

非軸対称の円板モードを考慮した圧電振動発電

土屋 寛太郎^{*1} 森山 裕幸^{*2} 岩森 暁^{*3}

Vibration Power Generation with Piezoelectric Element Considering Non-axisymmetric Mode of Circular Plate

by

Hirotarou TSUCHIYA^{*1}, Hiroyuki MORIYAMA^{*2} and Satoru IWAMORI^{*3}

(Received on Mar. 31, 2016 and accepted on Jul. 7, 2016)

Abstract

This paper describes the characteristics of electricity generation using a piezoelectric element installed on a circular plate subjected to harmonic point force. The excitation position deviates from the center of the plate to easily excite non-axisymmetric vibration modes, which have the modal line passing through the central point of the plate. The piezoelectric element is installed on the reverse side of the excitation and at the same position as the excitation. We also consider that another piezoelectric element has a symmetric arrangement via the central point to the original position. In this system, vibration energy is converted into electrical energy via electro-mechanical coupling between the plate vibration and piezoelectric effect. The electricity generation characteristics are estimated experimentally from the electric power in the electricity generation, the mechanical power supplied to the plate, and the electricity generation efficiency which is derived from the ratio of both powers. In particular, the electricity generation characteristics of one piezoelectric element are compared with those of two elements in the non-axisymmetric vibrator modes. As a result, the higher order mode is better than the lower order mode in the electricity generation efficiency, being smaller than the lower order mode in the electric power because of the complication of the modal shape in the higher order.

Keywords: Electromechanical coupling, Energy harvesting, Piezoelectric element, Higher order mode, Thin circular plate

1. 緒言

未使用の振動エネルギーを回収し電気エネルギーに変換する方法として、圧電素子を表面に貼付したはり構造が良く用いられ、外力等ではりが振動する際に生じる圧電素子の伸縮により、振動エネルギーの一部は電気エネルギーに変換される¹⁾。このような振動発電における発電特性は、圧電素子の力学的挙動に依存することになるが、一方、圧電素子自体の機械的性質に加え、発電時の力学的挙動は振動系全体の振動特性にも深く関与することになる。そのため発電特性を理論的に検討する場合、圧電素子を含む振動系の振動特性と圧電素子の電気的特性間の関連を考慮する必要がある^{2,3)}。

このようなシステムを実用化するためには、従来取り上げられてきたホスト構造の基本振動モードだけでなく、高次モードの振動特性と圧電素子の電気特性を詳細に把握することが重要である。また、上記の発電システムは

単純なはり構造のみを取り上げており、実用化のためには汎用性の高い板構造の特性も検討する必要がある。

そこで本研究では板構造の中で最も基本的な円板を取り上げ、表面に圧電素子を貼付した単純な発電システムを用い、加振機により周期的な点加振力を加えたときの発電特性について検討する。その中でも特に本研究では、研究事例の少ない非軸対称な円板の振動モードに注目している。

2. 実験装置及び方法

実験には半径 $a_c=153$ [mm]で板厚 $h_c=3$ [mm] のアルミニウム合金製円板 (A5052)を採用し、Fig.1(a)に示すような実験装置に設置している。円板は鋼製フランジ間に固定され、小型加振機により加振される。加振点は非軸対称モードが発生しやすい円板中心から半径 a_c の40 [%]の位置に水平移動し、加振周波数はマルチファンクションジェネレーター、加振力は加振機可動部に取り付けたロードセル及びFFTアナライザーで調整、確認している。このような発電実験時の円板挙動は、面上に設置した加

