

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

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*1・上野敏幸*2

Reserch and Development of Non-electric Powered IoT Device using Vibration Energy Harvesting Method with Magnetostrictive Material

Koji YATSUSHIRO, Nobuyuki KATSUMATA, Masaki OGATA, Masaaki FURUYA, Teruo ISHIGURO, Ryo HAYAKAWA, Yosuke MOCHIZUKI, Chiaki SAKAMOTO, Tetsuya IGARASHI, Shigeru SUZUKI*1 and Toshiyuki UENO*2

要 約

振動エネルギーを利用して自ら発電する新磁歪材料を用い、外部電源や内蔵電池による電力供給が不要であり、検出した信号のネットワーク上への無線送信が可能で安価な IoT デバイスを開発・普及し、県内企業の IoT 活用による生産性向上を目的に、まず、発電性能に影響を及ぼす可能性のある Fe-Ga 合金単結晶の加工影響層評価を汎用の X 線回折装置で試みた。極点測定の結果を用いることで加工影響層の状況を定性的に評価できることが明らかとなった。次に、振動発電デバイスの試作を行うとともに、試作したデバイスを用いて無電源 IoT デバイスのシステム構築を行ったところ、発電エネルギーで市販の無線モジュールを動作させることができた。

1. 緒 言

製造業の生産性を向上させるためには IoT 技術の活用が有効である。しかし、製造業向けに提供されている IoT システムの多くは大規模で高価であるため、中小企業の生産現場への導入はわずかに留まっている。大規模なシステムでなくても単純なシステムのニーズは多いため、スマートフォンなどを活用した安価な生産性向上 IoT システムの開発・普及に取り組むことは重要である。

一方、磁場の印加により形状が変化する磁歪材料は、ひずみを負荷す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、ひずみの負荷で発生する磁場を変換して電気エネルギーが得られる。近年では比較的安価で逆磁歪効果の大きな Fe-Ga 合金単結晶材料が開発され、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¹⁾⁻³⁾。

本研究では、振動エネルギーを利用して自ら発電する新磁歪材料（鉄-ガリウム合金単結晶）を用い、外部電源や内蔵電池による電力供給が不要であり、検出した信号のネットワーク上への無線送信が可能で安価な IoT デバイス⁴⁾を開発・普及し、県内企業の IoT 活用による生産性向上を目指す。対象業種は、富士・東部地域に集積し小規模企業が多い繊維産業とする。また、最終的には

開発した IoT デバイスの製造を県内企業へ技術移転して産業を振興することを目的としている。

本報告では、まず、発電性能に影響を及ぼす可能性のある Fe-Ga 合金単結晶の加工影響層を簡便に評価することを目的に、汎用の X 線回折装置で極点測定を行って極点の形状からその評価を試みた。次に、振動発電デバイスの試作を行うとともに、試作したデバイスを用いて無電源 IoT デバイスのシステム構築を試みたので報告する。

2. 実験方法

2-1 試験片

試験片には、チョクラルスキー法で<100>方向に成長させた直径 2 インチの Fe-Ga 合金単結晶を用い、結晶の成長方向と垂直にワイヤ放電加工や SiC 製の砥石で切断し、測定に供した。

2-2 極点測定

2-2-1 装置と座標系

測定には、 θ 軸に極点用多目的試料台を装着した（株）リガク UltimaIV を使用した。

図 1 に測定装置の概略を示す。通常の極点測定と同様に X 線の入射-検出軸に対する試料台の傾斜軸を α 、試料台の回転軸を β としてシュルツの反射法で測定を行った。

