外部抵抗の値が等しいときに発電量の累積が最大になっていることから、インピーダンスマッチングの影響が発電量に現れていることが分かる。以上のことから外部抵抗によって調整が可能な磁石とコイル間に発生する粘性減衰係数を考慮するよりも、インピーダンスマッチングを考慮した方が発電量に対しての寄与が大きいことが分かった。

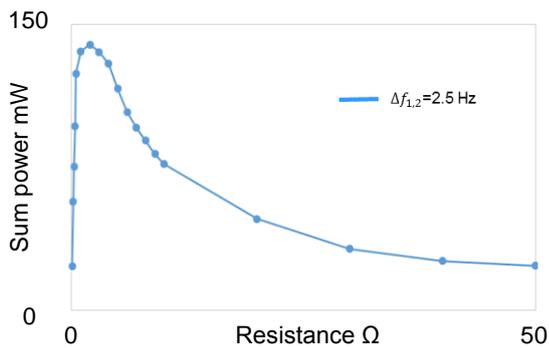


Fig.9 Power relationship in function of external resistance

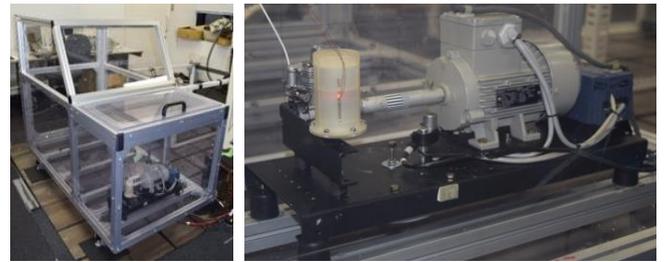
4. 自動車の模擬モデルへの適用

自動車の模擬モデルを対象として、考案した振動発電装置の副振動系の周波数の組み合わせとインピーダンスマッチングを考慮した外部抵抗の値の有用性を検証する。

4.1 自動車の模擬モデルの振動特性把握

入力周波数変動する機械として、Fig. 10 (a)に示す自動車模擬モデルを用いる。振動の発生源をエンジンとして振動発電装置を取り付ける場所の RPM マップを測定し、振動特性を把握する。

Fig. 11 にエンジン回転時の加速度応答の RPM マップを示す。RPM マップを見ると 1980rpm、33Hz において加速度応答が大きくなっている。これはエンジンの共振周波数とエンジンの回転数(回転一次成分)が一致したためだと考えられる。本研究では、このエンジンの共振周波数 33Hz に着目し実験を進める。



(a) Car model (b) Vibration power generator

Fig.10 Experimental setup

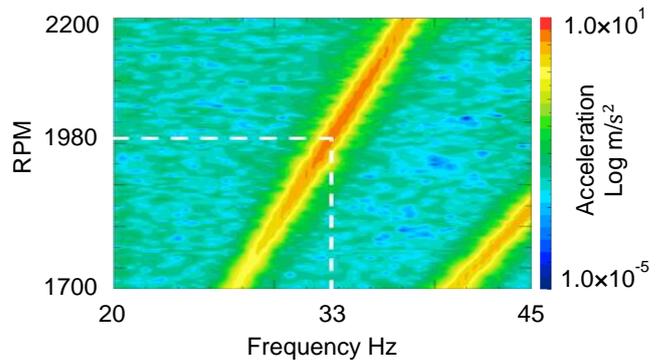


Fig.11 RPM map

4.2 実稼動状態での発電量

自動車の模擬モデルに振動発電装置を取り付け、エンジンの実稼動状態において効率的な発電を行うことができるか実証試験を行う。Fig. 10 (b) に振動発電装置の設置状態を示す。一自由度系の振動発電装置(コイル部分の共振周波数が 33Hz)と 3 章で考案した最適条件を満たした二自由度系の振動発電装置(コイル部分の共振周波数が 30.5Hz、磁石部分の共振周波数が 35.5Hz、中心周波数 $f_0=33\text{Hz}$ として $\Delta f_1=\Delta f_2=2.5\text{Hz}$)に調整した振動発電装置にて発電量の比較を行う。なお、コイル部分の共振周波数は、コイル部を支持するバネを変更することによって調整を行った。また、コイルに接続する外部抵抗は 2Ω である。

