

## 山梨県総合理工学研究機構 研究成果報告書

研究課題名	Fe-Ga 単結晶を用いた振動発電 IoT デバイスの実用化に向けた研究
研究期間	令和3年～令和4年度(2ヶ年)
研究者	望月陽介, 八代浩二, 勝又信行, 尾形正岐, 古屋雅章, 渡邊慧輔, 萩原義人, 寺澤章裕, 石黒輝雄, 坂本智明, 中村聖名(山梨県産業技術センター), 鈴木茂(東北大学), 上野敏幸(金沢大学)
キーワード	磁歪, FeGa 単結晶, 振動発電, エネルギーハーベスティング

### 1. 研究成果の概要:

新磁歪材料(Fe-Ga 単結晶)を用いた安価な振動発電 IoT デバイスの開発および普及は製造現場の IoT 導入の推進や新製品開発への効果が期待される。本研究では、デバイスの発電性能の均質化や出力向上のため、単結晶から素子までの加工方法や後処理が磁歪素子の特性(最大力係数, 最適磁界)に与える影響およびデバイスを構成する各パーツが発電性能に与える影響について検討するとともに、発電性能を向上させるためのデバイス形状の検討を行った。

同一単結晶から作製した磁歪素子であっても切断位置や切断方法の違いによって磁歪素子の特性, 特に最適磁界にばらつきが生じることが明らかになった。それらのばらつきは 500°C以上での熱処理やアルミナを用いたピーニング処理を行うことで均質化できたが、デバイスの出力向上の効果は得られなかった。各パーツの効果の検討では、錘の重さ, 磁石の大きさ, フレーム素材を変更させ、デバイスの振動挙動や発電性能に与える影響について明らかにした。デバイス形状の検討ではフレームの曲率部の径を大きくすることで出力電圧を大きくすることができた。

### 2. 研究の目的

多くの分野において生産性向上の取り組みが加速しており、製造現場における設備の監視等, IoT の導入が進められている。しかしながら、中小企業においては設備導入に伴う費用負担や技術者不足等から IoT の導入を躊躇する企業も多い。また、企業において自社製品の差別化を図ることができる新たな技術を活用した製品開発は常に求められており、特に成長産業の一つである IoT 関連のデバイス等へのニーズは多い。一方、磁場の印加により形状が変化する磁歪材料は、材料に応力を加え、歪みを生じさせることで磁場が発生する逆磁歪効果を併せ持つ。逆磁歪効果を利用すると、身の回りにある振動や人・モノの動き、衝撃等を電力に変換できるため、エネルギーハーベスティング(環境発電)技術の一つとして注目されている<sup>1)6)</sup>。さらに、近年磁歪特性が高く、安価に製造可能な新磁歪材料(Fe-Ga 単結晶)が開発され、本素材を活用する機運が高まっている。

我々も本材料に着目し、R1～R2 年度に Fe-Ga 単結晶を用いた安価な振動発電 IoT デバイス<sup>7)8)</sup>の開発・普及に取り組み、富士・東部地域に集積している繊維産業で使用されている織機の運転・停止状況を表示させる見守りシステムを構築した<sup>9)10)</sup>。金沢大学で考案した逆磁歪効果により発電するデバイスを基に試作した IoT デバイスを図1に示す。しかしながら、本デバイスに使用した Fe-Ga 単結晶は開発後間もない素材であるため、発電素子として利用する際に加工方法等が発電性能に与える影響等、明らかでない点も多い。本研究は、発電性能の向上に向け加工方法等が磁歪素子の特性に与える影響を調査するとともに、切断後の磁歪素子への後処理やデバイス構造について検討を行うことで、デバイスの発電性能の均質化や出力向上を目的とした。

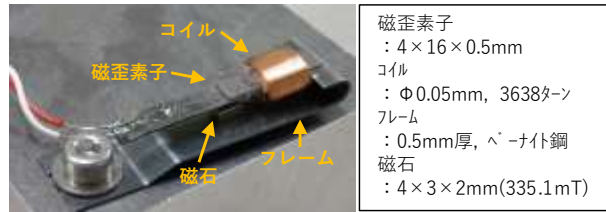


図1 デバイス構造

### 3. 研究課題

#### 3-1 磁歪素子特性のばらつき

Fe-Ga 単結晶から磁歪素子を切り出す際に切断位置や切断方法によって生じる特性の違いについて検討した。

##### 3-1-1 実験方法

###### 試料作製

磁歪素子のサイズは 4×16×0.5 mm とし、各辺が<100>方向となるように同一の Fe-Ga 単結晶から異なる位置、異なる切断方法で作製した。切断にはワイヤ放電加工機(以下, WEDM)((株)牧野フライス製作所, UPH-1)およびダイヤモンドワイヤソー(以下, ワイヤソー)((株)ニューメタルスエンドケミカルスコーポレーション, CS203)を用いた。加工工程を図 2 に示す。同一単結晶の異なる位置からブロック A, B を切り出した後、それぞれのブロックを WEDM およびワイヤソーを用いて素子状に切断した。

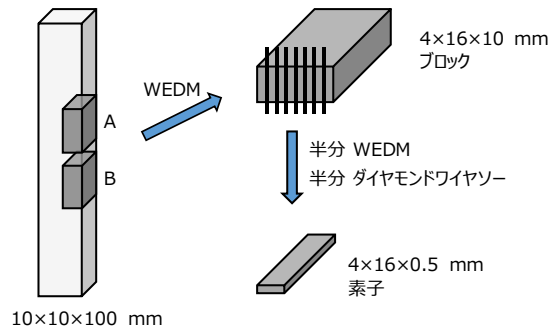


図2 素子作製方法

#### 磁歪素子特性評価

磁歪素子の特性の評価には金沢大学で提案している電気インピーダンスを利用した計測方法<sup>1)</sup>を用いた。本計測方法では磁界を印加した磁歪素子に巻かれたコイルのインピーダンスを計測することで力係数 $\alpha$ (電気系と機械系の結合度)を求めることができる。印加磁界の大きさによって力係数 $\alpha$ は変化し、最大となる力係数(以下, 最大力係数)とデバイスを作製したときの出力電圧には正の相関があることが確認されている。本研究では最大力係数およびそのときの印加磁界(以下, 最適磁界)を磁歪素子の特性として評価した。

計測にはインピーダンスアナライザ(日置電機(株), IM3570), 直流電源(菊水電子工業(株), PMC35-2A), 計測治具から構成される評価システムを用いた。計測治具の外観および評価システムのブロック図を図 3 に示す。計測治具はコア, 計測コイル, 励磁コイルで構成され, コアは鉄鋼 SS400 を用いて作製, 計測コイルは線径 0.1 mm, 巻き数 1035 ターン, 励磁コイルは線径 0.2 mm, 巻き数 1098 ターンを用いた。励磁コイルに 10 mA の電流を流すと 784 A/m の磁界が発生する。励磁コイルに流す直流電流を 10 ~ 70 mA で 5 mA ごと変化させて磁界を印加し, 各印加磁界における計測コイルのインピーダンスを計測した。図 4 に周波数 50~150kHz に対するインピーダンスループおよび補正ループの例を示す。補正ループは実測から電気回路成分を取り除いた機械回路成分のループであり, この補正ループから以下の