2-2-2 極点測定に用いる 2 θ の決定方法

図 2 は、ワイヤ放電加工面を X 線源に Cr を用いて通

*1 国立大学法人東北大学

*2 国立大学法人金沢大学

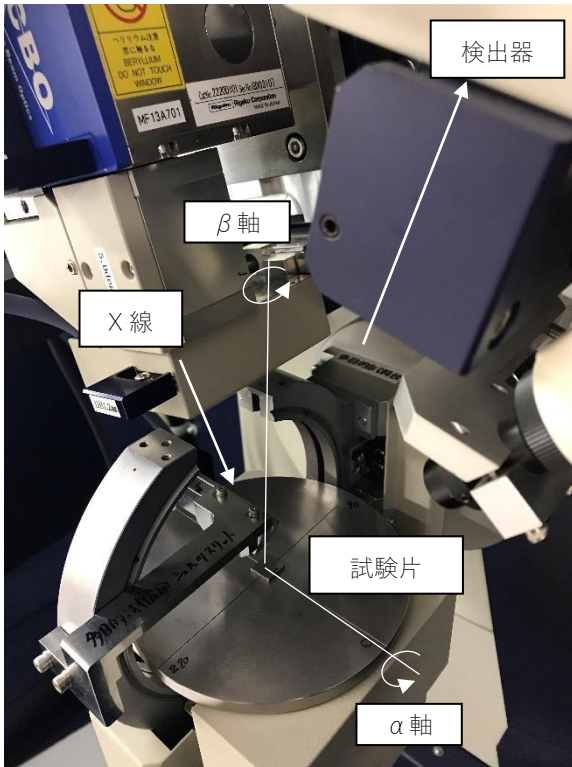


図1 試験装置の概略

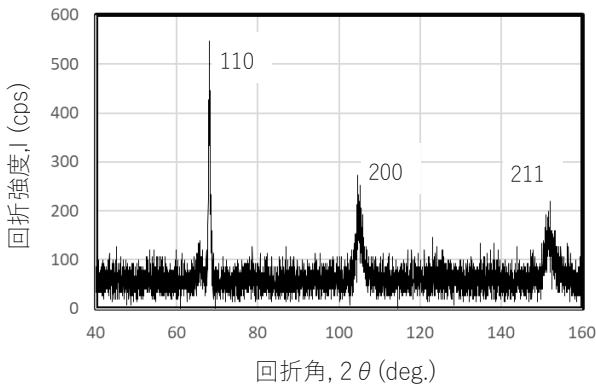


図2 ワイヤ放電加工面のX線回折プロファイル

常の 2θ スキャンしたプロファイルを示す。放電加工により最表面は短時間で溶融と再凝固が生じるため、再凝固層は多結晶化していることが観察された。また、標準的に応力測定に用いる α Fe211 回折は、固溶した Ga の影響で、一般的なフェライトと比較して低角度側に存在していることも確認できた。この状況を利用して、検出された α Fe211 回折で応力測定を行い、得られた 2θ - $\sin^2\psi$ 線図の近似直線と、ポアソン比に鉄鋼の値 0.28 を用いて極点測定に用いる 2θ 角を 151.46° に設定した⁵⁾。 2θ - $\sin^2\psi$ 線図を図3に示す。

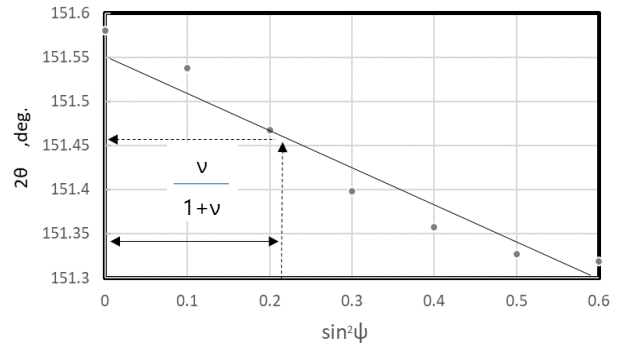


図3 2θ - $\sin^2\psi$ 線図

2-2-3 211 回折の極点

幾何学的関係から 211 回折の極点は、図4に示すように $\alpha=55^\circ$ において $\beta=45, 135, 225, 315^\circ$ の4点が、 $\alpha=20^\circ$ において $\beta=30, 60, 120, 150, 210, 240, 300, 330^\circ$ の8点が、それぞれ存在する。このことから、本実験では $\alpha=55^\circ$ の4点を選択して各々測定することとした。