*1 総合理工学研究科総合理工学専攻博士課程

*2 工学部動力機械工学科教授

*3 工学部機械工学科教授

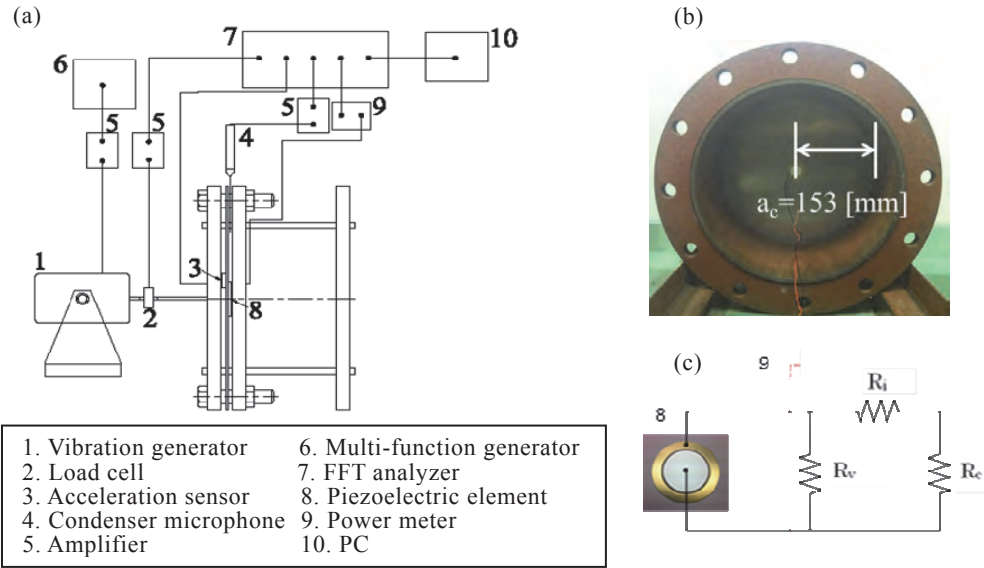


Fig.1 Experimental apparatus.

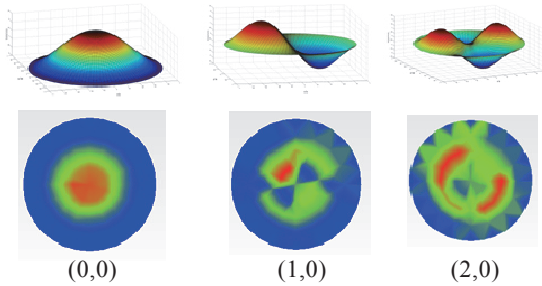


Fig.2 Modal shape.

速度センサーとFFTアナライザーで測定した加速度で評価し、得られた加振点近傍の加速度と加振力から円板への供給パワー P_m を求めている。

一方、発電には Fig.1(b)に示すように円板表面(裏面同位置が加振点)に貼付した圧電素子を用い、圧電素子は Fig.1(c)に示す回路に結線されている。図中の R_e は電力消費用抵抗、 R_v と R_i は電力計に組み込まれている電圧計と電流計の抵抗である。発電特性はFFTアナライザーによる電圧 v 及び電力計による電力 P_e で評価するが、それらは加速度と同様に加振力を変化させて計測されている。これら P_m と P_e から発電効率 P_{em} を以下のように定義し、特段の表記がない場合、 P_e は円板上に貼付された圧電素子による総電力を示すこととする。

$$P_{em} = \frac{P_e}{P_m} \times 100[\%] \quad \cdots(1)$$

なお、本実験における加振周波数帯は、 $f=0\sim 1000$ [Hz] に設定している。また本実験では、円板振動の円周方向次数を n 、半径方向次数を m とし、振動モードを (n,m) と表示する。Fig.2はそれぞれ本実験で取り上げる(0,0)、(1,0)、(2,0)次モードの理論解析によるモード形状(上段)と実験モーダル解析の結果(下段)をそれぞれ示しており、色が赤くなるほど振幅が大きくなっている。このとき、各モードの発電特性を詳細に検討するため、モードに応

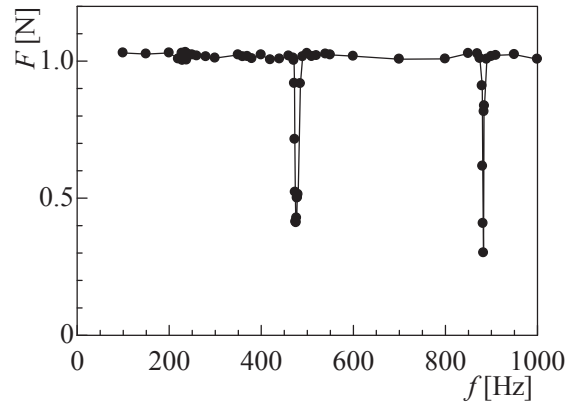


Fig.3 Periodic force at excitation position as function of excitation frequency (1 element).

