

## 山梨県総合理工学研究機構 研究成果報告書

研究課題名	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
研究期間	令和1年～令和2年度(2ヶ年)
研究者	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, 寺澤章裕, 宮川和幸(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	振動発電, 逆磁歪, IoT デバイス, エネルギーハーベスティング

### 1. 研究成果の概要:

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を用いることで、外部電源や内蔵電池による電力供給が不要、かつ、検出した信号のネットワーク上への無線送信が可能である安価な 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とした。材料分野の研究においては、素材の熱的、機械的物性値の測定を行うとともに、発電性能に影響を及ぼす可能性のある結晶の加工影響層評価を X 線回折法で行った。また、素材に熱処理を適用したところ、結晶の健全化が確認できた。デバイス分野の研究においては、稼働中の織機の振動解析から発電に適した部位を選択するとともに、織機に装着した振動発電デバイスの発電エネルギーを用い、特定小電力無線モジュールを使用した見守り通信システムを構築することができた。

### 2. 研究の目的

製造業の生産性向上には IoT 技術の活用が有効であるが、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、ひずみの負荷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)3)</sup>。

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である鉄-ガリウム合金(以下、Fe-Ga 合金という)を用い、安価な IoT デバイス<sup>4)</sup>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して行うものである。対象業種は、代表的な地域産業の一つで富士・東部地域に集積し、小規模企業が多い繊維産業とした。

研究内容は、「材料分野」と「デバイス分野」に大別される。表1に各分野別の研究項目を示す。以降では、表 1 で示した研究分野および項目別に述べる。なお、実験には全てチョクラスキー法で結晶の成長方向を[100]方向とした直径 2 インチの Fe-Ga 合金単結晶を原材料として用いている<sup>1)</sup>。

### 3. 研究テーマ

#### 3-1 機械的、熱的物性値等の基礎データ収集(材料分野-I)

本研究で用いる Fe-Ga 合金は、開発後間もない素材であるため、工業的な活用に不可欠な機械的、熱的物性値の報告例が少ない。中でも、熱的な物性値の報告は見られないため、熱的物性値として、熱拡散率、比熱、熱伝導率および線膨張係数を、機械的物性値として、縦弾性係数およびポアソン比をそ

表1 分野別の研究項目

研究分野	令和元年度	令和2年度
1.材料分野	I. 機械的, 熱的物性値等の基礎データ収集 II. 加工影響層の評価方法確立	III. 加工影響層がデバイス性能に及ぼす影響を解明 IV. 材料の改良を試み効果を検証
2.デバイス分野	I. デバイスの試作技術確立 II. 発電特性, 評価方法の確立 III. 発電現象の環境影響検証	IV. ターゲット機器の振動解析 V. IoTシステム化と適用性検証

それぞれ実測した。

### 3-1-1 熱的物性値測定

#### 3-1-1-1 熱拡散率, 比熱および熱伝導率

測定装置には, NETZSCH 社 Nanoflash LFA447 を用い, レーザフラッシュ法で測定を行った。

試験片の上面からレーザを照射し, 赤外検出器で下面の温度変化を測定した。試験温度は, 30°Cから最高 300°Cまで 7 段階に設定した。標準試料は 300°Cのみアルミナを用い, 他は全て Pyroceram9606 を用いた。測定は 5 回行って平均値を結果とした。

試験片は 9.966 x 9.997 x 2.065mm の形状に加工した。質量は 1.598g であることから密度は 7.786g/cm<sup>3</sup> と算出される。表 2 に, それぞれの結果を示す。

測定した 3 種の物性値には全て温度依存性が認められ, 測定温度の上昇とともに値は上昇する傾向を示した。

表 2 レーザフラッシュ法による熱的物性値の測定結果

測定温度(°C)	30	50	100	150	200	250	300
熱拡散率(mm <sup>2</sup> /s)	4.777	4.814	5.005	5.109	5.138	5.170	5.224
比熱(kJ/(kg・K))	0.454	0.455	0.468	0.474	0.465	0.492	0.500
熱伝導率(W/(m・K))	16.88	17.05	18.23	18.85	18.61	19.80	20.35

#### 3-1-1-2 線膨張係数

測定装置には, リガク社 EVO2 を用い, 圧縮法(荷重 98mN)で測定を行った。試験片は 3.0 x 3.0 x 10.0mm の形状に加工した。測定温度は 100~1200°Cまでの範囲を 10°C/min で昇温し, 100°C毎に算出した。測定は 4 回行って平均値を結果とした。なお, 測定は窒素雰囲気で行った。

表 3 に, 測定結果を示す。線膨張係数についても上述の熱拡散率と同様に, 温度依存性が認められ, 算出の範囲において, 10.1 x 10<sup>-6</sup>から 16.2 x 10<sup>-6</sup>まで測定温度の増加とともに上昇した。表 4 に, Fe-Ga 合金と類似した熱的物性値を示す金属の文献値<sup>5)</sup>を参考として示す。一般的な炭素鋼と比較すると, 比熱と線膨張係数は同等であるが, 熱拡散率や熱伝導率は大きく異なる値であった。それに対し, ステンレス鋼, 耐熱鋳鋼, Ni 基耐熱合金は4種の物性値ともに類似した値を示した。これらの合金は, 成分として鉄が約 80%含有していることが共通した特徴であることから, 熱的物性値は主成分である鉄の含有量に大きく依存すると考えられる。

表 3 線膨張係数の測定結果

測定温度(°C)	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200
線膨張係数 x 10 <sup>-6</sup> (1/K)	10.1	11.4	12.0	12.9	13.5	13.9	14.3	14.7	15.1	15.5	15.8	16.2

表 4 Fe-Ga 合金と類似した熱的物性値を示す金属<sup>5)</sup>

合金名	炭素鋼 (S35C)	ステンレス鋼 (SUS304)	耐熱鋳鋼 (SUH310)	Ni 基耐熱合金 (インコネル 600)
熱拡散率(mm <sup>2</sup> /s)	11.8	4.07	3.7	3.96
比熱(kJ/(kg・K))	0.465	0.499	0.54	0.444
熱伝導率(W/(m・K))	43.0	16.0	15.9	14.8
線膨張係数 x10 <sup>-6</sup> (1/K)	11.8	13.6	14.1	13.3