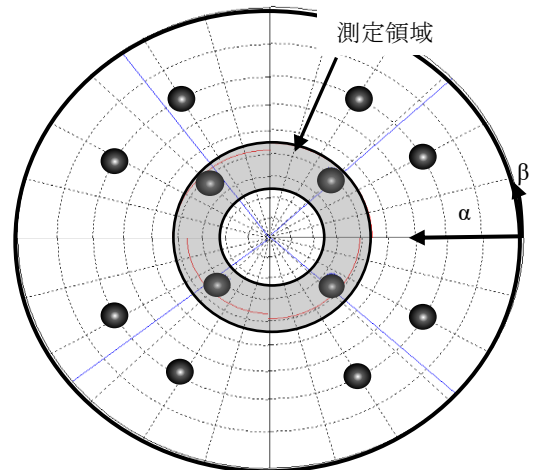


図4 単結晶 211 回折の極点の模式図

2-2-4 極点の評価方法

図5は、図4で示した測定範囲を実測した結果の一例を示す。

実測定では、装置座標系と試料座標系のずれがある。よって、まず、4つの極点を測定して各極点の存在位置を把握した。

次に、段階的に変化させた α 軸に対して、 β 軸を逐次走査して、図6に例示する極点形状を4点得た。そして、図7に例示するように、それぞれの α 角の測定結果について、回折線の平均強度を算出して最大強度を示す α 角、 α_{\max} を決定するとともに、このプロファイルを用いて半価幅法で β_{\max} を決定した。