(1)式で力係数 $\alpha$ を算出する。

$$\alpha = \sqrt{2\pi m(f_2 - f_1) \cdot r} \quad (1)$$

$m$ は等価質量(文献値の $3.76 \times 10^{-5}$  kg),  $r$ は補正ループの円の直径,  $f_1, f_2$ はインピーダンスの偏角が $\pm 45^\circ$ となる周波数であるが,ここでは補正ループを真円と仮定し $f_1, f_2$ をリアクタンス成分が最大,最小となる周波数とした。

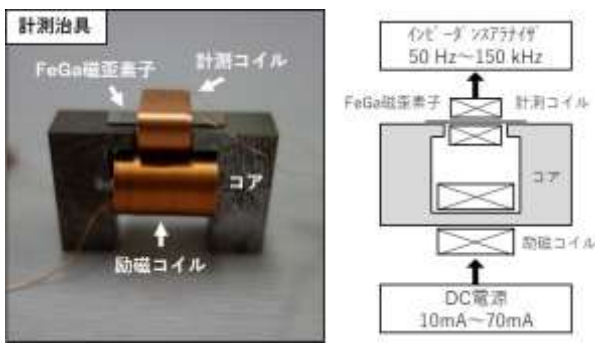


図3 計測治具写真およびブロック図

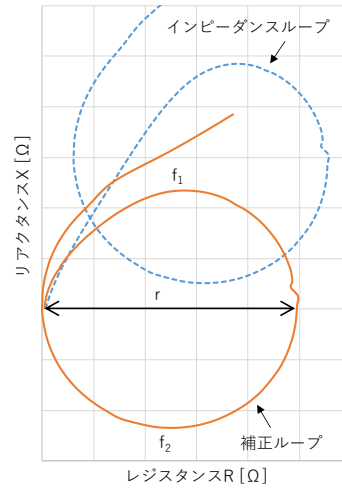


図4 計測コイルのインピーダンスループ

### 3-1-2 実験結果

同一単結晶の各切断位置および各切断方法で作製した磁歪素子の特性を評価した結果を図5に示す。切断位置による特性の違いを比較すると,最大力係数はWEDMで切断した場合AとBが同等,ワイヤソーで切断した場合Bの方が大きかった。また,最適磁界はいずれの切断方法でもBの方が大きかった。切断方法による特性の違いを比較すると,最大力係数は,Bでの差は小さいものの,いずれもワイヤソーで切断した方が小さく,ばらつきが大きかった。また,最適磁界はいずれの切断位置でもWEDMの方が大きかった。

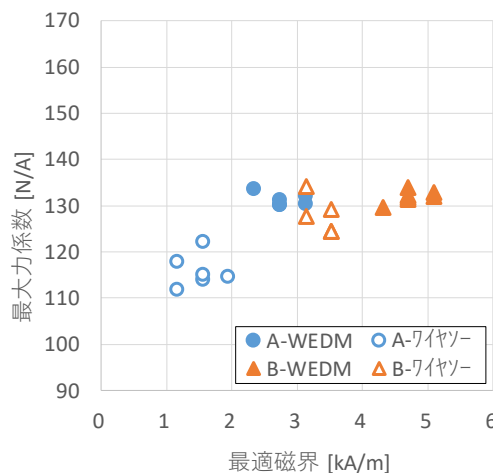


図5 切断後の磁歪素子特性の比較

### 3-1-3 結果及びまとめ

同一単結晶であっても切断位置や切断方法により磁歪素子の特性, 特に最適磁界にばらつきが生じることが判明した. この原因として単結晶内の残留応力が影響していると考えられる.

磁歪素子の材料である Fe-Ga 単結晶に圧縮および引張応力を与えたときの磁化曲線の変化は図 6 のように報告<sup>11)</sup>されており, 圧縮応力が生じているとき無負荷時と同様の磁束密度を持つためにはより強い磁界が必要であることがわかる. 磁歪素子特性の最適磁界においても同様の傾向があると推測され, 最適磁界のばらつきは残留応力のばらつきであり, 圧縮応力が生じているとき最適磁界が大きくなっていると考えられる.

切断位置による特性の違いは結晶成長時に生じた残留応力が単結晶内でばらついているためと考えられる. また, WEDM で切断した素子の表面には溶解再凝固層が形成されるため, 表面には引張応力が生じていると考えられ, その内部にある単結晶には逆に圧縮応力が生じ, 最適磁界が大きくなったと考えられる.

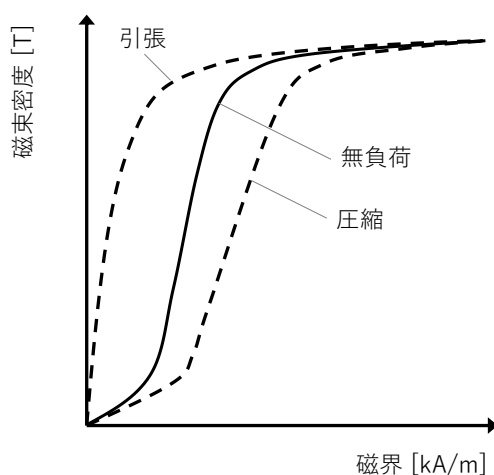


図 6 応力負荷した Fe-Ga 単結晶の磁化曲線例

### 3-2 磁歪素子への熱処理の効果

切断位置や切断方法によってばらつきが生じた磁歪素子について, 熱処理を行った際の特性の変化について検討した.

#### 3-2-1 実験方法

##### 熱処理

熱処理には管状炉((株)アサヒ理化製作所, ARF-30K)を用いた(図 7). 管内を Ar(99.99%)で置換した後, 約 0.5 mL/min でフローすることで Ar 雰囲気とした. 熱処理温度は 300, 400, 500, 600, 700 °C, 時間は 1 時間とし, 1 時間で効果が十分に得られなかった 300, 400 °C ではさらに 2 時間追加の熱処理を行った.

試料は同一単結晶から異なる位置, 異なる切断方法(WEDM, ワイヤソー)で作製し, 特性にばらつきが生じた磁歪素子を用いた.

##### 磁歪素子特性評価

熱処理前後の磁歪素子の特性については, 3-1-1 に記載の評価システムを用いて評価した.

#### 3-2-2 実験結果

500 °C で 1 時間熱処理した磁歪素子の特性の変化について図 8 に示す. 3-1 に記載のとおり処理前の磁歪素子特性は切断位置や切断方法によってばらつきがあったが, 熱処理を行うことで最大力係数, 最適磁界ともに均質化できた.

熱処理による均質化効果の温度範囲を確認するため, 300, 400, 600, 700 °C での熱処理した磁歪素子の特性評価の結果を図 9 に示す.