じた周波数の加振力を徐々に増加させ、付加可能な加振力まで増大させている。

3. 実験結果

3.1 加振周波数が発電特性に及ぼす影響

単一周波数の加振力による圧電振動発電において、振動系の固有モードでの発電が電力増大に寄与することは容易に想像できる。ただしそのようなモードに対応した固有周波数は、広範な周波数帯域に散在することになる。そこで前章に提示した通り 1000 [Hz] を上限に加振周波数 f を変化させることで、円板の振動モードの変遷を詳細に確認し、加速度や発電効率等の発電特性に及ぼす影響を詳細に検討する。

Fig.3は加振周波数 f を変化させたときの加振力 F の推移を示したものである。実験では加振力 F を1 [N]に固定しているため、ほぼ一定に保たれている。しかしながら、 $f=475, 883$ [Hz]付近において加振力が激減しているが、この周波数における付加可能な加振力はそれぞれ約0.4, 0.3 [N]に抑えられている。

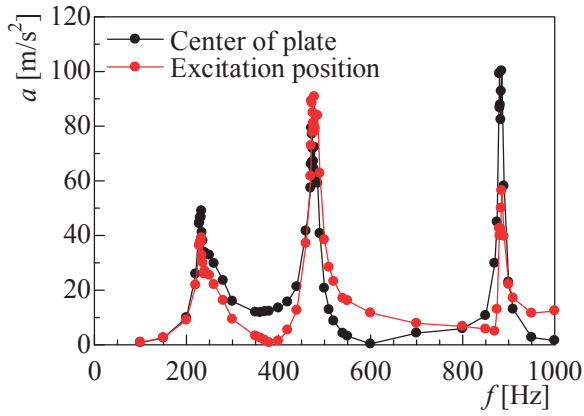
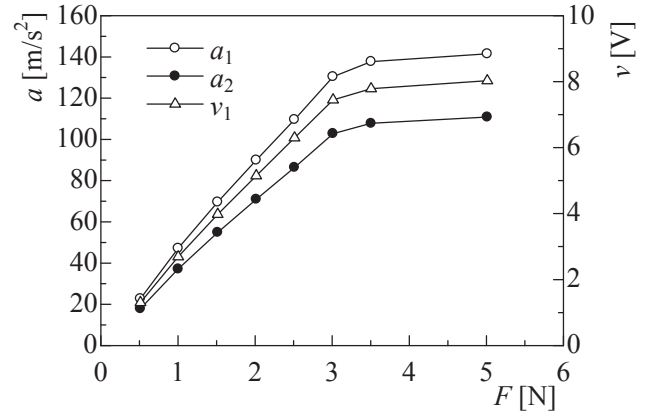


Fig.4 Acceleration of plate vibration as function of excitation frequency (1 element).



