

# Fe-Co-V 磁性合金を用いた衝撃スライド型逆磁歪式振動発電機の試作と評価 Production of Newly-designed Impact-sliding-type Vibration Power Generator using Fe-Co-V Ferromagnetic Alloy and Its Application

山浦 真一, 浅賀 洋佑, 奥屋 和彦, 佐々木 敏夫, 関口 哲志

Shin-ichi Yamaura, Yosuke Asaga, Kazuhiko Okuya, Toshio Sasaki and Tetsushi Sekiguchi

In this work, a newly-designed impact-sliding type vibration power generator using a Fe-Co-V ferromagnetic alloy rod was fabricated and its power generation properties were evaluated. As a result, the open circuit peak-to-peak voltage was 60.4 V<sub>pp</sub> and the voltage with 1 kΩ resistor was 32.7 V<sub>pp</sub> at maximum. The maximum electric energy obtained with this generator was 253 μJ. It was also found that the induced voltage and the total power increased with increasing number of coil turns. Furthermore, the generator produced in this work was tentatively applied for the power source of a sensor and wireless communication devices and it was found that the generator supplied those devices with electricity, the temperature data were successfully sent to a PC with an USB wireless receiver.

Keyword: Fe-Co-V Alloy, Permendur, Magnetostriction, Power Generation, Energy Harvest

## 1. 緒言

近年、化石燃料枯渇に対する懸念や原子力発電に対する不信感および新興国におけるエネルギー需要の増大のため、従来のエネルギー源に加えて、新たなエネルギー源の開拓が持続可能社会の構築のための最重要課題の一つになっている。新たなエネルギー源としては、例えば、ITER（イーター）を始めとする核融合エネルギー<sup>[1]</sup>や自然界から取り出す再生可能エネルギー<sup>[2]</sup>、水素エネルギー・燃料電池<sup>[3]</sup>が挙げられる。再生可能エネルギーは即ち、太陽光や水力、風力、波力、地熱、バイオマス等の自然・環境から採取するものを指し、図1に示すように最終的には電力として利用されるため、環境発電と

も呼ばれている。さらにこれらのうち、太陽光、水力、風力、地熱等の既に大規模発電技術が確立されているものを除いて、自然・環境中にわずかに存在する振動（運動エネルギー）や電磁波（電気エネルギー）等の微小なエネルギーを回収して電力に変換する技術を、特にエネルギーハーベスト技術と呼んでいる<sup>[4]</sup>。

このエネルギーハーベスト技術を使うことで、環境からエネルギーを取り出し、自立的に稼働する電池不要の環境センサ無線ネットワークの構築が期待されている<sup>[5]</sup>。無線センサネットワークの概念図を図2に示す。周囲からエネルギーを取り出して自立稼働するセンサ（温度、湿度、日照、振動、風力等）や無線送信機を自然環境中に設置し、送信されるデータを一か所で受信することで天候や災害などの一元的な集中監視を行うことが出来る。各センサ・無線送信機ユニットはメンテナンスフリー（電池交換不要）であり、維持管理の手間が大幅に



図1 多様な環境発電源



図2 将来的な環境センサ無線ネットワークの概念図

省力化出来る点が大きなメリットである。

また、トンネル・橋梁等の構造物のインフラ劣化診断<sup>[6]</sup> (異常な変形, 応力, き裂の発生等を検知) も遠隔地から可能であり, 特にセンサ・無線送信器ユニットの数が増えるほど, エネルギーハーベスト技術によるメンテナンスフリー・自立稼働の効果は大きくなる。