### 3-1-2 機械的物性値

測定は、直交ゲージを用いたひずみゲージ法で行った。試験片は 10.0 x 10.0 x 1.6mm の形状に加工し、図 1 に示すとおり試験機テーブルに設置して y 面に荷重を負荷した。その後、結晶製造ならびに測定の精度を確認するため、試験片を回転させて z 面を上面にして同一の測定を行った。

物性値の結晶面依存性が予測されるため、xyz 全ての試験片面を 100 面とした試験片 A、x 面を 100 面に、y 面、z 面を 110 面、すなわち、試験片 A の x 面の法線軸に対して 45° 回転させて切り出した試験片 B をそれぞれ準備した。x 面の表裏にひずみゲージを貼付し、材料試験機により y 面および z 面に 200MPa まで圧縮荷重を各 5 回ずつ、それぞれ負荷して縦弾性係数とポアソン比を測定して平均値を算出した。なお、物性値算出には負荷荷重 180~200MPa の範囲を用いた。

表 5 に機械的物性値の測定結果を示す。試験片 A、B ともに結晶面として等価な y 面、z 面間の差は少ないことから、結晶製造と測定の精度は概ね良好と考えられる。試験片 A の y 面および z 面の平均値は縦弾性係数で 70.3GPa、ポアソン比は 0.498 であった。縦弾性係数は、鉄系合金としては小さく、アルミニウム合金と同様であった。一方、試験片 B の y 面および z 面の平均値は縦弾性係数で 156GPa、ポアソン比は -0.321 であった。試験片 A と比較すると縦弾性係数は大きく、鋳鉄と同等な値であった。また、縦弾性係数値およびマイナスのポアソン比を示す特異な性質は既報<sup>6,7)</sup>と同様であることが明らかとなった。

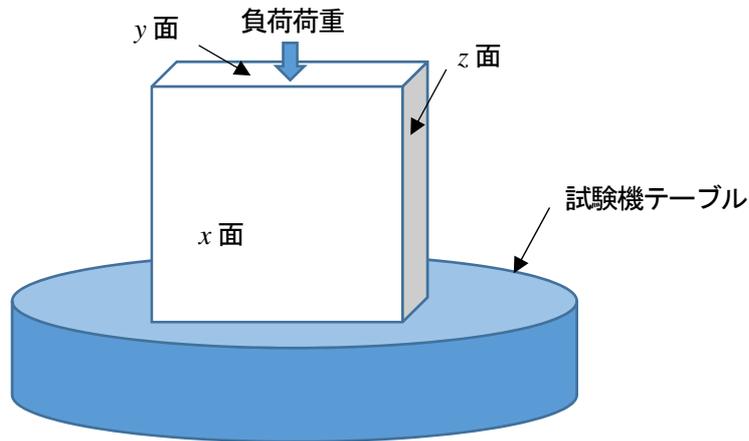


図 1 機械的物性値測定における試験片の設置概略

表 5 機械的物性値の測定結果

試験片	試験片面(結晶面)	縦弾性係数(GPa)	ポアソン比
A	y(100)	58.6	0.419
	z(100)	82.0	0.576
B	y(110)	148	-0.345
	z(110)	163	-0.296

### 3-2 加工影響層の評価方法確立(材料分野-Ⅱ)

物体を所望の形状にするには、何らかの手法を用いて「加工」を行う必要がある。シリコンなどの半導体や本研究のような機能性を有する素材の加工には、「切断加工」を行う。切断加工は、材料ロスを低減するため硬質のブレード(刃)やワイヤなどの工具を単独あるいは砥粒を併用して行うことが多い。

加工を行うと、加工時の工具との接触により被加工物の表面には微細な塑性変形が発生し、その深さは数 $\mu\text{m}$ ～数十 $\mu\text{m}$ におよぶ。また、導電性の材料ではワイヤ放電加工法を適用する場合がある。この場合には放電の電気エネルギーにより被加工物表面には溶融した後に再凝固した変質層が存在する。

本研究では、加工により生じたこれらの表層を「加工影響層」と呼ぶが、加工後の素材をデバイスに適用する場合、素材厚さが薄いと加工影響層の存在はデバイス性能に影響を及ぼす可能性が高く、無視できない。このため、予め加工影響層の存在状況の評価するとともに、状況に応じては除去することも必要となる。本項では、X線回折の極点測定により加工影響層の評価を試みた。

#### 3-2-1 極点測定

##### 3-2-1-1 装置と座標系

測定には、 $\theta$ 軸に極点多目的試料台を装着したX線回折装置(株)リガク製UltimaIVを使用した。

図2に測定装置の概略を示す。通常極点測定と同様にX線の入射-検出軸に対する試料台の傾斜軸を $\alpha$ 、試料台の回転軸を $\beta$ としてシュルツの反射法で測定を行った。

##### 3-2-1-2 極点測定に用いる $2\theta$ の決定方法

図3は、X線侵入深さを低減のため、X線源にCrを用いてワイヤ放電加工面を通常の $2\theta-\theta$ スキャンしたプロファイルを示す。研究に用いた材料は単結晶であるが、多結晶構造を現す3本の $\alpha\text{Fe}$ 回折線が認められた。放電加工では短時間で溶融と再凝固が生じ、最表面に再凝固層が残存することから、この現象は再凝固層の多結晶化と考えられる。また、標準的に応力測定に用いる $\alpha\text{Fe}211$ 回折は、固溶したGaの影響で、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 $\alpha\text{Fe}211$ 回折で応力測定を行い、得られた $2\theta-\sin^2\psi$ 線図を図4に示す。この近似直線と、ポアソン比に鉄鋼の値0.28を用いて極点測定に用いる $2\theta$ 角を $151.46\text{ deg}$ に設定した<sup>8)</sup>。