(a) Acceleration and voltage

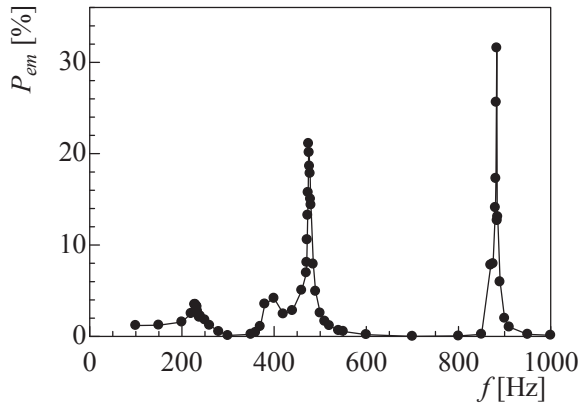
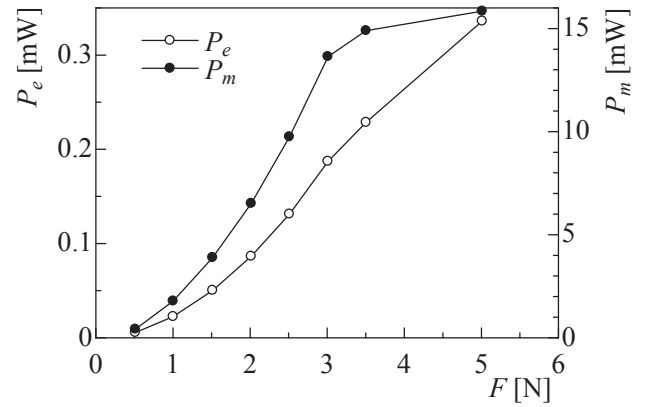
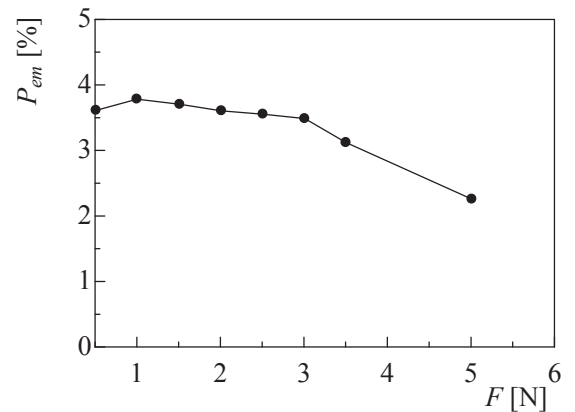


Fig.5 Electricity generation efficiency as function of excitation frequency (1 element).



(b) Electrical and mechanical powers

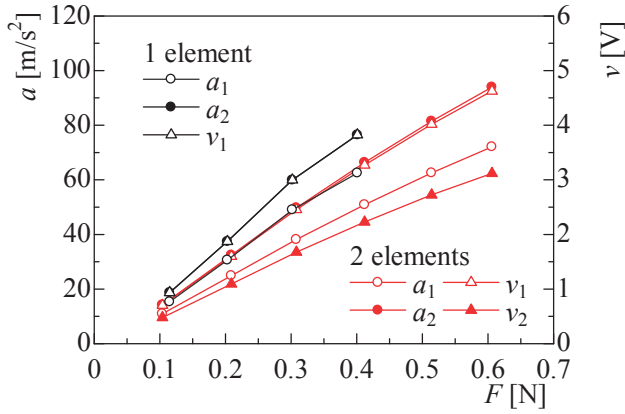


(c) Electricity generation efficiency

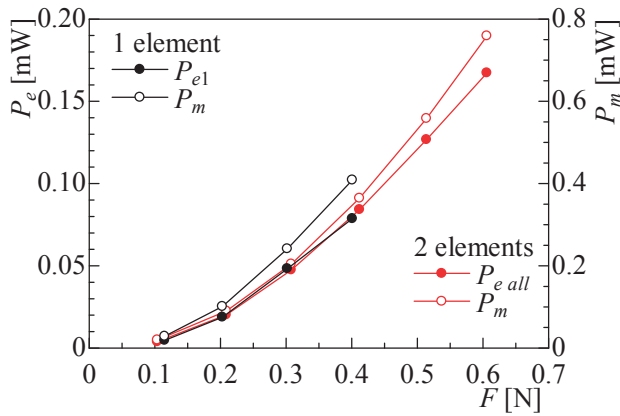
Fig.4 は加振周波数 f を変化したときの加速度 a の推移を示している. $f = 229, 475, 883$ [Hz] 付近で急激な加速度の上昇を確認でき, それぞれ (0,0), (1,0), (2,0) 次モードに起因するものと考えられる. なおこのときの加速度は円板中央と加振点近傍において, それぞれ (0,0) 次モードで $49.0, 39.2 [\text{m/s}^2]$, (1,0) 次モードで $72.2, 89.3 [\text{m/s}^2]$, (2,0) 次モードで $100.2, 56.4 [\text{m/s}^2]$ となっている. 特に, $f = 475, 883$ [Hz] で加振力がそれぞれ約 $0.4, 0.3$ [N] に抑制されていたことを考慮すれば, 最大で (0,0) 次モードの 2 倍以上の加速度が生じることも理解できる. また, 加振機には付加荷重に対する限界加速度が存在することから, $f = 475, 883$ [Hz] 付近では (1,0), (2,0) 次モードの影響により相対的に低荷重で限界加速度に達したものと考えられる.