我々は種々提案されているエネルギーハーベスト技術の中で, 磁歪材料を用いた振動発電<sup>[7][8]</sup>に着目し, 現在, 研究を行っている。優れた磁歪材料としては, Terfenol-D (Fe-Dy-Tb 合金)<sup>[9]</sup>や Galfenol (Fe-Ga 合金)<sup>[10]</sup>がよく知られている。Terfenol-D は 2000 ppm 以上の巨大磁歪を示すことが知られているが, 基本的に脆性材料であり, さらに希少金属 Dy, Tb を使用し, なおかつ単結晶であるため高価である。Galfenol も約 300 ppm の比較的大きな磁歪を示すが, 希少金属 Ga を使用しているためこちらも高価である。加えてどちらも米国海軍主導で開発が進められてきたため, 日本国内での利用は限られていたようである。そこで我々は, 磁歪量は劣るものの, 他の磁歪材料よりも安価で機械特性に優れた材料として Fe-Co 系磁性合金<sup>[11]</sup>に着目し, 最近, 比較的大きな磁歪量で知られる Fe<sub>49</sub>Co<sub>49</sub>V<sub>2</sub> 合金 (磁歪量約 70 ppm) を用いて逆磁歪効果を利用した新しい振動発電機を考案した<sup>[4]</sup>。本研究では, 振動発電機を試作し, その発電評価を行い, さらにアプリケーションの一例として環境センサ無線送信電源としての適用を試みた。以下に詳細を報告する。

## 2. 逆磁歪式発電の原理

はじめに, 磁歪材料を用いた発電機を作る上で, 必要となる基本式 (1), (2) 式を示す<sup>[4]</sup>。

$$S = c \cdot T + d \cdot H \rightarrow \frac{ds}{dt} = c \cdot \frac{dT}{dt} + d \cdot \frac{dH}{dt} \quad (1)$$

$$B = d \cdot T + \mu \cdot H \rightarrow \frac{dB}{dt} = d \cdot \frac{dT}{dt} + \mu \cdot \frac{dH}{dt} \quad (2)$$

矢印の右側は各式の時間微分である。ここで,  $S$ : ひずみ,  $T$ : 応力,  $H$ : 磁界の強さ,  $B$ : 磁束密度,  $c$ : 弾性コンプライアンス,  $d$ : 磁歪定数,  $\mu$ : 透磁率である。(1), (2) 式の時間微分式から, 応力の時間変化(衝撃)を与えることにより磁束密度に時間変化が生じることが分かる。この時, 磁歪材料にコイルを巻くことで誘導起電力  $V$  を得る。誘導起電力  $V$  は, ファラデーの法則から(3)式で表される<sup>[4]</sup>。

$$V = -N \cdot \frac{d\phi}{dt} = -N \cdot A \cdot \frac{dB}{dt} \quad (3)$$

ここで  $N$ : コイルの巻き数,  $\phi$ : コイル内を貫く磁束,  $A$ : 磁歪材断面積(コイル内側面積)である。すなわち, 磁束  $\phi$  (または磁束密度  $B$ ) の時間変化が大きいくほど, 誘導起電力は大きくなる。

## 3. 新規逆磁歪式振動発電機の作製

本研究では, 磁歪材料として約 70 ppm の磁歪量を示す Fe<sub>49</sub>Co<sub>49</sub>V<sub>2</sub> 合金を用いた。

図 3 には本研究で試作した衝撃スライド型逆磁歪式振動発電機の模式図を示す。中心を貫く Fe<sub>49</sub>Co<sub>49</sub>V<sub>2</sub> 磁歪合金芯材に衝撃や周期振動による歪み速度を与えることで, それに応じて瞬間的に磁歪合金棒の周囲に磁場変動が生じる。したがって磁歪合金棒周囲に設置したコイルによって誘導起電力を得ることが出来る。コイルの巻き線には  $\phi 0.2$  の銅線を使用し, ボビンに 810 巻きしてコイルを作製した。また銅線を巻いたボビンの上部にドーナツ状のネオジウム磁石を設置した。これは先行研究でも述べられている<sup>[8]</sup>が, 磁歪合金に適切なバイアス磁界を与えておくことで, 磁束密度の変化が大きくなり, 発電量も大きくなるためである。したがって本試作品でも, 磁歪合金近傍にネオジウム磁石を設置し, 適切なバイアス磁界を与えている。また, 本研究ではボビン上部にネオジウム磁