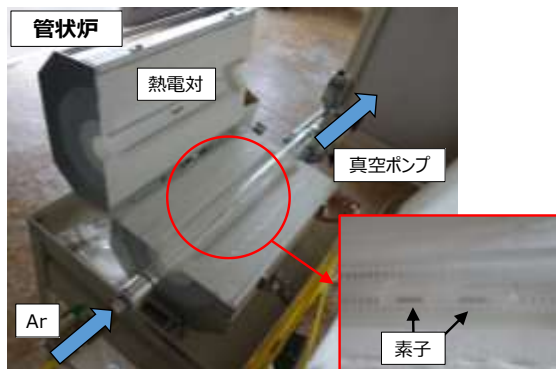


図7 熱処理装置

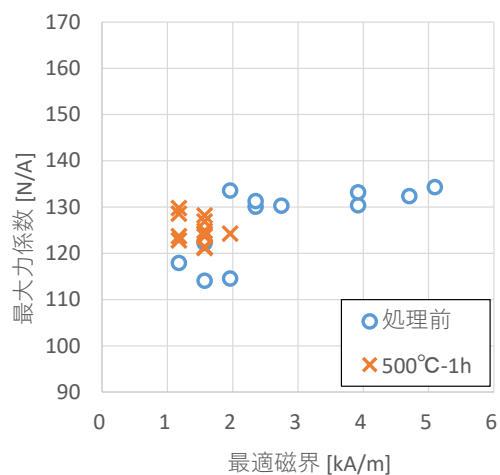


図8 熱処理の磁歪素子特性への効果

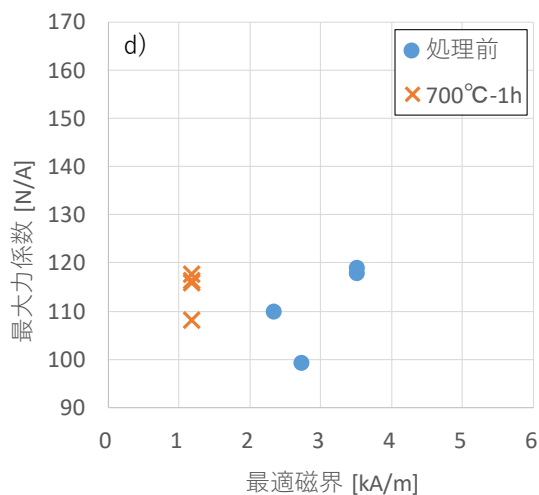
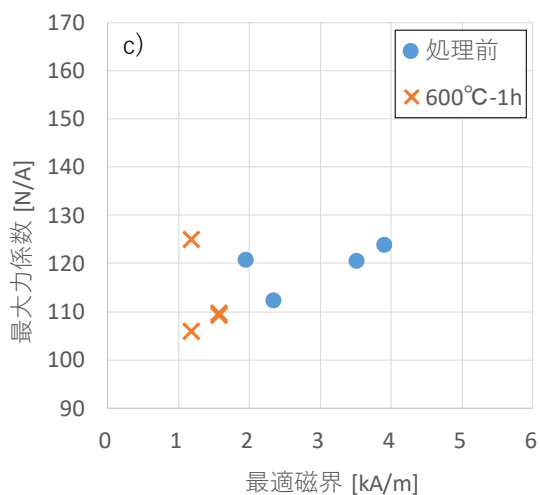
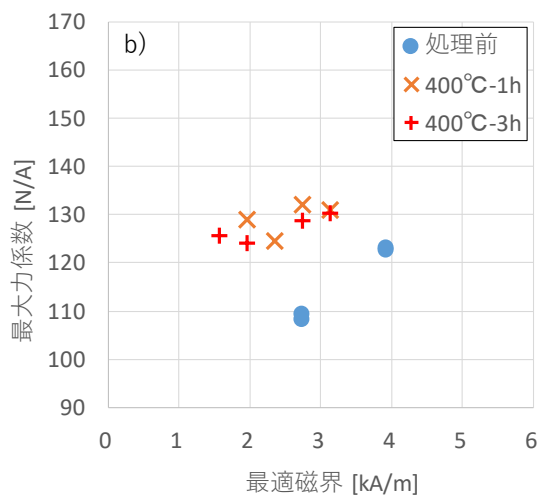
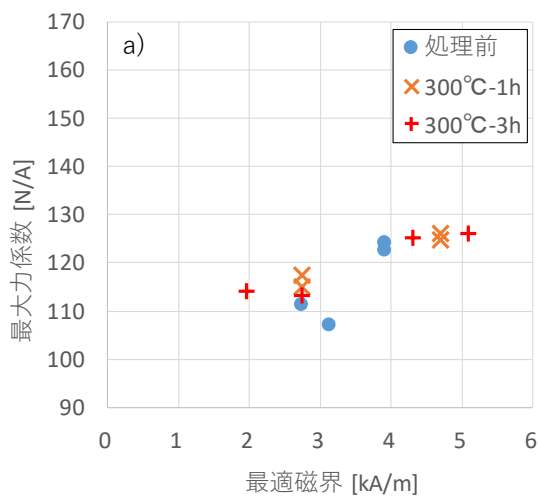


図9 熱処理温度による特性変化 a) 300°C, b) 400°C, c) 600°C, d) 700°C

300 °Cでの熱処理(図 9a)では 3 時間熱処理をしても磁歪素子の特性に大きな変化はなかった。400 °Cでの熱処理(図 9b)では 500 °Cでの熱処理に比べて効果は小さいものの 1 時間の熱処理で最

適磁界が小さくなり、特性のばらつきも小さくなった。その後 2 時間追加の熱処理を行ったが、特性の変化はみられなかった。600 °C および 700 °C での熱処理 (図 9c, d) では 1 時間の処理で 500 °C での熱処理と同様に最適磁界の低下および特性の均質化の効果が得られた。一部最大力係数が低下した試料が確認されたが、これは Ar 雰囲気での熱処理を行ったものの、完全には酸化を抑制できず、酸化が進みやすい高温の熱処理においてその影響が現れたものと考えられる。

### 3-2-3 結果及びまとめ

熱処理による磁歪素子特性のばらつきの均質化の効果は、400°C の熱処理で一定の効果が現れ、500°C 以上で十分な効果が得られることが判明した。熱処理によって最適磁界が小さくなることから、結晶成長時や切断時に生じた圧縮の残留応力が除去あるいは低減され、均質化されたと考えられる。

### 3-3 磁歪素子へのピーニング処理の効果

切断位置や切断方法によってばらつきが生じた磁歪素子について、ピーニング処理を行った際の特性の変化について検討した。

#### 3-3-1 実験方法

##### ピーニング処理

ピーニング処理の研磨材はアルミナ (A-43F60) および重曹を用いた。アルミナを用いたピーニング処理 (以下、アルミナ SP 処理) ではサンドブラスト ((株) 不二製作所, SGK-4), 重曹を用いたピーニング処理 (以下、重曹 SP 処理) ではハンドブラスト装置 (アネスト岩田 (株), CHB-100) を用いた。アルミナ SP 処理の処理条件は圧力約 0.4 MPa, 距離 150 mm, 時間 5 sec とし、重曹 SP 処理の処理条件は圧力約 0.6 MPa, 距離 200 mm, 時間 20 sec とした。