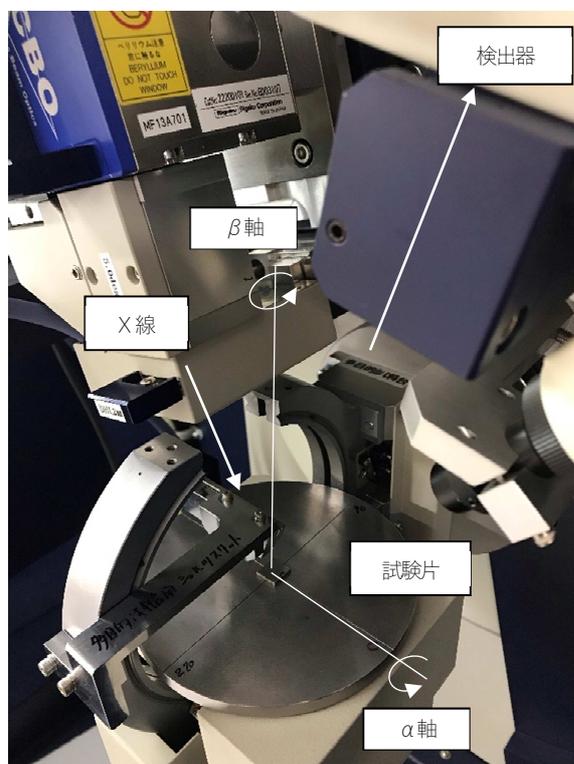


図2 極点測定装置の概略

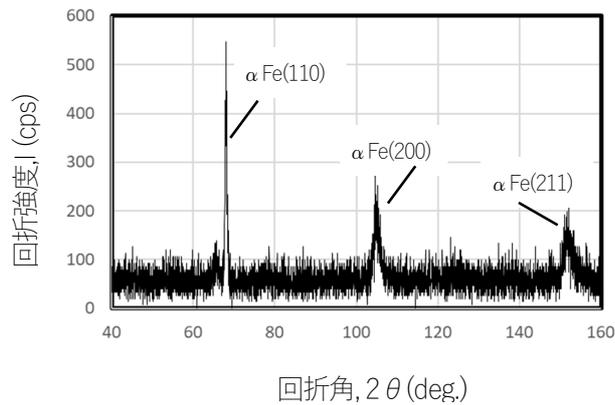


図3 ワイヤ放電加工面の 2θ-θ スキャンプロファイル

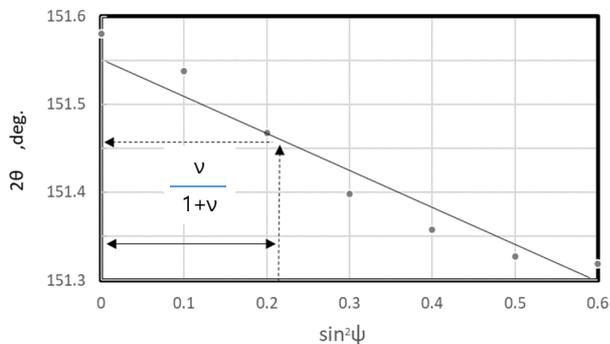


図4 2θ-sin²ψ 線図

### 3-2-1-3 211 回折の極点

幾何学的関係から 211 回折の極点は、図 5 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。

### 3-2-1-4 極点の評価方法

図 6 は、図 5 で示した測定領域を実測した結果の一例を示す。

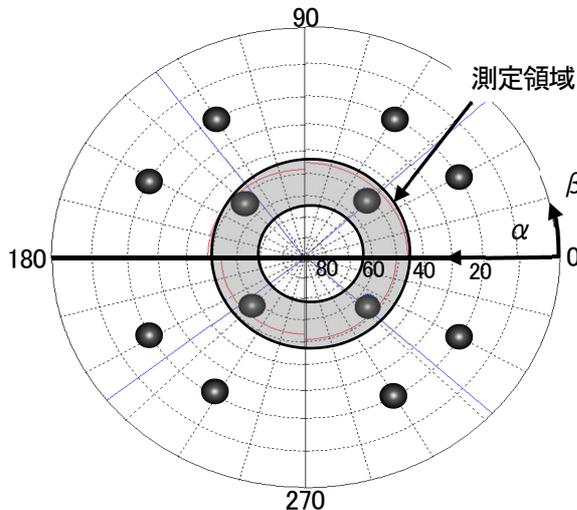


図5 単結晶 211 回折の極点の模式図

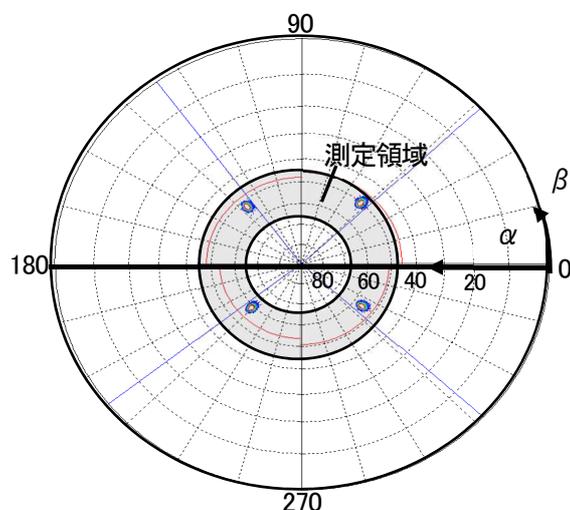


図6 Fe-Ga 合金単結晶の 211 回折の極点測定例

実測定では、試料の加工やセッティングの精度により結晶面と回折装置の試料台との位置関係にずれが生じる。よって、まず、図6のように4つの極点形状を測定して各極点の存在位置のずれを把握した。

次に、段階的に変化させた $\alpha$ 軸に対して $\beta$ 軸を逐次走査し、図7に例示する4つの極点形状を得た。この図をもとに、図8に例示するように、それぞれの $\alpha$ 角の測定結果について回折線の平均強度 $I$ を算出し、最大強度を $I_{max}$ とし、それを示す $\alpha$ 角、 $\alpha_{max}$ を決定した。この $\alpha_{max}$ のプロファイルを用いて半価幅法で $\beta_{max}$ を決定した。

最後に、得られた $\alpha_{max}$ において $\beta$ 走査を、 $\beta_{max}$ において $\alpha$ 走査を行って、回折強度曲線の半価幅 $B_\alpha$ 、 $B_\beta$ 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6に示す。