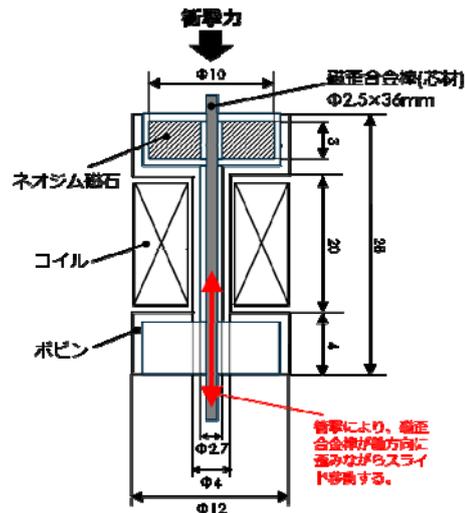


図 3 試作した衝撃スライド型振動発電機の模式図

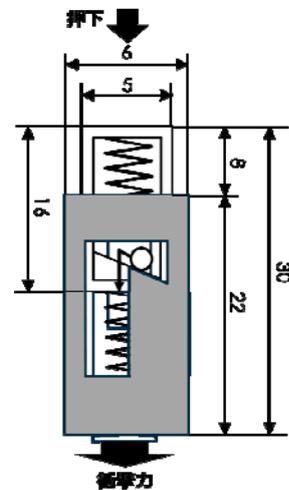


図 4 衝撃付加機構の模式図

石 1 個を設置したが、これは予備実験の結果、ネオジム磁石はボビン上下に設置するよりも発電性能が良かったことによる。本研究の振動発電機では、図 3 に示しているように、衝撃によって芯材に歪みを与えられることに加えて、芯材が上下に高速で大きくスライド振動し、「①芯材の軸方向の歪み振動による逆磁歪効果」に加えて「②磁性体である芯材のスライド振動による電磁誘導効果」が組み合わさって発電していると考えられる。

図 4 には、本研究で使用した振動発電機への打突機構の模式図を示す。ボタンを押下すると横のピンが外れ、バネの力で中子が下向きに大きくスライドし、衝撃を与える。本機構は圧電着火式の高スライターの着火機構として既に広く使用されている。従来の衝撃式逆磁歪発電機の研究では、入力エネルギーを一定にするために重量が既知の鋼球を一定の高さから落下させ、その衝撃による発電特性を比較し、評価していた。本研究で試作した発電機構では、芯材が衝撃によって大きくスライドするため、鋼球落下法では鋼球が軸芯のスライド振動を妨げてしまい評価が困難になる恐れがあった。そこで本研究では図 4 の打突機構を採用し、発電特性の評価に使用した。本研究で使用した打突装置の出力エネルギーを調べるため、予め重量が既知の鋼球を打突装置によって打ち上げたところ、その出力エネルギーは位置エネルギー換算で 19.4 mJ であった。本研究では入力エネルギー 19.4 mJ に対する発電エネルギーを測定し、エネルギー変換効率を求めた。

#### 4. 新規逆磁歪式振動発電機の評価

図 5(a)は今回作製した発電装置の負荷抵抗なしの出力波形、図 5(b)は 1 kΩ の負荷抵抗を接続した場合の出力波形の測定例である。波形測定には Agilent Technologies 社製オシロスコープ DSO-X 3014A を使用し、サンプリング速度：200 MSa/s で測定を行った。1 回の衝撃で 10 ms 程度の比較的長時間の発電が得られた。図 5(a)の無負荷の場合の起電力（開放電圧）は Peak to Peak で最大 60.4 V<sub>pp</sub> が得られた。図 5(b)の 1 kΩ 負荷抵抗接続の場合の起電力は 32.7 V<sub>pp</sub> であった。当然ながら、負荷がかかることにより出力電圧は開放電圧(60.4 V<sub>pp</sub>)よりも低下した。また、図 5(b)に示す測定例では、1 回の衝撃付加によって得られる発電エネルギー  $P = 253 \mu\text{J}$  であった。1 回の衝撃による発電エネルギー  $P$  は、各測定点における電圧  $V$ 、サンプリング間隔  $dt$ 、負荷抵抗値  $R (=1 \text{ k}\Omega)$  を用いて、

$$P = \int \frac{V^2}{R} dt \quad (4)$$

を発電時間範囲にわたって計算すれば求められる。図 5(b)の波形を見ると、最初に大きな発生電圧が得られ、その後、次第に収束し、比較的低い出力電圧が数 ms 続くことが分かる。これは強い衝撃による芯材の軸方向の変形とスライドの効果が相乗され、Villari 効果による逆磁歪誘導起電力と、磁化された軸芯がコイル中を高速移動する誘導起電力が足し合わされた状態であると考えら