Fig.5 は上記円板振動の下での発電特性を, 発電効率 P_{em} の f に対する推移で示したものである. 発電効率が極大値を示す $f = 229, 475, 883$ [Hz] では, それぞれ (0,0) 次モードで 3.51 [%], (1,0) 次モードで 21.1 [%], (2,0) 次モードで 31.6 [%] となっている. またこれら極大値となる周波数領域以外では, 発電効率に大きな変化は認められない.

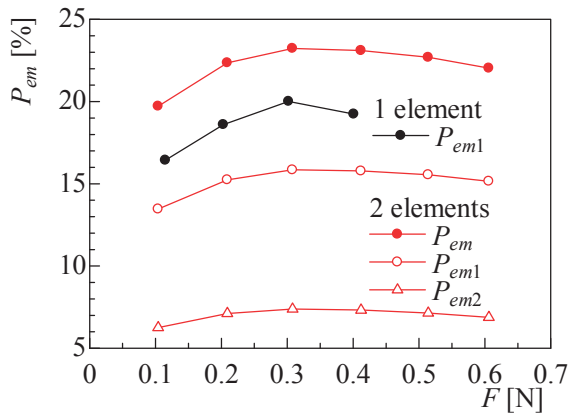
Fig.6 Electricity generation characteristics for varying excitation force at (0,0) mode.



(a) Acceleration and voltage



(b) Electrical and mechanical powers



(c) Electricity generation efficiency

Fig.7 Electricity generation characteristics for varying excitation force at (1,0) mode.

これらの結果及び Fig.4 の振動特性も考慮すれば、加振点近傍に最大振幅を生じるモードでは、加速度の増加と共に発電効率も非常に大きくなる傾向にあることがわかる。

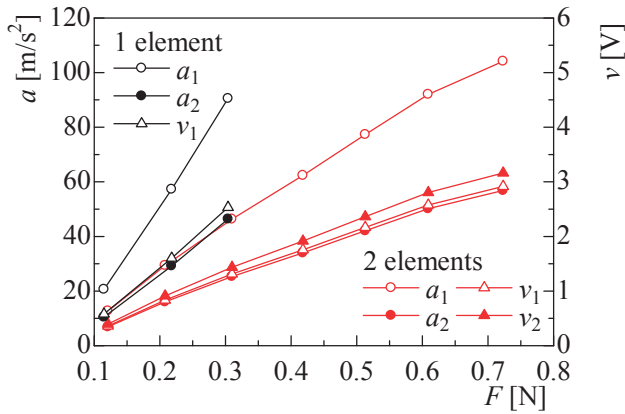
3.2 加振力が発電特性に及ぼす影響

前節では(1,0), (2,0)次モードが生じる周波数付近を除き、加振力 F は 1[N] に設定していた。ただし加速度は加振力の大きさに依存するため、当然ながら発電特性も加振力に強く影響をされることになる。そこで本節では前節にて発電特性が大きく向上することを確認できた(0,0), (1,0), (2,0)次モードについて、加振力を漸次変化させたときの発電特性を検討する。また加速度が急激に上昇することが確認された(1,0), (2,0)次の非軸対称モードでは、円板中心に対して点対称の位置に圧電素子を追加で貼付したモデルを用い、貼付方法による発電特性の差異をモードごとに検討する。