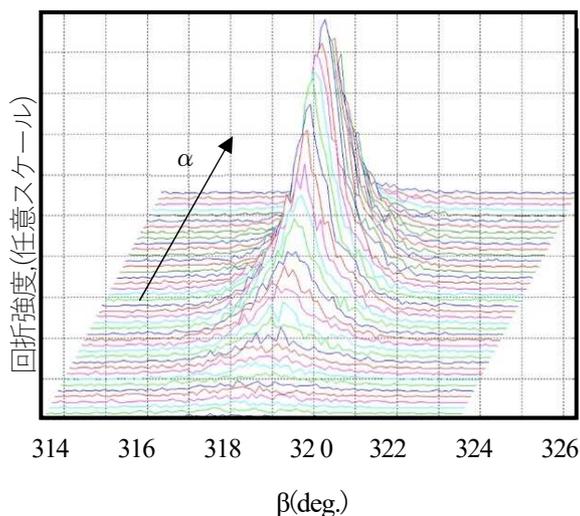


図7  $\alpha$ Fe211 回折の極点プロファイル測定例

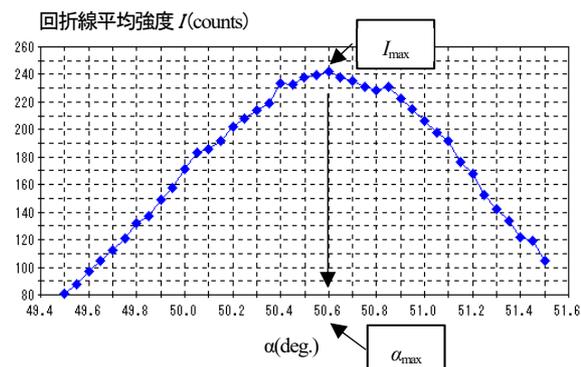


図8  $\alpha$ 軸走査時の回折線平均強度

表6 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, deg.	151.46

### 3-2-1-5 加工影響層のない中心部

図9および図10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 $\alpha$ 走査、 $\beta$ 走査の強度プロファイルの一例を示す。 $\alpha$ 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、 $\beta$ 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箇所での平均値で、それぞれ、 $B_\alpha=1.485$ 、 $B_\beta=0.234$ であり、 $\alpha$ 走査の方が大きな値を示した。

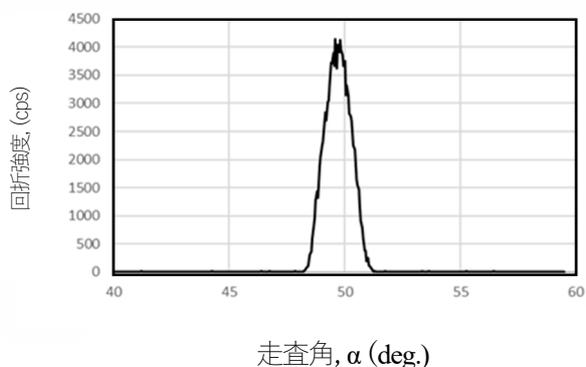


図9 極点プロファイルにおける $\alpha$ 走査時の回折強度 ( $\beta=225.1$ deg.)

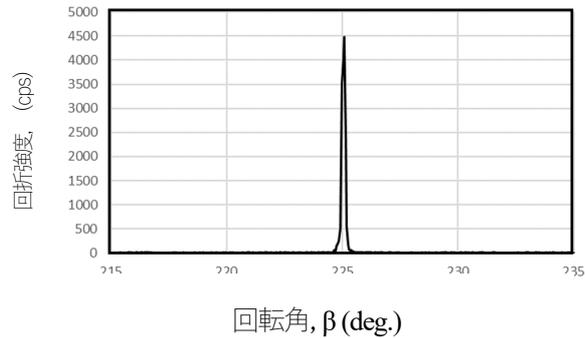


図 10 極点プロファイルにおける  $\beta$  走査時の回折強度 ( $\alpha = 49.70$  deg.)

### 3-3 加工影響層がデバイス性能に及ぼす影響(材料分野-III)

図 11 に、前節と同様に測定した油中ワイヤ放電加工した試験片表面の電解研磨前後における極点図を示す。

電解研磨前は、加工により発生したひずみや結晶状態の変化により、極点は 4 カ所ともに楕円形であった。約  $37\mu\text{m}$  の電解研磨後は、極点は長方形となった。この長方形の形状は、入射した X 線のビーム形状がそのまま検出されていると考えられる。このことは、入射 X 線が結晶状態が健全な単結晶表面で回折、すなわち、電解研磨により加工影響層が除去されたことを示している。

次に、加工影響層の深さを明らかにするため、ワイヤ放電加工面に電解研磨と極点図測定を繰り返し行った。この時の電解研磨量と回折強度( $\alpha_{\text{max}}$ ,  $\beta_{\text{max}}$ )との関係を図 12 に示す。

$\alpha_{\text{max}}$ ,  $\beta_{\text{max}}$  ともに電解研磨量が約  $20\mu\text{m}$  まで回折強度は増加したが、 $20\mu\text{m}$  以上では  $\alpha_{\text{max}}$ ,  $\beta_{\text{max}}$  ともに一定となった。本実験で用いた極点図測定の条件から、試験片への X 線の侵入深さは約  $8\mu\text{m}$  であり、深さ方向の分解能は比較的良好であることから、回折強度の挙動は深さ方向の加工影響層の状態を明確に評価していると考えられる。これにより、本実験におけるワイヤ放電加工の加工影響層深さは約  $20\mu\text{m}$  といえる。