アルミナ SP 処理では、図 4 に示すブロック A と同一単結晶の異なる位置のブロック C を異なる切断方法 (WEDM, ワイヤソー) で作製し、特性にばらつきが生じた磁歪素子およびそれらを 500 °C, 1 時間の熱処理によって特性を均質化した磁歪素子を用いた。重曹 SP 処理では、アルミナ SP 処理に用いた磁歪素子とは別ロットの単結晶から異なる切断方法 (WEDM, ワイヤソー) で作製した磁歪素子を用いた。

##### 処理表面の評価

ピーニング処理した磁歪素子について、電子顕微鏡 (SEM) ((株) 日立ハイテクノロジーズ, SU3500) を用いて表面観察し、表面粗さ輪郭形状測定機 ((株) ミットヨ, CS-H5000CNC) を用いて表面粗さ (Ra, Rz) 測定を行った。また、アルミナ SP 処理した磁歪素子について、電解研磨とエックス線回折法の極点分析を繰り返し行い、極点の回折強度および極点形状の変化から処理影響層の深さを評価した<sup>10)</sup>。エックス線回折法の極点分析には、エックス線回折装置 (XRD) ((株) リガク, Ultima IV) を用いた。

##### 磁歪素子特性評価

ピーニング処理前後の磁歪素子の特性については、3-1-1 に記載の特性評価システムを用いて評価した。

##### 発電性能評価

アルミナ SP 処理した磁歪素子について発電性能を評価した。発電性能はデバイスの共振周波数において同一振幅の正弦波振動を与えた際の実出力電圧を計測し評価した。付与する正弦波振動はファンクションジェネレータ (RS Pro, AFG21105) と加振機 (The modal shop, Smart Shaker K2007E01) を用いて発生させ、出力電圧はオシロスコープ (テレダイン・レクロイ社, T3DSO2104A) を用いて測定した。ファンクションジェネレータの印加電圧を一定にすることで一定振幅の正弦波振動を生成した。

#### 3-3-2 実験結果

##### 処理表面の評価

アルミナ SP 処理および重曹 SP 処理を行った磁歪素子の表面観察および表面粗さ (Ra, Rz) を測定した結果を図 10 に示す。処理前の WEDM 切断面には表面に熔融再凝固層が観察され、ワイヤソー切断面には切断方向に垂直なワイヤの切断痕が観察された。Ra, Rz は WEDM 切断面の方が大きな値を示した。重曹 SP 処理後の表面は処理前の表面と比べて形状や表面粗さに有意な変化が現れなかった。一方、アルミナ SP 処理後の表面は、処理前の切断方法に関わらず同一の表面形状に加工された。表面粗さは処理前の WEDM 切断面と同程度であった。

表面状態が大きく変化したアルミナ SP 処理の影響層の深さについて電解研磨とエックス線回折法の極点分析を用いて評価した。アルミナ SP 処理後の磁歪素子は処理前の切断方法に関わらず単結晶の極点が現れなかったが、電解研磨を行うについて、図 11a に示すブロードな極点が現れ、さらに電解研磨を進めると図 11b に示すシャープな極点が現れた。電解研磨量と極点の回折強度の関係を図 12 に示す。電解研磨量が大きくなるにつれ回折強度は増加し、WEDM 切断後アルミナ SP 処理した表面では 60  $\mu\text{m}$  程で、ワイヤソー切断後アルミナ SP 処理した表面では 50  $\mu\text{m}$  程で回折強度が変化しなくなった。このことからアルミナ SP 処理の影響層は 50~60  $\mu\text{m}$  であることが判明した。

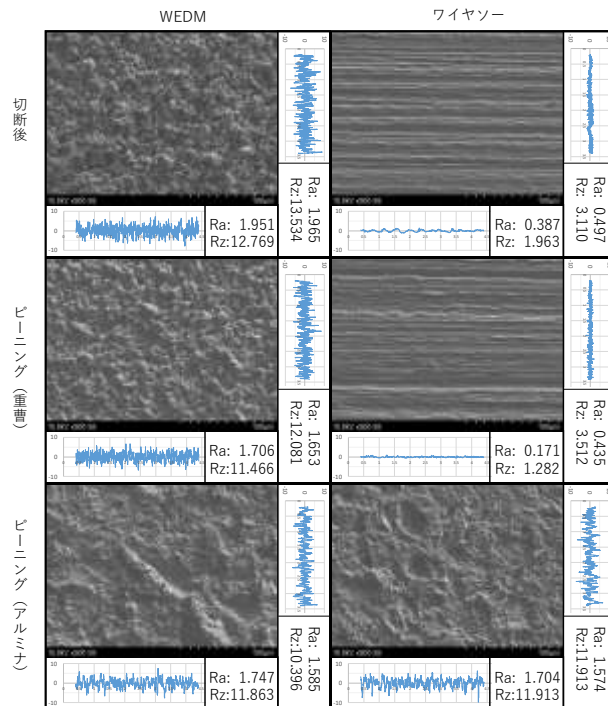


図 10 ピーニング処理前後の SEM 像および表面粗さ

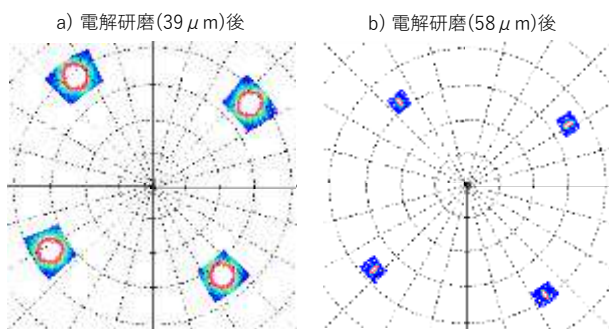


図 11 アルミナ SP 処理した磁歪素子 (WEDM 切断) の電解研磨後の極点図

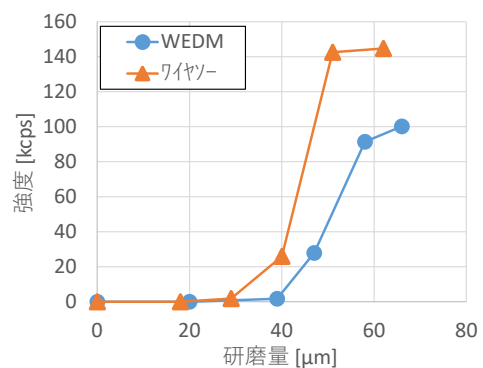


図 12 電解研磨量と回折強度

### 磁歪素子特性評価

アルミナ SP 処理した磁歪素子の特性評価の結果を図 13 に示す。処理前の磁歪素子の特性は前述のとおり切断位置、切断方法の違いによってばらつきが生じた。アルミナ SP 処理を行うことで、A、C ともに切断方法の違いによって生じたばらつきは均質化されたが、切断位置によって最適磁界に差異があった。



また、いずれの磁歪素子も最大力係数が大きくなった。

切断後に熱処理を行い均質化したブロック A の磁歪素子にアルミナ SP 処理を行った磁歪素子の特性評価の結果を図 14 に示す。熱処理を行った後にアルミナ SP 処理を行った結果、熱処理せずに処理した磁歪素子よりも最大力係数が大きくなった。

重曹 SP 処理した磁歪素子の特性評価の結果を図 15 に示す。ワイヤソーで切断した磁歪素子に特性の変化は見られなかったが、WEDM で切断した磁歪素子は最大力係数、最適磁界ともに僅かに小さくなった。