最後に、得られた α_{\max} において β 走査、 β_{\max} において α 走査を行って、強度プロファイルの半価幅 B_α 、 B_β を算

出し、極点形状を評価した。極点形状を評価した際の測定条件を表 1 に示す。

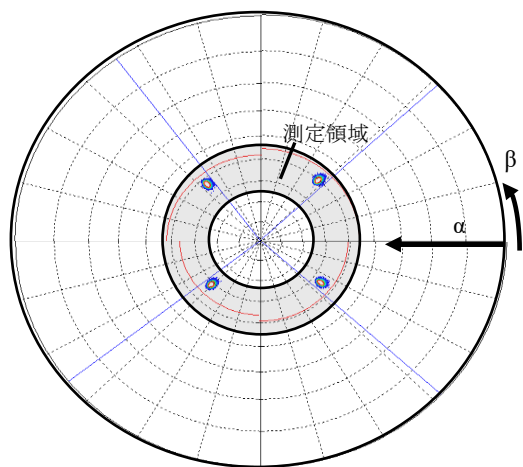


図 5 Fe-Ga 合金単結晶の 211 回折の極点測定例

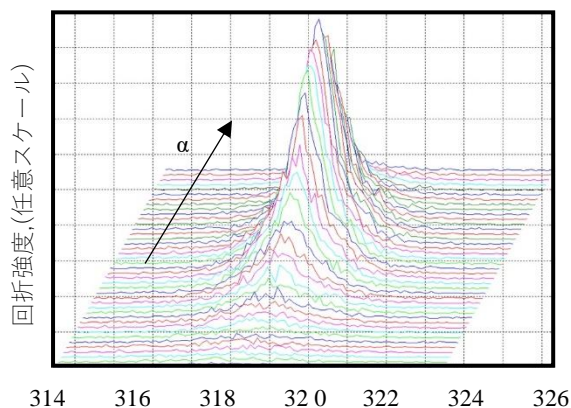


図 6 α Fe211 回折の極点プロファイル測定例

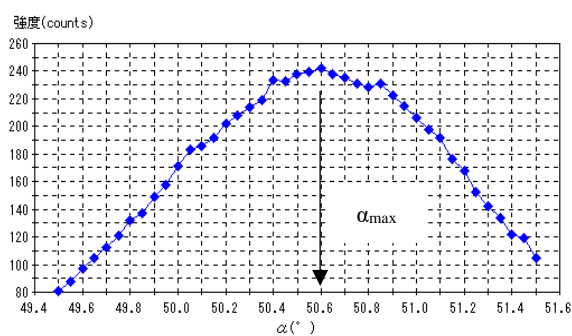


図 7 α 軸走査における回折線の平均強度

表 1 極点測定条件

ターゲットフィルタ	Cr-V
管電圧, kV	40
管電流, mA	40
回折面	211
回折角, °	151.46

3. 結果

3-1 加工影響層のない中心部

図 8 および図 9 は電解研磨によりプロファイル変化がなくなるまで除去、すなわち加工影響層のない試験片における α 走査, β 走査の強度プロファイルの一例を示す。 α 走査ではプロファイルは、ややブロードな形状であった。それに対し、 β 走査ではシャープなプロファイル形状を示した。半価幅は、4 箇所の平均値で、それぞれ、 $B_{\alpha} = 1.485$, $B_{\beta} = 0.234$ であり、 α 方向の方が大きな値を示した。

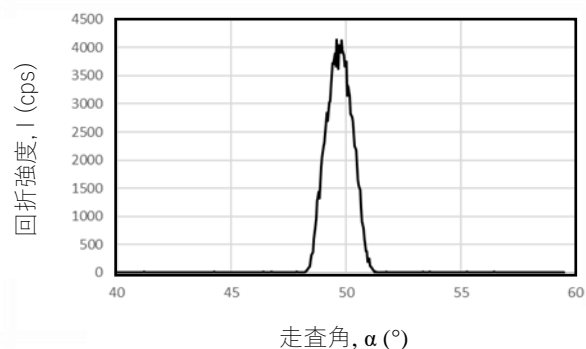


図 8 極点プロファイルにおける α 走査時の回折強度 ($\beta = 225.1^{\circ}$)

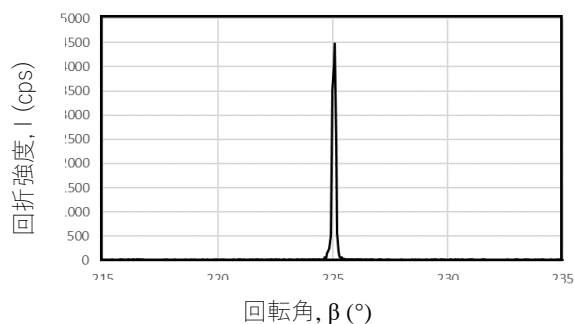


図 9 極点プロファイルにおける β 走査時の回折強度 ($\alpha = 49.70^{\circ}$)

3-2 SiC 砥石による加工面と内部への加工影響層

図 10 は、試料切断機による SiC 砥石切断面の β 走査プロファイル測定例を示す。

強度プロファイルは前述の中心部 (図 9) と比較すると強度は低く、ブロードな形状になっていた。測定と電解研磨で $5 \mu\text{m}$ 程度の除去を繰り返すと、最終的に前述の図 8, 9 の状態になった。