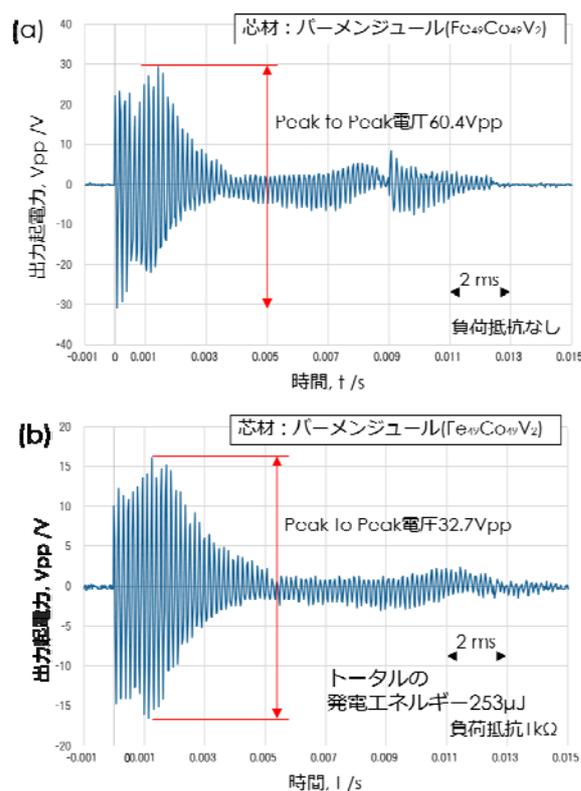


図 5 1 回の衝撃で得られた出力波形の例  
(a) 負荷抵抗なし、(b) 負荷抵抗 1 kΩ



図 6 1 回の衝撃付加による LED パネルの点灯

れる。

本試作品では、衝撃付加によってスライド運動した芯材は、ほぼ元の位置に復帰した。これはネオジム磁石による吸引力と芯材の重力の釣り合いによるものと思われる。しかしながら、完全に元の位置に戻らない場合、それが発電量のばらつきの一因になったと思われる。

図 6 には、本研究で試作した衝撃スライド式振動発電機を用いた LED パネルの点灯例を示す。1 回の押下で 60 個の白色 LED を瞬間的に同時点灯させることが可能であった。

本研究の試作では、芯材に強磁性体である Fe<sub>49</sub>Co<sub>49</sub>V<sub>2</sub> 合金を用いた。本材料はパーメンジュール(Permendur)の名称で商用化されている優れた軟磁性材料であるが、約

表 1 各芯材を用いた発電装置の出力値

	強磁性体		非磁性体	
	Fe <sub>49</sub> Co <sub>49</sub> V <sub>2</sub>	Fe(軟鋼)	Cu	Al
平均起電力 V <sub>pp</sub> (V) (負荷抵抗なし)	47.9	14.1	0.282	0.186
平均起電力 V <sub>pp</sub> (V) (負荷抵抗1kΩ)	<b>26.4</b>	<b>11.6</b>	<b>0.094</b>	<b>0.110</b>
最大発電エネルギー(μJ) (負荷抵抗1kΩ)	253	65	0.0069	0.0067
平均発電エネルギー(μJ) (負荷抵抗1kΩ)	<b>166</b>	<b>59</b>	<b>0.0063</b>	<b>0.0058</b>