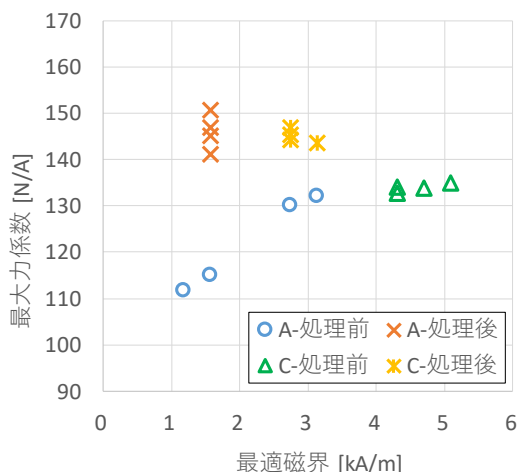


図 13 アルミナ SP 処理による特性の変化

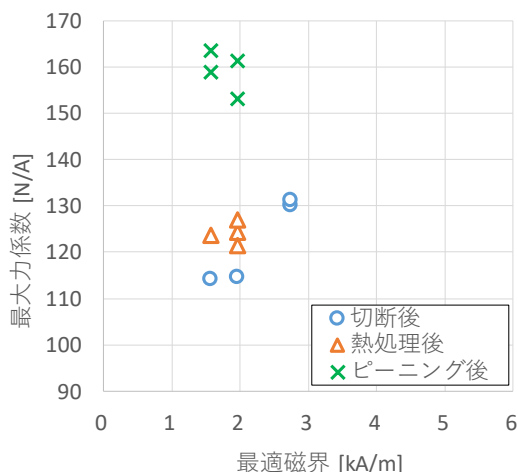


図 14 熱処理+アルミナ SP 処理による特性の変化

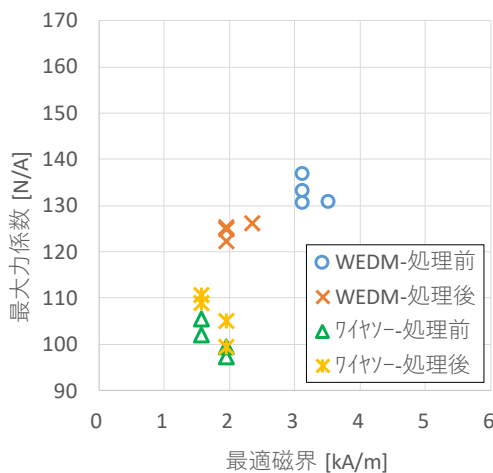


図 15 重曹 SP 処理による特性の変化

### 発電性能評価

熱処理した磁歪素子にアルミナ SP 処理することで大きな最大力係数が得られた。この磁歪素子を用いてデバイスを作製し、処理前の磁歪素子を用いたデバイスと発電性能を比較した結果を表 1 に示す。熱処理とアルミナ SP 処理した磁歪素子の最大力係数は大きいものの、出力電圧は低くなり、発電性能の向上には至らなかった。



表1 処理前後の発電性能評価

処理履歴	磁歪素子特性	共振周波数 [Hz]	出力電圧 [V]
	最大力係数[N/A] (最適磁界[kA/m])		
WEDM切断後	128 (3.14)	206.5	2.76
ワイヤソー切断⇒熱処理 ⇒アルミナSP処理	161 (1.96)	206.5	2.27
WEDM切断⇒熱処理 ⇒アルミナSP処理	159 (1.57)	203.0	1.60

### 3-3-3 結果及びまとめ

アルミナ SP 処理では切断位置による特性のばらつきは残ったが、切断方法による特性のばらつきを均質化することができた。これは WEDM 等による切断時の加工影響層が 20~30 μm である<sup>10)</sup>のに対し、アルミナ SP 処理の影響層が 50~60 μm と深くまで侵入したため、加工の影響によるばらつきを均質化できたと考えられる。一方、結晶成長時に生じた残留応力に起因すると考えられる切断位置によるばらつきは素子全体に影響しているため、表面のみの加工では均質化できなかったと考えられる。

最大力係数が増加したが発電性能の向上とならなかった要因の一つとして最大力係数の算出方法が考えられる。本報告では最大力係数の算出のための  $f_1$ ,  $f_2$  について補正ループのリアクタンスが最大、最小となる周波数を用いた。アルミナ SP 処理後の磁歪素子の補正ループは真円からずれが大きかったため、実際の最大力係数よりも大きく算出された可能性がある。

### 3-4 振動シミュレーション

#### 3-4-1 実験方法

デバイスの振動の様子をシミュレートするため、デバイス構造の 3D モデルを作成し(図 16a)、汎用有限要素解析ソフト ANSYS によるモーダル解析を行った。各材質のパラメータは表 2 に示す値を用いた。

表2 解析パラメータ

	フレーム	磁歪素子	コイル
密度 (g/cm <sup>3</sup> )	7.85	7.8	8.92
一定減衰比	0.0003	0.05	0.001
ヤング率 (Pa)	2.06×10 <sup>11</sup>	7.0×10 <sup>10</sup>	1.298×10 <sup>10</sup>
ポアソン比	0.3	0.45	0.343

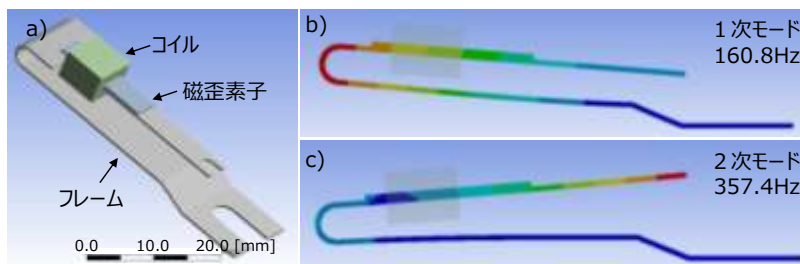


図16 ANSYSによる解析 a)3Dモデル, モーダル解析結果 b)一次モード, c)二次モード

### 3-4-2 実験結果

解析の結果を図 16b, c に示す. 一次モードとしてフレーム全体が揺れる振動モードが 160.8 Hz に確認され, 実際に作製したデバイスの発電時の共振周波数(360.4 Hz)と近い周波数(357.4 Hz)にフレーム上部のみが振動する振動モードが二次モードとして確認された.

### 3-5 錘の効果

#### 3-5-1 実験方法

##### 振動試験

デバイスのフレーム先端に 0.3~1.6 g の錘をつけ, 振動試験機(IMV(株), A45/SA4HM)を用いて振動試験を行った. 共振周波数において加速度  $5 \text{ m/s}^2$  の振動を与えたときのフレームの変位量と出力電圧を測定した. フレームの変位量は先端から 5 mm 程度の位置をレーザ変位計((株)キーエンス, LK-H050)を用いて測定した. また, 高速度カメラ((株)フォトロン, FASTCAM Mini AX50)を用いてフレームの曲率部と先端部の挙動を計測, 比較した.