図 11 は、表面から内部への各強度プロファイルにおける半価幅の変化を示す。

最初の電解研磨で約 $7 \mu\text{m}$ の表面層を除去したが、この状態で半価幅は大きく低下し、約 $10 \mu\text{m}$ 以上では、ほ

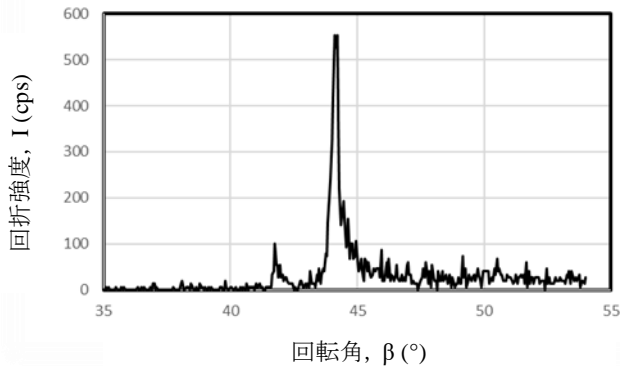


図 10 機械加工した試験片表面の極点プロファイルにおける β 走査時の回折強度

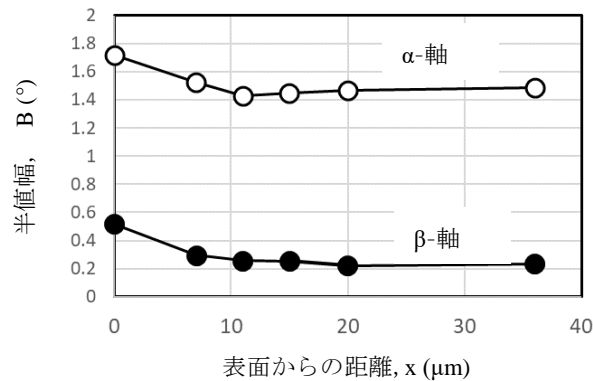


図 11 SiC 切断砥石加工試験片における表面から内部への半値幅変化

ば一定になった。よって、SiC 砥石による切断加工の加工影響層厚さは $10 \mu\text{m}$ 程度といえる。SiC 砥石による切断は、加工時に水を吹きかけながら加工するため温度上昇が少ないこと、また、加工抵抗が少なく切れが良い切断刃であり、除去量も多いため加工面には影響層の残存量が比較的少なかったものと考えられる。

図 12 は、SiC 砥石切断面の走査電子顕微鏡写真を示す。

左上方から右下方へ回転刃が進行したわずかな条痕が観察された。また、連続加工であるが、約 $50 \mu\text{m}$ ピッチ

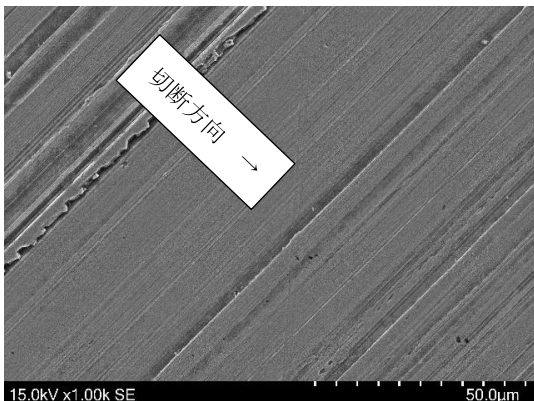


図 12 SiC 切断砥石加工試験片における表面の電子顕微鏡観察結果

の条痕が残存していることと、条痕の深さは浅いことも併せて観察された。

3-3 ワイヤ放電加工面

ワイヤ放電加工面の加工影響層は、図 2 で確認された多結晶質の熔融再凝固とその直下の熱影響層に大別される。本研究で評価した放電加工影響層は、多結晶質の回折線とともに、直下の単結晶からの極点も併せて観察された。このため、極点の強度プロファイルを測定すると、半値幅は、4 箇所平均値で、それぞれ、 $B_\alpha = 1.562$ 、 $B_\beta = 0.926$ であった。前述の切断砥石の加工影響層と比較すると α 軸、 β 軸共に半値幅が大きくなる傾向であったが、 β 軸の方がより増加していた。

4. 振動発電デバイスの試作

4-1 振動発電デバイスの構造と発電原理

図 13 に振動発電デバイスの外観を示す⁴⁾。

振動発電デバイスの主要な構成部品は、磁歪材料、フレーム、巻線コイル、永久磁石の 4 点である。フレームを振動させることで磁歪材料の振動に対応したひずみが繰り返し付与される。ひずみの付与による逆磁歪効果で発生した磁界を巻線コイルで電気に変換することで、交流電力として出力される。この際、永久磁石を配置することで高効率に発電が可能となる。なお、磁歪材料は、フレームの片側にのみ配置し、材料内に付加されるひずみの方向を常時一致させる構造にしている。