※平均：測定 30 回の平均値

70 ppm の比較的大きな磁歪量を示すことも知られている。表 1 に、試作した振動発電機の起電力および発電エネルギーに対する芯材の種類の影響についてまとめた。平均値はそれぞれ 30 回の測定値を平均して得た。強磁性体として Fe<sub>49</sub>Co<sub>49</sub>V<sub>2</sub> 合金および軟鋼（純 Fe）、非磁性体として銅(Cu)、アルミニウム(Al)で、同寸法の芯材丸棒を製作し発電特性を比較した。その結果、銅、アルミニウムではほとんど発電することが出来なかった。これは銅、アルミニウムは非磁性体であるため、発電ピックアップ用のコイル内に磁束変化をもたらすことが出来なかったためである。一方、強磁性体である Fe<sub>49</sub>Co<sub>49</sub>V<sub>2</sub> 合金と軟鋼では発電が得られた。しかしながら、両者には起電力、発電エネルギーともに大きな差異が見られた。両者の平均起電力（負荷抵抗なし、1 kΩ 負荷抵抗あり）、最大・平均発電エネルギーはそれぞれ、Fe<sub>49</sub>Co<sub>49</sub>V<sub>2</sub> 合金:47.9 V<sub>pp</sub>, 26.4 V<sub>pp</sub>, 253 μJ, 166 μJ および軟鋼:14.1 V<sub>pp</sub>, 11.6 V<sub>pp</sub>, 65 μJ, 59 μJ であり、Fe<sub>49</sub>Co<sub>49</sub>V<sub>2</sub> 合金の方がいずれも高い値を示した。両者とも強磁性体であり磁化の値もほぼ同等と考えると、衝撃により大きくスライドした際の誘導起電力は同様の値を示すと考えられる。一方、磁歪量で比較すると、Fe<sub>49</sub>Co<sub>49</sub>V<sub>2</sub> 合金が約 70 ppm であるのに対して軟鉄（純 Fe）では 9 ppm 程度である。そのため、軟鉄使用による発電力はほぼ芯材のスライドによる誘導起電力のみである一方、Fe<sub>49</sub>Co<sub>49</sub>V<sub>2</sub> 合金では芯材のスライドによる誘導起電力に加えて磁歪量が大きいことによる逆磁歪 Villari 効果が支配的となり、軟鉄芯材の場合と比較して 3 倍程度大きな発電量を示したと考えられる。これらの比較から、逆磁歪式振動発電機の芯材には、磁歪量の大きな材料を使用する方が有利であろうと思われる。

次に、芯材をそれぞれ Fe<sub>49</sub>Co<sub>49</sub>V<sub>2</sub> 合金、軟鋼（純 Fe）、銅(Cu)、アルミニウム(Al)とした時の、一定入力エネルギーに対する発電エネルギーの比率、即ちエネルギー変換効率を比較した。前述の通り、入力エネルギーは衝撃付加装置の鋼球打ち上げ高さから、位置エネルギー  $W=Mg \cdot h$  として求めた。鋼球の質量  $M=5.43 \times 10^{-3}$  kg, 重力加速度  $g=9.81$  m/s<sup>2</sup>, 鋼球の打ち上げられた高さ  $h$  m として、10 回測定の平均値として位置エネルギー  $W=19.4$  mJ を得た。エネルギー変換効率  $\alpha$  は、 $\alpha=P \div W \times 100$  の式

表 2 各芯材を用いた発電装置のエネルギー変換効率

	Fe <sub>49</sub> Co <sub>49</sub> V <sub>2</sub>	Fe(軟鋼)	Cu	Al
エネルギー変換効率(%)	<b>0.9</b>	<b>0.3</b>	<b>0.00003</b>	<b>0.00003</b>