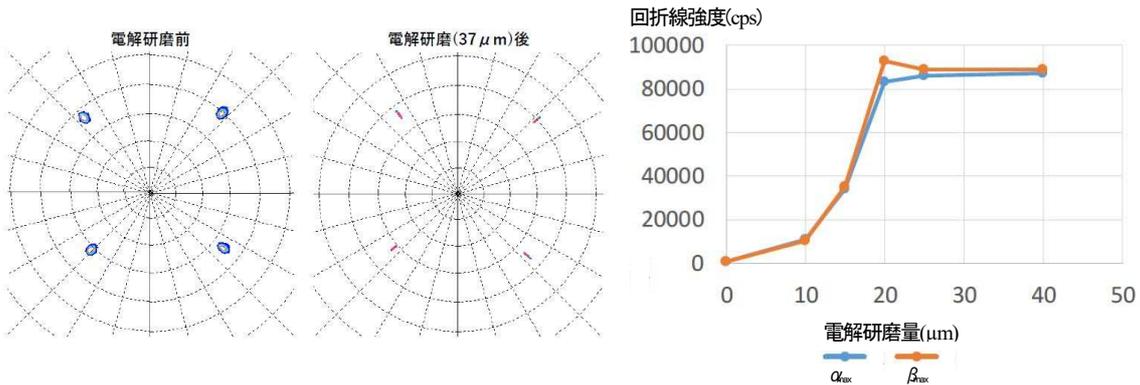


図 11 放電加工面の極点図における極点形状 図 12 極点図測定における回折強度と電解研磨量

### 3-4 材料の改良を試み効果を検証(材料分野-IV)

単結晶材料の製造には種々の方法がある。工業的な製法では、チョクラルスキー法に代表される熔融層から連続して徐々に凝固させる手法が多い。この手法では、材料全体が同時に凝固しないので、多かれ少なかれ熱ひずみが残留する。また、前報<sup>9)</sup>のとおり、逆磁歪特性を向上させるには、極力ひずみを均一にして磁区を整列させることが有効と考えられる。そこで、素材の熱処理による単結晶内のひずみ除去や結晶の健全化を目的に、実験を行った。

### 3-4-1 実験方法

試験片形状は 3x3x10mm で、熱分析用の電気炉を使用して 1200℃まで加熱して徐冷した。加熱前後の試験片について、前節と同様に  $\theta$  軸に極点多目的試料台を装着した X 線回折装置を使用し、Cr-K $\alpha$  線の  $\alpha$ Fe211 回折を用いて評価した。正極点分析において、まず、回折強度が最大となる仰ぎ角と回転角を測定し、その位置における  $2\theta$  測定を行った。  $2\theta$  の走査範囲は 145～155deg.とし、走査速度は 10deg./min とした。なお、発散スリットおよび散乱スリットは  $1/6^\circ$  を、受光スリットは 0.15mm で測定を行った。

### 3-4-2 実験結果

図 13 は、熱処理前の回折線プロファイルを示す。ピークトップを示す  $2\theta$  は、約 151deg.であり、ピーク強度は約 2000cps であった。

図 14 は、熱処理後の回折線プロファイルを示す。

ピーク強度は約 40000cps で加熱前の 20 倍となる大きな値を示した。ピークは急峻となり、K $\alpha_2$  回折と思われる回折線が明瞭に存在するダブルピークとなった。K $\alpha_1$  回折のピークトップ位置は 150.6 deg.であり、加熱前と比較してやや低角度となった。このように、熱処理による回折線の急峻化で結晶の健全化が確認できた。結晶の健全化や前述の加工影響層の存在が逆磁歪特性に及ぼす影響については、特性の評価方法も含めて詳細に検討する必要があることから、今後の課題とする。

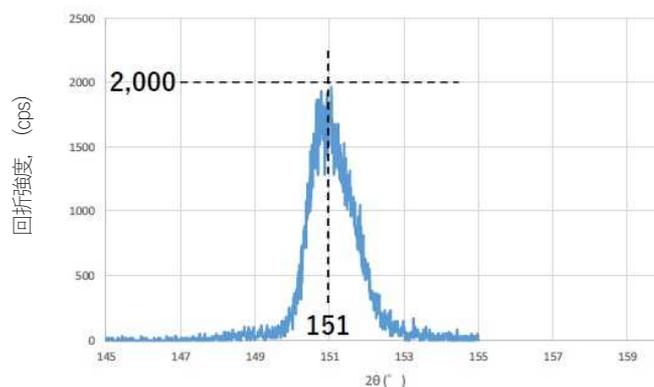


図 13 熱処理前の  $\alpha$ Fe<sub>211</sub> 回折プロファイル

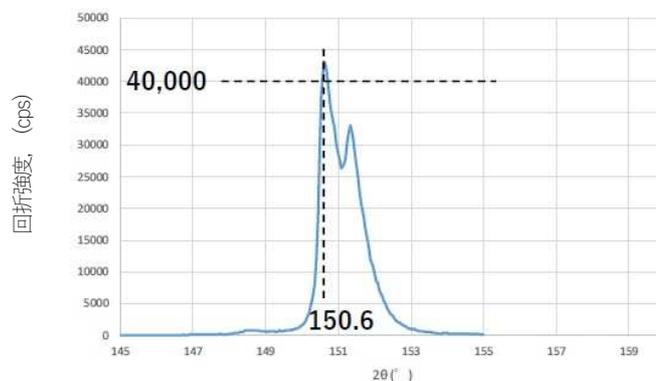


図 14 熱処理後の  $\alpha$ Fe<sub>211</sub> 回折プロファイル

### 3-5 振動発電デバイスの試作(デバイス分野-I)

前節までに述べた Fe-Ga 合金を用いて振動発電デバイスを試作し、その発電特性を評価するとともに、発電現象の環境影響(温度依存性)を検証した。また、本研究で適用対象として選択した織機の振動解析を行うとともに、織機の振動による発電で IoT システム化を試みた。これらについて順次述べる。

図 15 に試作した振動発電デバイスの外観を、図 16 に振動発電デバイスの断面模式図を各々示す。

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。フレームを上下に振動させることで、それに対応した曲げひずみが磁歪材料に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。また、磁歪材料は、図 16 に示すとおりフレームの片側にのみ配置している。このことで、磁歪材料に付加されるひずみの方向は材料内で常時一致することとなり、発電の高効率化を実現している。加えて、永久磁石を配置することでさらなる高効率発電が可能となる<sup>4)</sup>。磁歪材料は、ワイヤ放電加工により、長手方向が[100]方向になるように 16x4mm、板厚 0.5mm の短冊形状に切断して、フレームにエポキシ樹脂で貼付した。