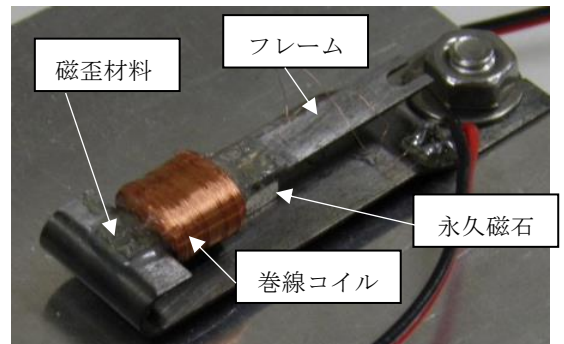


図 13 振動発電デバイスの外観

4-2 振動発電デバイスの試作

磁歪材料は、前節の加工影響層の評価と同様に、チヨクラスキー法で $\langle 100 \rangle$ 方向に引き上げた Fe-Ga 合金単結晶を用いた。ワイヤ放電加工により、長手方向が $\langle 100 \rangle$ 方向になるように $16 \times 4 \text{ mm}$ 、 $t = 0.5 \text{ mm}$ の寸法に切断して、U 字型フレームに貼付した。磁歪材の周囲には、市販の巻線コイルを配置して発電デバイスとした。

4-3 振動発電デバイスの評価

試作した振動発電デバイスは、衝撃的な振動が加わる場合（以降、「衝撃モード」という）と連続的な振動が加わる場合（以降、「連続モード」という）に大別して評価した。

4-3-1 衝撃モード

衝撃モードについては、まず、高速度カメラを用いて、機械的な振動状況を画像解析により評価した。次に、発電状況をオシロスコープを用いて電氣的に評価した。振動発電デバイスへのエネルギーの投入方法は、磁歪材料を貼付してある上面の端部を指先でたわませた後に急激に開放して振動を発生させる方式とした。

図 14 は、高速度カメラによる撮影画像の一例を示す。振動発電デバイスは、鋼製のブロックに U 字型フレームの底面を固定し、磁歪材料を貼付してある上面の端部を指先でたわませた後に急激に開放して振動を発生させた。その状況を（株）フォトロン FASTCAM MiniAX50 を用い、フレームレート 6000 fps で撮影した。撮影した映像を使用し、上面の端部と湾曲部に計測点 A、B をそれぞれ設定し、カトウ光研（株）製の運動解析ソフト DIPP-motion を用いて上下方向の変位および振動スペクトルを解析した。