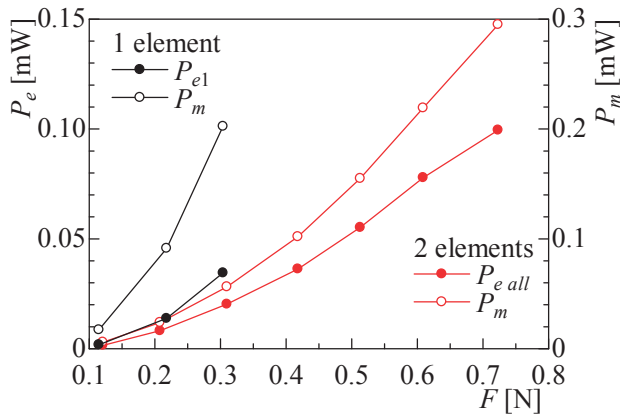
Fig.6 は(0,0)次モードで加振された際、加速度 a と電圧 v 、電力 P_e と供給パワー P_m 及び発電効率 P_{em} における加振力 F に対する推移をそれぞれ示している。なお、以降特段の注記がない限り、加速度の添え字の 1, 2 は円板中央と加振位置付近を意味する。電圧、電力、発電効率の添え字 1, 2 は、加振位置の裏面に貼付した圧電素子と、円板中心に対して点対称の位置に貼付した圧電素子による測定結果をそれぞれ意味している。Fig.6(a)より加振力 F を増加させると加速度 a と電圧 v は線形的に増大するが $F = 3$ [N] を超えるとその増加傾向は極端に抑制され、ほぼ一定に推移することになる。Fig.6(b)は電力 P_e と供給パワー P_m を表しており、Fig.6(a)に対応して $F = 3$ [N] までは F に対して二次的に変化しているが、それ以降では一次的な変化に留まっている。Fig.6(c)は発電効率 P_{em} を表しており、上記の Fig.6(a), (b)の結果を考慮すれば発電効率 P_{em} が $F = 3$ [N] まではほぼ一定となり、それ以降になると急激に減少することは説明できる。

Fig.7 は Fig.6 と同様に加速度と電圧、電力と供給パワー及び発電効率を取り上げ、(1,0)次モードにおける各特性値の加振力に対する推移を示したものである。ただし Fig.7(a)より圧電素子が 1 枚の場合、前述の通り加振力 $F = 0.4$ [N] を超えた計測は不可能であるが、Fig.6(a)と同様に加振力 F を増加させると加速度 a と電圧 v は線形的に増加している。また圧電素子の貼付枚数で比較すると、 $F = 0.4$ [N] では圧電素子 1 枚のとき $a_2 = 79.4$ [m/s²], $v_1 = 3.97$ [V], 圧電素子 2 枚では $a_2 = 66.4$ [m/s²], $v_1 = 3.27$ [V], $v_2 = 2.23$ [V] となっている。圧電素子を 2 枚貼付した場合、1 枚の貼付に比べて加速度と電圧は共に低下することになる。

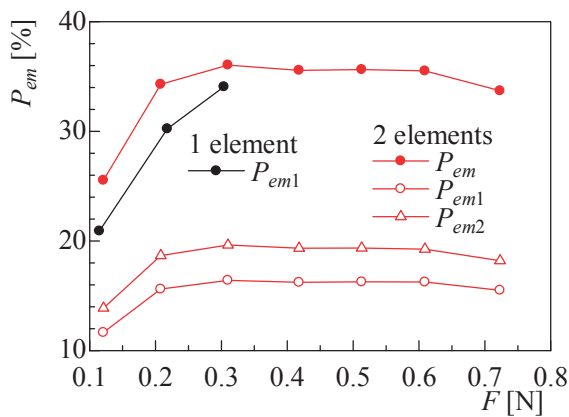
Fig.7(b)は電力 P_e と供給パワー P_m を表しているが、Fig.7(a)と同様に P_e と P_m は F と共に増加している。また、圧電素子の貼付枚数で比較すると、 $F = 0.4$ [N] では、圧電素子 1 枚のとき $P_m = 0.43$ [mW], $P_e = 0.085$ [mW], 圧電素子 2 枚で $P_m = 0.36$ [mW], $P_e = 0.084$ [mW] となっている。このように圧電素子を 2 枚貼付したことで円板振動は抑制されるものの、1 枚貼付した場合に匹敵するエネルギー回収が認められる。



(a) Acceleration and voltage



(b) Electrical and mechanical powers



(c) Electricity generation efficiency

Fig.8 Electricity generation characteristics for varying excitation force at (2,0) mode.