Fig. 12 に一自由度系の振動発電装置での発電量の RPM マップ、Fig. 13 に二自由度系の振動発電装置での発電量の RPM マップをそれぞれ示す。これらの RPM マップを比較すると一自由度系の振動発電装置では 1980rpm、33Hz 周辺において発電量が大きくなっている。その一方で、二自由度系の振動発電装置では 1800rpm、30Hz から 2160rpm、36Hz の幅広い周波数の帯域にて大きな発電量が確認できる。以上のことから振動発電装置を多自由度化することによって効率の良い発電が行える周波数の帯域を広く出来ることを自動車の模擬モデルにて確認した。

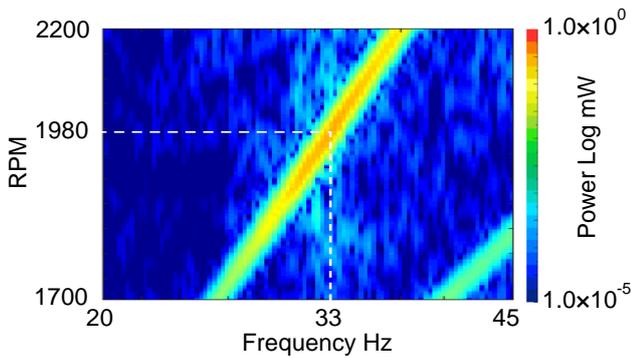


Fig.12 RPM map of power with 1dof

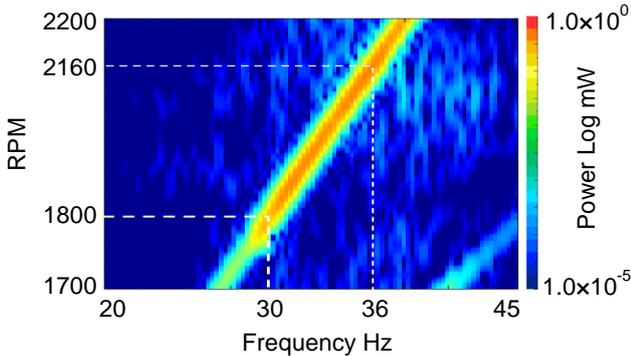


Fig.13 RPM map of power with 2dof

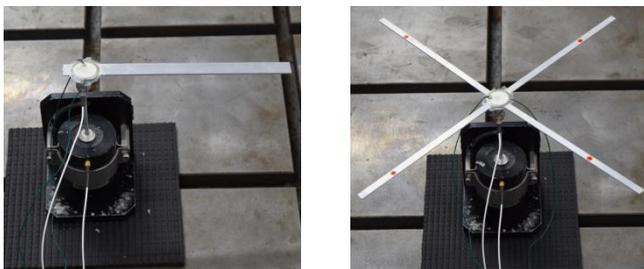
5. 圧電型の振動発電装置の試作

MEMS 技術の発展により、発電装置の小型化が期待されている。しかし、電磁誘導方式の振動発電装置では、磁石とコイルの相対運動を考慮する必要があり、発電装置の小型化が難しい。その一方で、圧電方式の振動発電装置は圧電効果を使用した発電方式で小型化に適している⁽⁴⁾。本章では、複数の片持ち梁の共振周波数を密集させることで発電可能周波数の広帯域化を行い、発電装置の小型化の可能性を検討する。

5.1 発電装置の製作

Fig. 14 に製作した振動発電装置を示す。一自由度系の梁(共振周波数 20.5Hz)と長さが微小に違う四つの梁(共振周波数 18.5, 20, 21, 22.5Hz)の結合中心部に圧電素子(φ 35mm)を貼り付け、圧電素子に金属皮膜抵抗を接続した。