図 15 は、振動発電デバイス上の二つの計測点における上下方向の変位の経時変化を示す。

計測点 A において、加振直後は約 3 mm の振幅で振動した。振動は、経過時間とともに減衰し、0.2 から 0.3 秒程度で収束した。

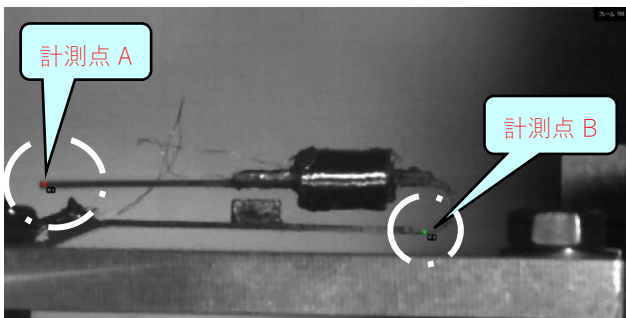


図 14 高速度カメラによる撮影画像と振動解析位置

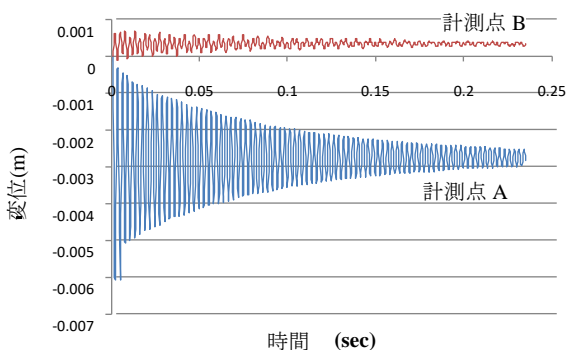


図 15 振動発電デバイスにおける変位の経時変化

計測点 B において、加振直後の振幅は約 0.5 mm で、計測点 A と比較すると約 1/6 であった。

図 16 は、振動発電デバイスの振動スペクトルを示す。

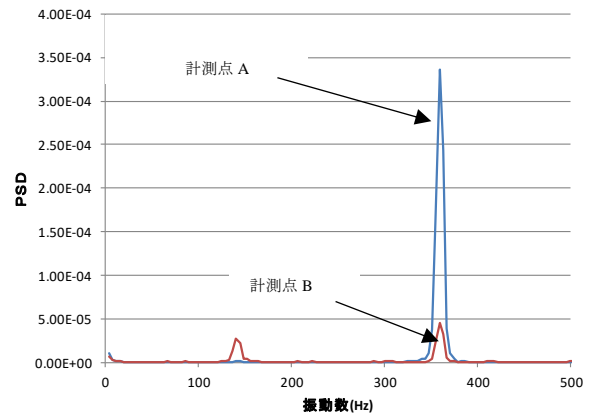


図 16 振動発電デバイスの振動スペクトル

計測点 A の固有振動数は、359.4 Hz であった。それに対し、計測点 B では、359.4 Hz の他に 140.6 Hz の固有振動数が観察された。このことから、計測点 A では単純な振動が発生しているが、計測点 B では、複数のモードの振動が発生していると考えられる。

次に、オシロスコープ（テクトロニクス（株）TPS2024）により電氣的特性の評価を行った。

図 17 は、計測した発生電圧の経時変化の例を示す。この場合、発生電圧は、23.4 V (p-p 値) で環境発電デバイスとしては比較的大きいことが判明した。ばらつきを確認するため、同一方法で 3 個の振動発電デバイスを作製して測定を行った。固有振動数は、ばらつきは比較的少なく約 330 Hz 前後であったが、発生電圧には差が見られた。原因については今後の検討課題とする。なお、ブリッジダイオードとコンデンサで整流と安定化を図ったところ、直流で 8 V の出力が得られた。

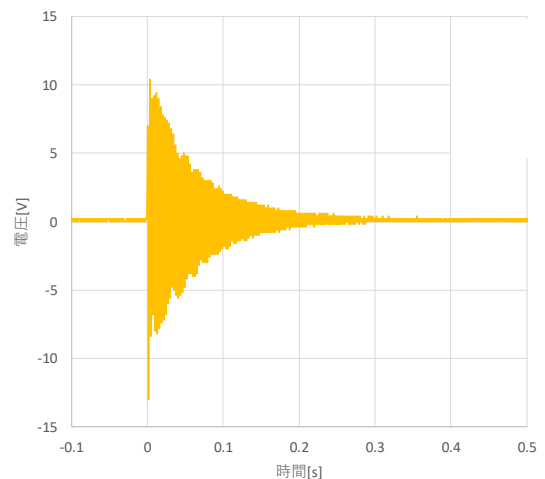


図 17 オシロスコープで計測した発生電圧の経時変化

4-3-2 連続モード

次に、振動試験機（エミック（株）F-1000BD/A）を用いて固有振動数で振動発電デバイスを連続的に加振するとともに、オシロスコープにより電気的特性の評価を行った。図 18 は、その概略を示す。



図 18 振動試験機を用いた振動発電デバイス評価概略

評価は、まず、振動試験機の加振部に発電デバイスを装着し、周波数を掃引して共振周波数を求めた。その後、共振周波数で振動発電デバイスを加振して発電特性をオシロスコープで計測した。図 19 は、オシロスコープによる振動発電デバイスの発電状況の評価例を示す。

周波数掃引により固有振動数が 342.5 Hz であることを確認し、この周波数で、加速度を 10 m/s^2 として加振した。その結果、発生電圧は、振幅で約 1.5 V、p-p 値で約 3 V であった。