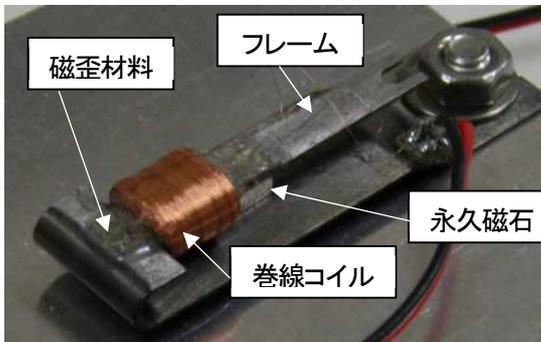


図 15 振動発電デバイスの外観

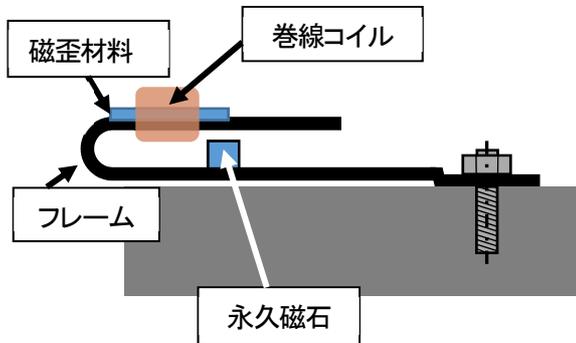


図 16 振動発電デバイスの断面模式図

### 3-6 発電特性, 評価方法の確立(デバイス分野-II)

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。

#### 3-6-1 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、発電の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約 3mm 撓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 17 は、高速度カメラによる撮影画像の一例を示す。

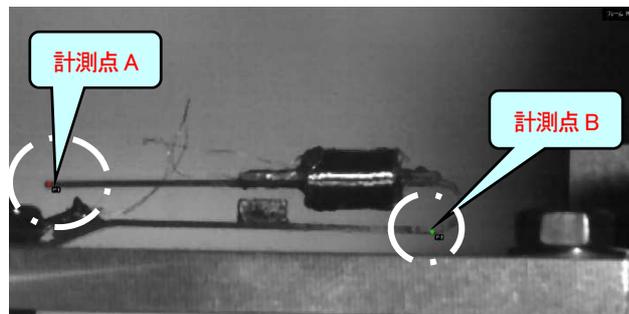


図 17 高速度カメラによる撮影画像と振動解析位置

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、前述のとおり端部を指先で撓ませ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 6000fps 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 18 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 3mm 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。

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

図 19 は、振動発電デバイスの振動スペクトルを示す。

計測点 A の固有振動数は、359.4Hz であった。それに対し、計測点 B では、359.4Hz の他に 140.6Hz 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。

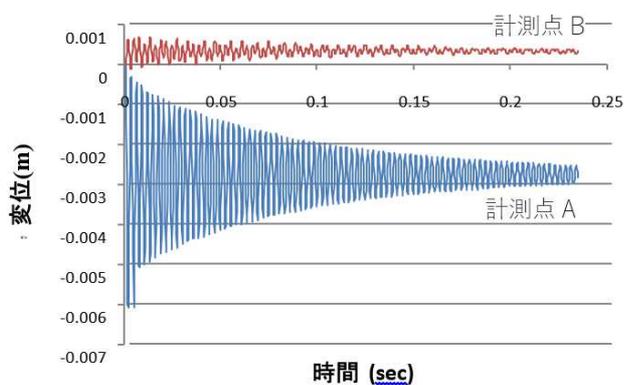


図 18 振動発電デバイスにおける変位の経時変化

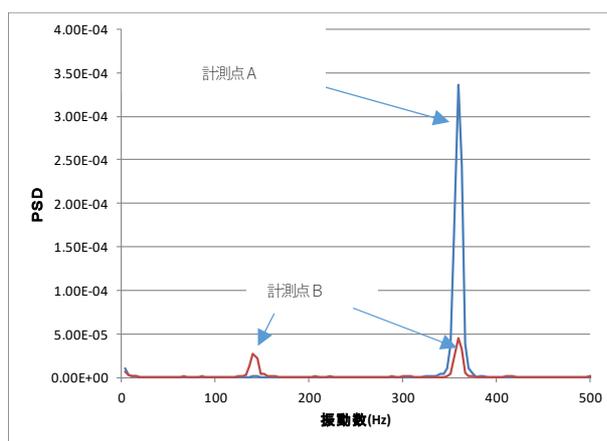


図 19 振動発電デバイスの振動スペクトル

次に、発電の状況をオシロスコープ(テクトロニクス(株) TPS2024)を用いて電氣的に評価した。

図 20 は、オシロスコープで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、23.4V(p-p 値)で環境発電技術の中では大きいことを示した。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成して測定を行った。固有振動数は、ばらつきは比較的少なく約 330Hz 前後であった。しかし、発生する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 8V の出力が得られた。

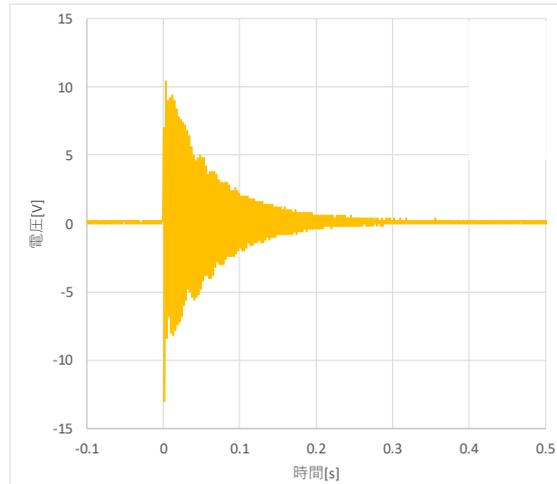


図 20 衝撃モードにおけるオシロスコープで計測した発生電圧の経時変化の例

### 3-6-2 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し、オシロスコープにより電氣的特性の評価を行った。図 21 は、機器の設置状況を示す。

評価は、まず、振動試験機の加振部に振動発電デバイスを装着し、周波数を掃引して共振周波数を決定した。その後、共振周波数で振動発電デバイスを加振して発電の状況をオシロスコープで計測した。図 22 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測定結果を示す。