Fig.7(c)は発電効率 P_{em} を表している。圧電素子 1 枚では 16.5~20.0 [%]程度で推移しており、圧電素子 2 枚になると個々の効率は上記に及ばないが、全体の効率は上回ることになる。Fig.7(b)で述べたように圧電素子を 2 枚貼付したことで円板振動は抑制されたものの、圧電素子 2 枚分のエネルギー回収が効率改善に寄与することを示す結果である。

Fig.8 は(2,0)次モードにおいて、Fig.7 と同様な特性変化を示したものである。Fig.7(a)と同様に圧電素子が 1 枚の場合、加振力 $F = 0.3$ [N]を超えた計測は不可能であるが、加振力 F を増加させると加速度 a と電圧 v は線形的に増加することを確認できる。また圧電素子の貼付枚数で比較すると、 $F = 0.3$ [N]では、圧電素子 1 枚のとき $a_2 = 46.4$ [m/s²], $v_1 = 2.53$ [V], 圧電素子 2 枚で $a_2 = 25.3$ [m/s²], $v_1 = 1.31$ [V], $v_2 = 1.44$ [V]となっている。圧電素子を 2 枚貼付した場合、1 枚のときに比べて加速度と電圧共に大きく低下している。

Fig.8(b)は電力 P_e と供給パワー P_m を表しているが、Fig.8(a)と同様に P_e と P_m は F と共に増加している。圧電素子の貼付枚数で比較すると、 $F = 0.3$ [N]では、圧電素子 1 枚で $P_m = 0.10$ [mW], $P_e = 0.034$ [mW], 圧電素子 2 枚で $P_m = 0.056$ [mW], $P_e = 0.020$ [mW]となっている。このように圧電素子を 2 枚貼付したことにより電力及び供給パワーは共に抑制されるが、その影響は(1,0)次モードに比べて顕著になっている。

Fig.8(c)は発電効率 P_{em} を表している。圧電素子 1 枚の場合、 $F = 0.1$ [N]では 20.9 [%]程度に留まっているが、 $F = 0.2 \sim 0.3$ [N]では 30.2~34.1 [%]程度まで増大することになる。圧電素子 2 枚の場合、Fig.8(b)で述べたように圧電素子を 2 枚貼付したことにより、円板振動及び電力は抑制されるものの 2 枚の圧電素子でエネルギーを回収しているため、発電効率は 1 枚の場合を上回ることになる。

3.3 加振力に対する供給パワーと電力の推移

Fig.3 で述べたように加振周波数 $f = 475, 883$ [Hz]付近では加振力が急減し、付加可能な最大加振力はそれぞれ約 0.4 [N]及び 0.3 [N]に抑えられていた。一方でそのような最大加速度を生じる限界加速度に至るまでの領域では加振力 F に対する加速度 a と電圧 v の変化は比例的であることが分かっている。そこで、本節では圧電素子を 1 枚貼付したときの供給パワー P_m と電力 P_e を取り上げ、 $F = 1$ [N]に設定したときの f に対する変遷について検討する。ただし上記の通り加振力が極端に抑制される周波数成分も含まれることから、 a と v の F に対する線形性を利用して $F = 1$ [N]における P_m と P_e を予測している。特に実測値において加振力が抑制されている成分に関しては、線形性が維持されることを前提に外挿することで求めた予測値を用いて検討している。