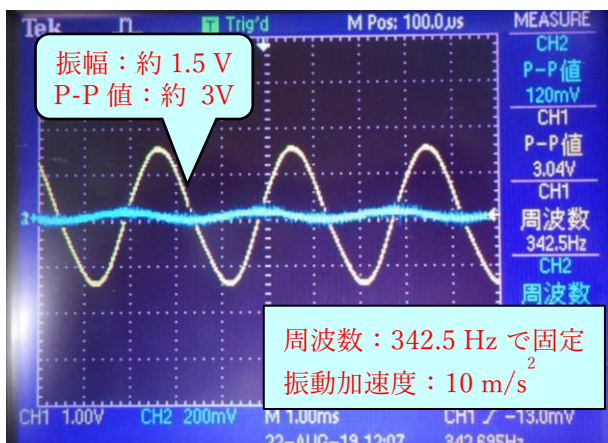


図 19 振動試験機を用いた連続モードの発電評価例

5. 通信システムの構築

試作した振動発電デバイスを用い、発電した電力で通信を行う簡易システムの構築を試みた。発電モードは、前述の「衝撃モード」とし、市販の組込み用無線

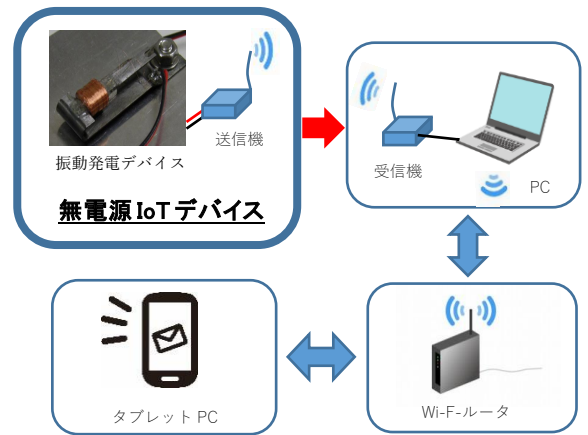


図 20 通信システムの概略

表 2 使用機器の構成

送信機	IM315TX(Interplan)
受信機	IM315RX(Interplan)
PC	Lets Note CF-LV(Panasonic)
Wi-Fi ルータ	PA-WG1200HP(NEC)
タブレット	Google Nexus9(HTC)

モジュールを利用して、振動発電デバイスへの衝撃を無線でタブレット PC まで伝えるシステムとした。図 20 は、その概略を示す。また、使用した機器の構成を表 2 に示す。4-3-1 節と同様に、振動発電デバイス上端部を指先でたわませた後に急激に開放して振動を発生させる「衝撃モード」で、通信を行うことができ、タブレット PC に状況を表示させることができた。

今回使用した送信機（モジュール）の消費電力は、メーカー仕様によると DC 2.0 V で 1.5 mA である。このため、振動発電デバイスと送信機の間にはダイオードブリッジとコンデンサを配置して整流と安定化を図っている。通信が可能であったことから、振動発電デバイスは、この通信に必要な電力を発生していることが明らかとなった。

6. 結 言

X 線回折による Fe-Ga 合金単結晶における加工影響層の評価、ならびに、振動発電デバイスの試作とそれを利用した通信システムの構築を目的に研究を行って、以下の結果を得た。

- (1) 極点測定を行い、得られた極点の β 軸方向、 α 軸方向の半価幅を測定したところ、表面状態によってその値は変化した。
- (2) 切断砥石による加工面において、電解研磨による表面層除去と極点測定を繰り返し行うことで加工影響層厚さの評価が可能であったことから、極点測定により加工

影響層の状況を定性的に評価できることが明らかとなった。

(3)磁歪材料を使用して振動発電デバイスを試作したところ、衝撃モードでの発生電圧は 20 V を超える大きな値となった。また、連続モードでの発生電圧は、約 3 V であった。

(4)振動発電デバイスを衝撃モードで発電させ、発生した電力で市販の無線モジュールを動作させることができた。また、この状況をノート PC と Wi-Fi ルータを介してタブレット PC まで送信することができた。

今後は、得られた知見を元に、振動発電デバイスの性能安定化を図るとともに、連続モードでの織機見守りシステムを開発して実機への適用を行っていく。

謝辞

本研究の実施に際し協力いただいた、山田博之 主幹研究員、長田和真 主任に感謝申し上げます。

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, まてりあ, Vol.56, No.1, pp.27-29 (2017)
- 4) 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, まてりあ, Vol.59, No.1, pp.6-9 (2020)
- 5) 日本材料学会編: 改著・X 線応力測定法, (養賢堂, 東京), p.61 (1981)