##### シミュレーション

3D モデルのフレーム先端に 0.3~1.6 g の錘をつけ, ANSYS を用いてモーダル解析および周波数応答解析を行い, 各重さでの共振周波数とフレーム先端の変位量を解析した. 共振周波数はフレーム全体が揺れる振動モードとフレーム上部が揺れる振動モードについて, フレーム先端の変位量についてはフレーム上部のみが揺れる振動モードについて解析した.

#### 3-5-2 実験結果

##### 振動試験

錘の重さと共振周波数の関係を図 17a に示す. 錘が重くなるにつれ共振周波数が低くなるが, 共振周波数が 150~160 Hz となる, 錘が 0.8~1.2 g の範囲において共振周波数の変化が小さくなった. 錘の重さとフレームの変位量および出力電圧の関係を図 17b に示す. 錘の重さに対して変位量と出力電圧は同様の挙動を示し, 錘が重くなるにつれ 0.8~1.2 g の範囲では減少し, それ以外では増加した. 変位量と出力電圧が減少した錘の重さの範囲は共振周波数の変化が小さくなる範囲と一致した. また, 各共振周波数におけるフレームの曲率部と先端部の振動の位相差を比較した結果, 錘の重さが 0.8~1.2 g となる 150~160 Hz では曲率部と先端部の位相が同位相に, それ以外では位相が  $180^\circ$  近くずれていた.

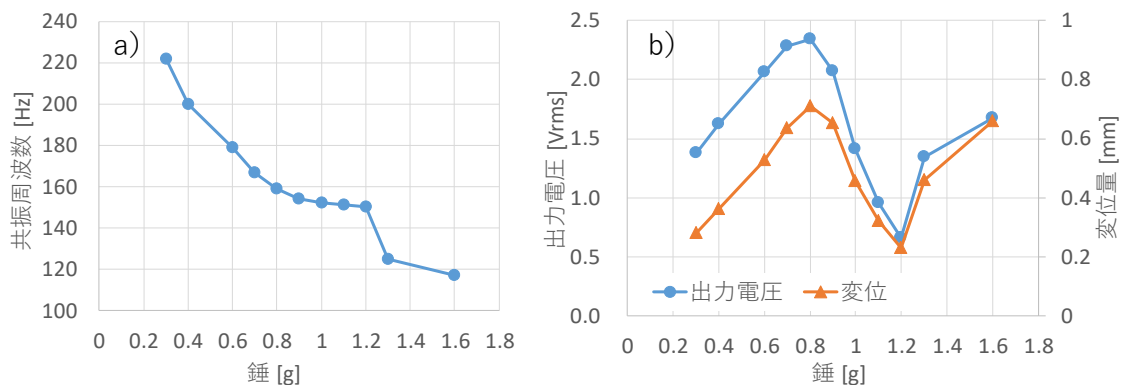


図 17 錘の影響(実際のデバイス) a) 共振周波数, b) 出力電圧および変位量

#### 解析ソフトによるシミュレーション

ANSYSを用いて解析した錘の重さと共振周波数およびフレーム先端の変位量の関係について図 18 に示す. フレーム全体が揺れる振動モードでは錘の重さが増しても周波数の変化は小さく, フレーム上部のみが揺れる振動モードでは錘が重くなるにつれ周波数が低下し, 160 Hz 付近で二つの振動モードの一次と二次が入り替わることが確認された. 変位量は錘が重くなるにつれ増加するが, 二つの振動モードが入り替わる 160 Hz 付近の重さで急激に減少した.

### 3-5-3 結果及びまとめ

デバイスの振動試験で確認された錘の重さの増加に対する 160Hz 付近での変位量の減少は ANSYS の解析でも確認された。二つの振動モードの共振周波数が近づく領域では振動が干渉し合い、先端部分の変位量が小さくなったと考えられる。デバイス作製時にはこの周波数領域を避け、錘の重さを設定する必要があると考えられる。

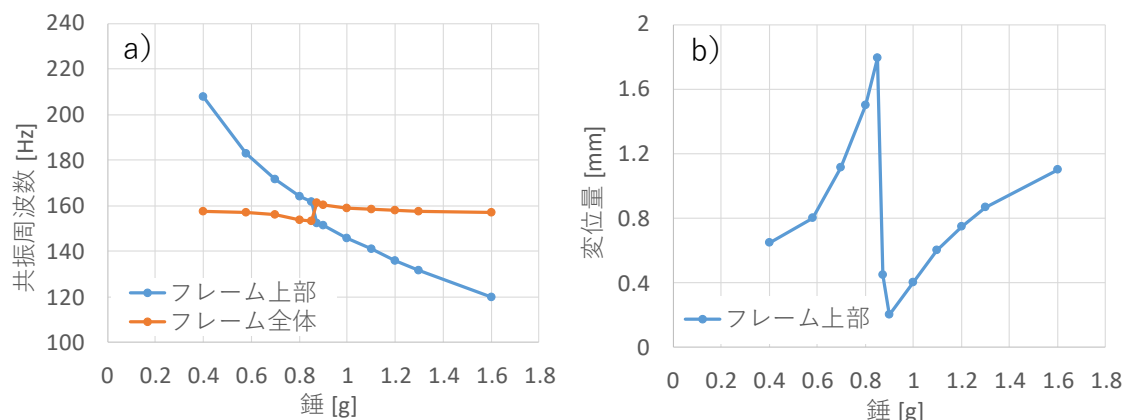


図 18 錘の影響(解析) a)共振周波数, b)変位量

### 3-6 磁石の効果

フレーム下部に取り付ける磁石には、磁石自身がコイル内の磁束密度を変化させ発電する効果と磁歪素子を励磁することで磁歪素子の歪みによる磁束密度の変化を大きくさせる効果があり、それぞれの効果について検討した。

#### 3-6-1 実験方法

##### 電磁誘導の効果

磁石自身による電磁誘導の効果を確認するため、磁歪素子の代わりに同寸法の SUS304 板を用いたデバイスを作製した。0.3 g の錘をつけ、3-5-1 に記載の振動試験を行い、出力電圧を測定した。

##### 磁歪素子の励磁の効果

磁歪素子の励磁の効果と磁歪素子特性の最適磁界との関係を検証するため、最適磁界が異なる二つの磁歪素子 (Ⅰ:最大力係数 132 N/A, 最適磁界 3.92 kA/m, Ⅱ:最大力係数 133 N/A, 2.35 kA/m) と三つの異なる大きさの磁石 (小:4×3×2 mm (334.1 mT), 中:4×4×2 mm (318.6 mT), 大:5×5×2 mm (292.7 mT)) を用いてデバイスを作製した。0.3 g の錘をつけ、3-5-1 に記載の振動試験を行い、出力電圧を測定した。

#### 3-6-2 実験結果

##### 電磁誘導の効果

磁歪素子で作製したデバイスと SUS304 で作製したデバイスの出力電圧の比較を表 3 に示す。SUS304 を用いた場合でも磁歪素子を用いた場合の 2 割程度の約 0.3 V の出力電圧を得られた。