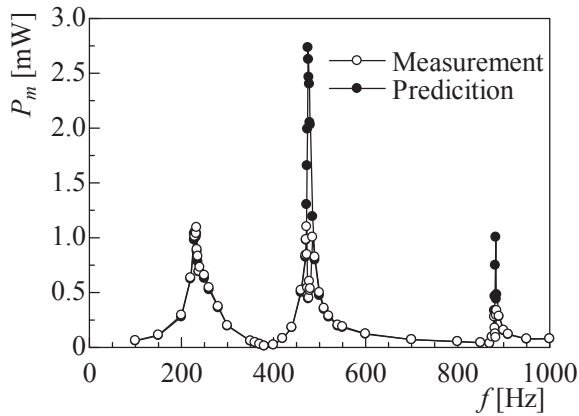


Fig.9 Mechanical power as function of excitation frequency (1 element).

Fig.9 は P_m の f に対する推移を示したものであり、実測値と予測値を併記している。この場合、予測値で示した P_m は (0,0), (2,0) 次モードにおいて大きな差異は認められないが、(1,0) 次モードに関しては他の振動モードを卓越している。これは Fig.2 に示したモード形状からも分かるように、(1,0) 次モードにおける最大面外変位の生じる箇所が加振位置に最も近づいているためと考えられる。また (2,0) 次モードに関しても振動が励起しやすい状況と考えられるが、高次であるために面外変位が (1,0) 次モードに比べ相対的に抑えられ、その影響が反映されたものと考えられる。

Fig.10 は P_e の結果を示したものであり、Fig.9 と同様に実測値と予測値を併記している。 P_e は加振位置の影響で、(1,0), (2,0) 次モード共に (0,0) 次モードを大きく上回っている。 P_e は当然 P_m の挙動に対応することになり、(2,0) 次モードでは (1,0) 次モードに比べて低値となっている。しかしその低下率は P_m に比べて抑えられており、その結果、発電効率では (2,0) 次モードが上回ることになる。

4. 結論

本研究における圧電振動発電では高次モードにおける発電特性を検討するため、広範囲に加振周波数と加振力を変化させた実験を行った。その結果、以下のことを明らかにした。

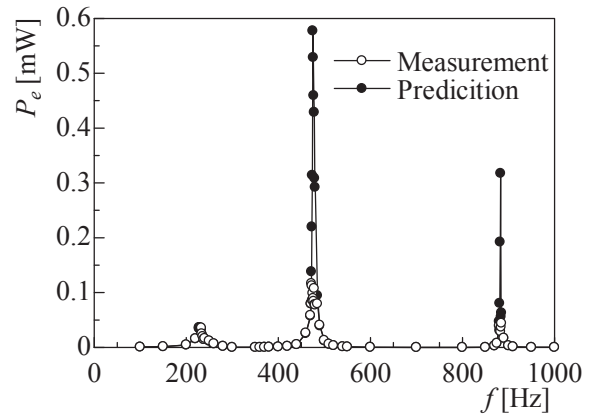


Fig.10 Electric power as function of excitation frequency (1 element).

(1) 円板の振動モードは加振位置に影響されることは分かっていたが、圧電振動発電においてもモードの最大振幅が発生しやすい箇所に圧電素子を貼付することで、発電効率が向上することを確認できた。

(2) モード形状を考慮した上で圧電素子の貼付枚数で発電効率を比較した場合、複数貼付した方が有利であることがわかった。

(3) 非軸対称の (1,0) モードと (2,0) モードを比較した場合、発電効率のみを考慮すれば (2,0) モードの方が優れているが、高次におけるモード形状の複雑化により、総発電量の低下は相対的に著しくなる。

参考文献

- 1) Anton, S. R., Sodano, H. A., A review of power harvesting using piezoelectric materials (2003–2006). *Smart Materials and Structures* 16 1-21 (2007).
- 2) 安達和彦, 磯邊英治, 岩壺卓三, “圧電素子を用いた受動／能動混成型制振システムの設計に関する研究”, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.65, No.636, pp.70-75 (1999).
- 3) 安達和彦, 田中亨, “機械共振式の圧電振動発電に関する基礎研究”, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.76, No.761, pp.28-35 (2010).