周波数掃引により固有振動数が 342.5Hz であることを確認したため、この周波数で、加速度を  $10\text{m/s}^2$  として加振した。その結果、発生電圧は約 3V(p-p 値)であった。



図 21 振動試験機を用いた連続モードの機器設置状況

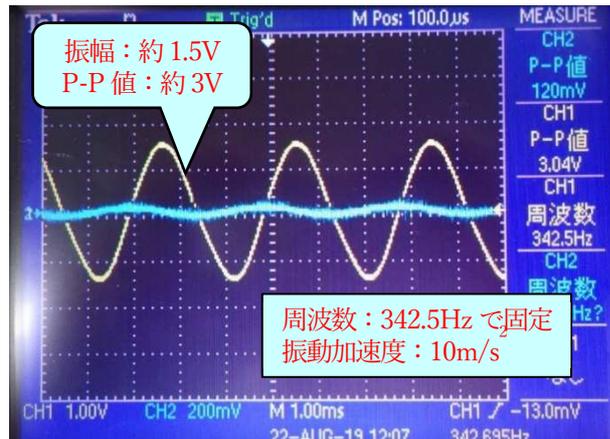


図 22 連続モードにおけるオシロスコープによる振動発電デバイスの発電状況の測定結果

### 3-7 発電現象の環境影響検証(デバイス分野-Ⅲ)

本研究成果の適用については、屋外環境や自動車への搭載が想定できる。この場合、高温、低温環境下での発電デバイスの特性を予め把握しておくことが重要になる。このため、振動試験機に温度チャンバをセットして種々の温度環境下で発電実験を行って振動発電の温度依存性を検証した。

#### 3-7-1 実験方法

振動試験には、エミック(株)製の温度チャンバ付き複合環境振動試験機(F-1000BD/A)を用いた。

振動発電デバイスを振動試験機にセットし、温度チャンバ内において評価温度を $-20^{\circ}\text{C}$ から $80^{\circ}\text{C}$ まで6段階に設定して各々の設定温度で発電実験を行った。評価は各設定温度において、共振周波数と発生した電圧で行った。

#### 3-7-2 実験結果

表 7 に各温度における発電特性の測定結果を示す。

$-20^{\circ}\text{C}$ ~ $20^{\circ}\text{C}$ までは得られる電圧の変化はなかったが、 $50^{\circ}\text{C}$ で減少が開始する兆候を見せた。温度が上昇すると電圧の減少は大きくなり、減少量は $65^{\circ}\text{C}$ で $-20^{\circ}\text{C}$ ~ $20^{\circ}\text{C}$ の $1/2$ に、 $85^{\circ}\text{C}$ では $1/5$ となった。

一方、共振周波数の温度依存性は、電圧ほど顕著ではないが、温度上昇とともにわずかに低下する傾向を示した。

Fe-Ga 合金の融点は $1000^{\circ}\text{C}$ 以上であり、キュリー温度が $100^{\circ}\text{C}$ 程度になるような特殊な素材ではないと考えられる。また、今回試作した振動発電デバイスは、発電素子の固定にエポキシ樹脂を用いている。一般的なエポキシ樹脂の耐熱温度(使用可能温度)は、 $150^{\circ}\text{C}$ 程度と報告されている。ここでいう「耐熱温度」とは、接着強度について言及していると考えられるが、本実験はこの温度より低い状態で行った。よっ

表 7 各温度における発電特性の測定結果

温度( $^{\circ}\text{C}$ )	共振周波数(Hz)	電圧(V)
-20	174.9	2.12
0	174.9	2.25
20	173.8	2.18
50	173.8	1.94
65	172.7	0.98
80	169.9	0.42

て、今回確認された高温での発電能力の低下は、エポキシ樹脂の弾性率の温度依存性に起因した現象と推察される。このように、常温以外での環境で使用する場合には、磁歪材料の固定方法について予め十分に検討する必要がある。

### 3-8 ターゲット機器の振動解析(デバイス分野-IV)

本研究で設定した成果の適用先は、富士・東部地域の繊維業界である。繊維産業では小規模企業が種々の工程を分業する形態をとっている。その中でも本研究の適用環境である振動が多く発生している工程であること、トラブルによる機械の自動停止機構が備わっているので運転状況を遠隔地でモニタリングしたいというニーズがあることから、糸から織物を製造する「製織」を適用先として選択し、稼働中の製織機械(以下、織機という)の振動解析を行った。

#### 3-8-1 実験方法

織機の動作中に発生している振動解析を FFT(高速フーリエ変換)アナライザにより行い、振動発電デバイスの設置位置を検討した(図 23)。複数箇所について測定を行ったが、何れの場所でも共振周波数が複数認められ、複雑な振動が発生していることが判った。

測定箇所のうち、センサ貼付が容易なこと、どの織機でも同様な部位が存在することから、測定位置に動力モータ用フレームのカバーを選択した。

振動測定は 3 軸加速度センサを図 24 で示す位置に貼り付けた。なお、測定に使用したセンサおよび FFT アナライザは、それぞれ小野測器製 NP-3211、DS-3000 である。



図 23 織機の振動解析の状況



図 24 織機に貼付した加速度センサ

#### 3-8-2 実験結果

図 24 の矢印方向における振動を、周波数域 1-400Hz で FFT 解析を行い、10 回平均化した結果を図 25 に示す。

パワースペクトル(加速度)が最大値をとるのは 178Hz であり、その値は  $4.2\text{m/s}^2$  であった。また、この振動は、織機の稼働時には常時発生していることから、振動発電に使用する周波数は 178Hz として開発を行うこととした。