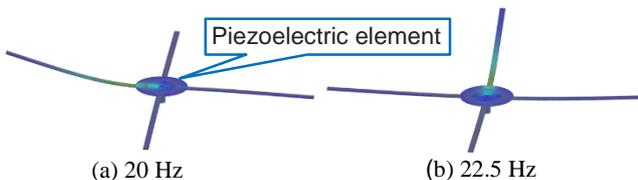
Fig. 15 に作成した有限要素モデルのモード形状を示す。共振周波数は梁の長さを変えることで調整した。梁の根本に取り付けた圧電素子に応力が発生することがわかる。



(a) Single degree

(b) Multiple degree

Fig.14 Experimental setup



(a) 20 Hz

(b) 22.5 Hz

Fig.15 FEM-model mode shapes

5.2 振動発電装置の加振試験

加振機を用いてチャープサイン信号(増加速度 0.5Hz/s)を入力する。加振力の大きさは、発電装置の基礎部分に加わる加速度が常に 1m/s^2 となるように入力信号を制御した。

Fig. 16 に一自由度系と多自由度系の発電方式の振動発電装置における発電量の比較を示す。一自由度系の振動発電装置においては、一つの共振周波数にて発電量のピークが表れている。しかし、電磁誘導方式の振動発電装置と同様に圧電方式の振動発電装置でも共振周波数でない周波数において発電量が小さく、発電可能な周波数範囲が狭いことが確認できる。その一方で、多自由度系の振動発電装置では、四つの共振周波数にて発電量のピークが表れており、発電可能な周波数帯域を広くすることができた。個々の共振周波数にてピークの大きさが異なるのは、圧電素子の取り付け位置によって、圧電素子が応力を受ける面積が異なるためだと考えられる。以上のことから圧電素子を用いた振動発電装置では、個々の梁の共振周波数を密集させることによって、発電可能な周波数帯域の広帯域化を行うことができた。

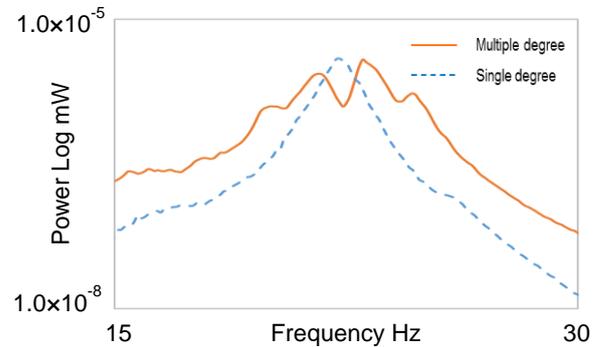


Fig.16 Generated electric power of piezo

6. 研究成果

- (1) 二自由度系の振動発電装置によって発電量の増幅と効率の良い発電を行うことができる周波数の範囲の広帯域化とが行えた。
- (2) 外部抵抗を変化させることで磁石とコイル間に発生する粘性減衰係数を調整することが出来た。また、効率の良い発電を行うためにはインピーダンスマッチングを考慮する必要があることを確認した。
- (3) 自動車の模擬モデルを対象に 3 章で考案した最適条件を適用した二自由度系の振動発電装置を製作した結果、エンジンの実稼動状態で発電の効率化が出来た。
- (4) 圧電方式の振動発電装置において、梁の共振周波数を密集させることで発電可能な周波数の広帯域化を行い、多自由度系の振動発電装置の小型化の可能性を示した。

参考文献

- (1) N. Okubo, T. KUNISAKI, T. TOI, Development of Vibration Damper for Energy Harvesting, IMAC2014, (2014).
- (2) 松岡太一, 藤井遊介, 発電式動吸振器による標識柱の振動低減, 日本機械学会 Vol.81, No.826, (2015).
- (3) 寺内昇平, 大久保信行, 戸井武司, 発電効率を向上させる多自由度振動発電機の設計手法, 日本機械学会関東支部総会講演会講演論文2016(22), (2016).
- (4) 井上竜太, 振動発電を利用したエコ工事振動対策技術の開発, 竹中技術研究報告, No.68, (2012).