表 3 SUS304 を用いたデバイスの出力電圧

素子	共振周波数 [Hz]	電圧 [V]
SUS304	201.8	0.26
磁歪素子*	206.0	1.42

\* 最大力係数 133 N/A, 最適磁界 2.35 kA/m

### 磁歪素子の励磁の効果

特性の異なる二つの磁歪素子を用いたデバイスに各サイズの磁石を取り付けた際の実出力電圧の結果を表 4 に示す。どちらの磁歪素子においても出力電圧は磁石(中)が最も大きく磁石(大)が小さくなったが、磁石(大)を用いた際の低下の割合は磁歪素子 II で大きく低下したのに対し、磁歪素子 I では低下割合が小さかった。

表 4 最適磁界の異なる磁歪素子と磁石の関係

磁石寸法 (磁束密度)	出力電圧 (割合*)	
	磁歪素子 I	磁歪素子 II
(小)4x3x2 (335.1mT)	1.42 V (0.85)	0.89 V (0.97)
(中)4x4x2 (318.6mT)	1.67 V (1.00)	0.92 V (1.00)
(大)5x5x2 (292.7mT)	1.20 V (0.72)	0.26 V (0.30)

\* 最大値からの割合

### 3-6-3 結果及びまとめ

磁石自身の電磁誘導の効果による発電を確認することができた。また磁歪素子の励磁効果については最適磁界の大きな磁歪素子 I の方が磁石を大きくした際の低下割合が小さかったことから、磁歪素子の特性と磁石に励磁効果に関係があることが示唆され、デバイス作製時には磁歪素子の最適磁界に適した磁石を選択する必要があると考えられる。

### 3-7 フレーム材質の影響

#### 3-7-1 実験方法

##### フレーム作製

フレーム材質の影響を確認するため、試作で使用したバーナイト鋼(サミニ(株), S60C), 非磁性 SUS304((株)ニラコ), 透磁率の高い 45 パーマロイ((株)ニラコ)の板材を WEDM で同一形状に切断し、曲げ治具を用いて簡易的な形状のフレームを作製した。

##### 発電性能評価

作製したフレームを用いてデバイスを作製し先端に 0.45 g または 0.26 g の錘をつけ振動させ、フレーム先端の変位量および出力電圧を評価した。振動試験の方法は 3-3-1, フレーム先端の変位量測定等は 3-5-1 と同様の方法を用いた。

#### 3-7-2 実験結果

各材質のフレームを用いて作製したデバイスの発電性能評価の結果を表 5 に示す。非磁性の SUS304 では出力電圧がほとんど得られなかった。45 パーマロイでは 0.45 g の錘の場合、バーナイト鋼よりも共振周波数が小さく、変位と出力電圧が大きくなったが、共振周波数がバーナイト鋼と同様になる 0.26 g の錘とした場合、変位と出力電圧が同程度になった。

表 5 異なるフレーム材質のデバイスの振動発電評価

材質	錘 [g]	共振周波数 [Hz]	出力電圧 [V]	変位 [mm]
バーナイト鋼	0.45	206.3	2.200	1.300
SUS304	0.45	207.5	0.004	1.360
45パーマロイ	0.45	175.7	3.430	1.820
	0.26	208.8	2.300	1.350

#### 3-7-3 結果及びまとめ

非磁性の SUS304 を用いた場合、デバイスに磁気回路が形成されず、磁歪素子等に励磁磁界を与えることができなかったため、出力が得られなかったと考えられる。また 45 パーマロイを用いて同じ重さの錘を付けた際に出力電圧が大きくなった原因は、共振周波数を揃えた際に出力電圧が同程度になったこと

から、透磁率の高さではなく材料のしなり易さの影響であると考えられる。これらのことからフレーム材にはある程度磁性のある材料を用いれば透磁率の高さの影響はほとんどないものと推測される。

### 3-8 フレーム形状の検討

#### 3-8-1 実験方法

##### 解析ソフトによるシミュレーション

図 19 に示すデバイスのフレーム形状について、底面の長さ  $X$ 、上面の曲率部からコイルまでの長さ  $Y$ 、曲率部の直径  $Z$  を変化させた 3D モデルを作成し、ANSYS を用いてモーダル解析および周波数応答解析を行い、共振周波数および共振周波数で同一振幅の振動を与えたときのフレーム先端(図 19 の点 P)の変位を比較した。

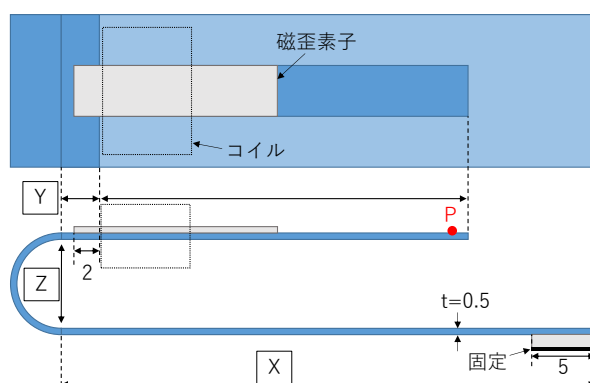


図 19 寸法検討した解析モデル [mm]

#### 発電性能評価

フレーム曲率部の直径を  $\phi 8$  mm としたフレームを作製(以下、検討モデル)し、共振周波数で同一振幅を与えた際の先端部の変位量および出力電圧を従来モデルと比較した。振動試験の方法は 3-3-1、フレーム先端の変位量測定等は 3-5-1 と同様の方法を用いた。なお検討モデルの磁石は  $4 \times 4 \times 5$  mm (435.8 mT) を使用した。

#### 3-8-2 実験結果

##### 解析ソフトによるシミュレーション

解析結果を表 6、図 20 に示す。寸法  $X$  のみを短くしたとき共振周波数、変位ともに僅かに増加した。寸法  $X$  の変化は共振周波数、変位ともに僅かな変化しか与えなかったため、寸法  $Y$ 、寸法  $Z$  の変化ではフレーム全長が同じになるように寸法  $X$  も変化させ解析を行った。寸法  $Y$  を長くしたとき共振周波数が低くなり、変位が大きくなった。寸法  $Z$  を大きくしたときも同様に共振周波数が低くなり、変位が大きくなった。これらの結果からデバイスのフレーム形状は曲率部の直径  $Z$  を大きくする、または曲率部からコイルまでの長さ  $Y$  を長くすることでフレーム先端が大きく変位し、大きな出力電圧を得られることが期待できた。

#### 発電性能評価

解析によって先端の変位の変化が最も大きかった検討モデルと従来モデルのフレームを用いて作製したデバイスの発電性能評価について、ファンクションジェネレータの印加電圧と変位量および出力電圧の関係を図 21 に示す。解析結果と同様に曲率部の径を大きくした検討モデルでは従来モデルに比べてフレーム先端の変位量が大きくなった。出力電圧については、印加電圧が小さいときは従来モデルの方が大きい、印加電圧が大きいとき検討モデルの方が大きな値を得られた。

#### 3-8-3 結果及びまとめ

曲率部の大きい検討モデルは従来モデルに比べて共振周波数が低くなった。そのため印加電圧が小さくフレーム先端の変位量に大きな差がないときは、周波数が高く、磁束密度の変化が早い従来モデルの方が大きな出力電圧を得られ、印加電圧が大きくなり変位量の差が大きくなったとき、変位量が大きくなる検討モデルの方が大きな出力電圧を得られたと考えられる。