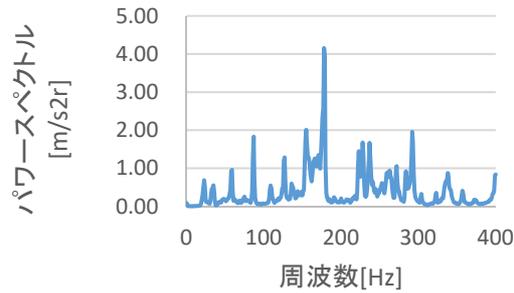


図 25 織機の振動解析結果

### 3-9 IoTシステム化と適用性検証(デバイス分野-V)

#### 3-9-1 「衝撃モード」による通信システム

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 26 は、その概略を示す。また、使用した機器の構成を表 8 に示す。振動発電デバイス上端部を指先で撓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、得られた電力のみ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)の動作要件は、メーカ仕様によると DC(直流) 2.0V で 1.5mA である。振動発電デバイスは交流で発電されるため、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り、無電源 IoT デバイスとした。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、動作要件を満たしていることが明らかとなった。

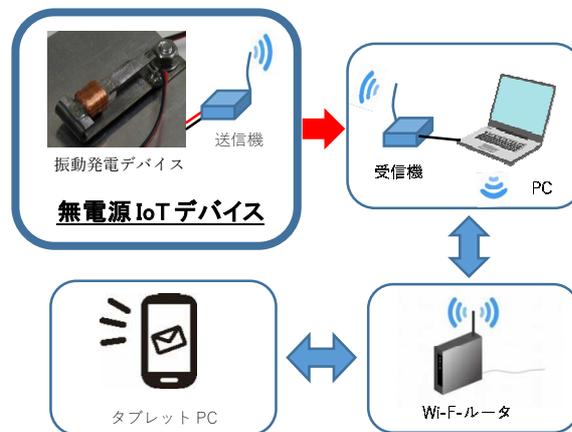


図 26 「衝撃モード」における通信システムの概略

表 8 「衝撃モード」通信システムにおける使用機器の構成

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)

### 3-9-2 「連続モード」による織機の見守り通信システム構築

前述のとおり、稼働中の織機は、同一周波数の振動が連続的に発生している。また、現在、多くの織機は、稼働中は糸の張力を検出しており、何らかのトラブルで糸の破断が発生すると、自動停止する機構を備えている。さらに、聞き取りを行ったところ、「自動停止機構で不良品の製造は抑止できているが、長時間の無人運転中に非常停止していることがあり生産効率が低下する」とのコメントが得られた。

これらの特徴を鑑み、構築する見守り通信システムは、織機の振動により振動発電デバイスで発生した電力で無線モジュールを駆動させて、電波の送信を行うとともに、糸の破断等で織機が停止すると、発電も停止し、それに伴い電波の送信も停止することを利用したシステムとした。図 27 にその概略を、図 28 に動作画面を各々示す。また、表 9 に使用機器の構成を示す。

工場内での複数機器の見守りを想定し、送受信には、長距離通信と最大 64 台の送信機との通信が可能な市販の 920MHz 帯の特定小電力(LPWA)無線モジュール(インタープラン社 IM920)を用いた。図 28 において、画面の左側は接続機器の状態を示すエリアで、10 個の送信機の受信機との状況を、「接続済み稼働」、「接続済みで停止」、「未接続」の 3 種類で表示している。また、画面の右上は、通信データの経時変化をグラフ表示させるエリアであり、ダミーデータとして端末の「温度」を受信した結果を示している。画面の右下は、受信したデータ(時刻および温度)をテキスト表示させるエリアである。

このように、運転・停止状況をノート PC 画面に認知・表示させる織機の見守り通信システムを構築し、実際に作動することが確認できた。



図 27 「連続モード」による織機の見守り通信システムの概略

表 9 「連続モード」による織機の見守りシステムにおける使用機器構成

送信機	IM920TX(Interplan)
受信機	IM920RX(Interplan)
PC	Lets Note CF-LV(Panasonic)



図 28 「衝撃モード」における通信システムの動作画面の一例

#### 4. まとめ

- (1) Fe-Ga 合金の機械的, 熱的物性値の測定を行った. 熱的物性値は, ステンレス鋼などと類似した値であった. また, 機械的物性値(縦弾性係数)は異方性を示し, 100 面についてはアルミニウム合金, 110 面については鋳鉄と同等な値であった.
- (2) X 線回折で極点測定を行い, 得られた極点の  $\alpha$  軸方向,  $\beta$  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ことから, 評価方法として有用であることを確認した.
- (3) X 線回折の極点測定で加工影響層深さを評価したところ, ワイヤ放電加工, ワイヤソー加工ともに 20 $\mu$ m 程度であった.
- (4) 磁歪材料を 1200°C まで加熱して結晶性を X 線回折により評価した. 熱処理により回折線がシャープになったことから結晶の健全化が確認された.
- (5) Fe-Ga 合金を用い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 20V 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 3V であった.
- (6) デバイスの周辺温度を変化させて振動発電を行ったところ, 50°C 以上の温度域で, デバイスの固定に用いているエポキシ接着剤に起因すると考えられる発電電圧の低下が確認された.
- (7) 稼働中の織機で発生している振動解析を行ったところ, モータ用フレームカバーにおいて 178Hz の共振周波数を観察した.
- (8) 振動発電デバイスを「衝撃モード」で発電させ, 発生した電力のみ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.
- (9) 織機に連続的に発生している振動を利用し, 発電した電力を用い, 920MHz 帯の特定小電力(LPWA)無線モジュールを使用した見守り通信システムを構築することができた.

#### 謝辞

織機を用いた実験に際し, 多大な協力をいただいた, 有限会社田辺織物 代表取締役 田辺丈人氏ならびに, 繊維技術部 中村聖名 主幹研究員に深く感謝申し上げます.

#### 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) 日本熱物性学会編: 熱物性ハンドブック, (養賢堂, 東京), p.26 (2000)
- 6) Rick Allen Kellogg: Development and modeling of iron-gallium alloys, Retrospective Theses and Dissertations, p.1699 (2003)
- 7) 藤枝俊, 栢修一郎, 川又透, 志村玲子, 石山和志, 福田承生, 鈴木茂: 振動発電用の Fe-Ga 合金単結晶の逆磁歪効果, まてりあ, Vol.59, No.1, pp.10-15, (2020)
- 8) 日本材料学会編: 改著・X 線応力測定法, (養賢堂, 東京), p.61 (1981)
- 9) 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, 宮川和幸, 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, Vol.4, pp.154-161, (2021)