表6 フレーム寸法と解析結果

従来モデル寸法：X=42mm, Y=3mm, Z=φ4.5mm

サンプル No.	寸法変化量[mm]			モーダル解析	周波数応答解析
	ΔX	ΔY	ΔZ	共振周波数 [Hz]	点P変位 [mm]
XYZ-0	0	0	0	379.77	0.60
X-4	-4	0	0	383.04	0.63
X-8	-8			385.74	0.68
Y-1	1	-1	0	406.57	0.54
Y+1	-1	1		353.71	0.67
Z+1.5	-2.5	0	1.5	332.13	0.85
Z+3.5	-5.5		3.5	280.08	1.34

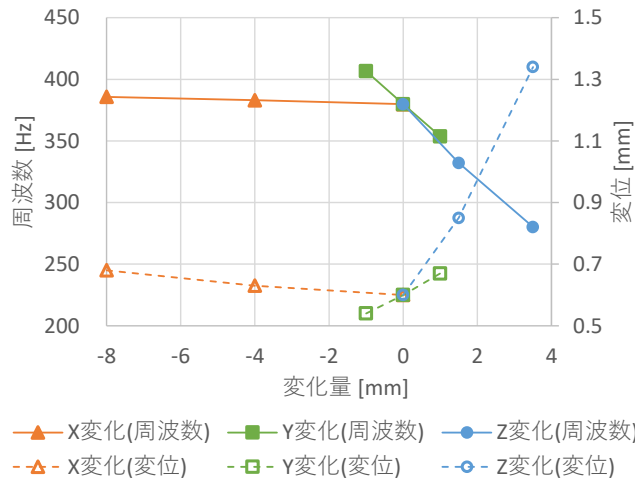


図20 寸法変化による共振周波数およびフレーム変位の変化

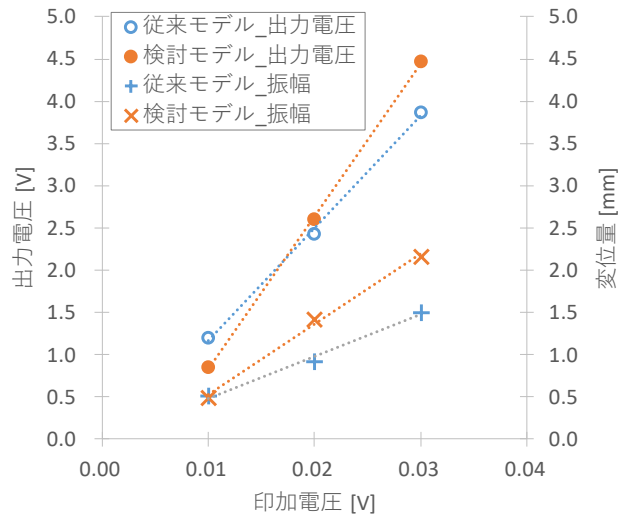


図21 検討モデルの出力電圧および変位量

## 4 まとめ

### 磁歪素子のばらつき

- 同一単結晶であっても切断位置、切断方法によって磁歪素子の特性(最大力係数, 最適磁界)にばらつきが生じ, これは結晶成長時や切断加工時によって生じる残留応力の違いが影響していると考えられる.
- 上記ばらつきのある磁歪素子について, 500 °Cで 1 時間熱処理することで残留応力が軽減され, 均質化することができた. またアルミナ SP 処理では結晶成長時に生じた残留応力の影響と考えられる切断位置によるばらつきは改善できなかったが, 切断加工によって生じたばらつきは均質化することができた. 最大力係数の増加が見られたが, 発電性能の向上には至らなかった.

### デバイス構造の検討

- 錘を重くすると共振周波数が低くなり先端の変位量も大きくなるが, 振動の一次モードと二次モードの共振周波数が入れ替わる領域では変位量が顕著に小さくなるため, 避ける必要がある.
- 磁石自身の電磁誘導の効果と磁歪素子の励磁の効果を確認できた. 磁歪素子の特性である最適磁界と磁石の強さに関係があるため, 適した磁石を選択する必要がある.
- フレーム材質は非磁性の SUS304では発電しなかったが, 磁性のあるペーナイト鋼および45パーマロイでは同等の共振周波数で同等の出力電圧が得られた.
- フレームの曲率部の径を大きくすることで, 共振周波数で振幅量の大きな同一振幅の振動を与えた場合, 従来モデルに比べて大きな出力電圧を得ることができた.

### 参考文献

- 1) 鈴木茂, 藤枝俊, 福田承生:振動発電に利用できる磁歪合金, 日本 AEM 学会誌, Vol. 24, No. 1, pp. 22-27 (2016)
- 2) 鈴木茂, 志村玲子, 福田承生:振動発電技術とその材料, 金属, Vol. 88, No. 12, pp. 1051-1055 (2018)
- 3) 南都十輝, 安藤宏孝, 渡邊清和, 高橋和也, 福田承生, 上野敏幸, 川又透, 藤枝俊, 鈴木茂:チョクラルスキー法による Fe-Ga 基磁歪合金の大型単結晶製造技術の開発, までりあ, Vol. 56, No. 1, pp. 27-29 (2017)
- 4) 鈴木雄二:振動発電の原理, 環境発電ハンドブック第 2 版(エヌ・ティ・エス, 東京), pp. 3-11 (2021)
- 5) 鈴木雄二:振動発電の原理, 環境発電ハンドブック第 2 版(エヌ・ティ・エス, 東京), pp. 15-33 (2021)
- 6) 藤枝俊, 鈴木茂:振動発電用の逆磁歪材料, 振動発電の原理, 環境発電ハンドブック第 2 版(エヌ・ティ・エス, 東京), pp. 141-149 (2021)
- 7) 上野敏幸:Fe-Ga 合金を利用した振動発電技術とその電池フリーIoT への応用展開, までりあ, Vol. 59, No. 1, pp. 6-9 (2020)
- 8) 上野敏幸:磁歪材料を利用した振動発電と IoT 応用, 環境発電ハンドブック第 2 版(エヌ・ティ・エス, 東京), pp. 257-262 (2021)
- 9) 八代浩二, 勝又信行, 尾形正岐, 古屋雅章, 石黒輝雄, 早川亮, 望月陽介, 坂本智明, 五十嵐哲也, 鈴木茂, 上野敏幸:磁歪性振動発電材料を用いた無電源 IoT デバイスの研究・開発, 山梨県産業技術センター研究報告, No. 3, pp. 190-196 (2020)
- 10) 八代浩二, 勝又信行, 尾形正岐, 古屋雅章, 石黒輝雄, 寺澤章裕, 望月陽介, 坂本智明, 五十嵐哲也, 鈴木茂, 上野敏幸:磁歪性振動発電材料を用いた無電源 IoT デバイスの研究・開発(第 2 報), 山梨県産業技術センター研究報告, No. 4, pp. 154-161 (2021)
- 11) 南谷保, 上野敏幸:MAGDA コンファレンス講演論文集, 27<sup>th</sup>, pp. 226-229 (2018)