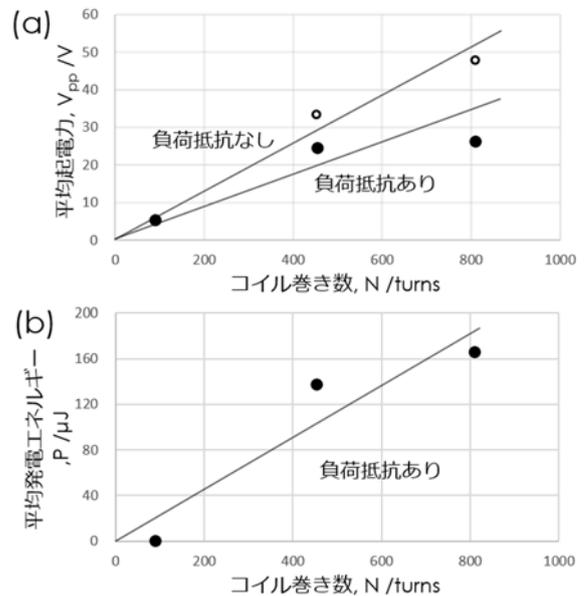


図 7 コイル巻き数と出力の関係

(a) 平均起電力, (b) 平均発電エネルギー

に基づいて計算した。ただし、 $P$ : 平均発電エネルギーとした。これらの計算結果を表 2 に示す。同じ強磁性体であっても、Fe<sub>49</sub>Co<sub>49</sub>V<sub>2</sub> 合金と軟鋼（純 Fe）ではエネルギー変換効率に大きな差があることが分かる。これは上述したように、軟鋼および Fe<sub>49</sub>Co<sub>49</sub>V<sub>2</sub> 合金の磁歪量がそれぞれおよそ 9 ppm および 70 ppm であるため、磁歪量の少ない軟鋼の芯材を用いた場合は磁化した芯材がコイル内をスライドする誘導起電力のみが得られるのに対して、磁歪量が桁大きい Fe<sub>49</sub>Co<sub>49</sub>V<sub>2</sub> 合金芯材を用いた場合は磁化した芯材のスライドに加えて、衝撃を負荷した際の軸方向の歪み振動による逆磁歪効果が支配的となったためと考えられる。従来の衝撃型逆磁歪式振動発電機の発電効率は、過去の文献では約 0.005% との報告例がある<sup>[12]</sup>。本研究で提案した機構により、衝撃型逆磁歪式振動発電で大幅な発電力向上が見込めることが分かった。

また、本試作発電機のコイル巻き数と発電出力の関係について図 7 に示す。図 7(a)は開放電圧（負荷抵抗なし）および負荷抵抗 1 kΩ を回路に接続した時のそれぞれの場合のコイル巻き数と平均起電力の関係を表したものである。さらに図 7(b)は負荷抵抗 1 kΩ を回路に接続した場合のコイル巻き数と平均発電エネルギーの関係を表している。コイルの巻き数については、810 巻きの他に 453 巻きと 90 巻きのコイルを製作し、その発電特性を比較した。図 7(a)を見ると、負荷抵抗あり・なしどちらの場合でもコイル巻き数の増加と共に起電力も上昇した。巻き数と起電力の間にはファラデーの法則に従って比例関係

が成り立つと考えられるが、コイル巻き数 453 巻きと 810 巻きの場合を比較すると 810 巻きの場合の起電力の上昇が若干緩やかになっており、実際には巻き数が多くなると起電力が飽和状態となる可能性がある。これは巻き数が多くなると平均コイル直径が増加し、漏洩磁気を生じる磁歪芯材からコイル線が遠くなるため、および使用するコイル線が長くなり電気抵抗値が増加するためではないかと思われる。また、図 7(b)に示すように、コイル巻き数を多くすると発電エネルギーも上昇した。この場合も巻き数が多くなると飽和値を示す可能性があるが、本実験のデータからは明瞭な傾向が見られなかったため、原点を通る直線を近似線として挿入した。詳細は今後の課題としたい。これらの値は、負荷インピーダンス(使用したい機器)とのマッチングを取ることで、発電・電力供給効率が最大化される<sup>[1]</sup>。

## 5. 無線センサシステムへの適用

近年、環境発電技術の研究開発が盛り上がりを見せているが、その応用先の一つとして有望視されているのが、環境中に設置した種々のセンサの無線送信、情報集約による気候・災害・インフラ劣化監視システムの構築である。将来的には環境中の微小自然エネルギーを回収して発電し、自立的に計測データを無線送信し続けるセンサ・無線送信ユニットの開発が目標である。本研究ではその予備的試みとして、本研究で試作した衝撃スライド型逆磁歪式振動発電機を使用してセンサおよび無線送信機を駆動させることを試みた。図 8(a)には各モジュールの構成チャートを示す。図 8(b)には本研究で使用した無線センサシステムの構成と無線送受信によって得られた受信側 PC の受信結果の例を示す。センサ、無線送信の

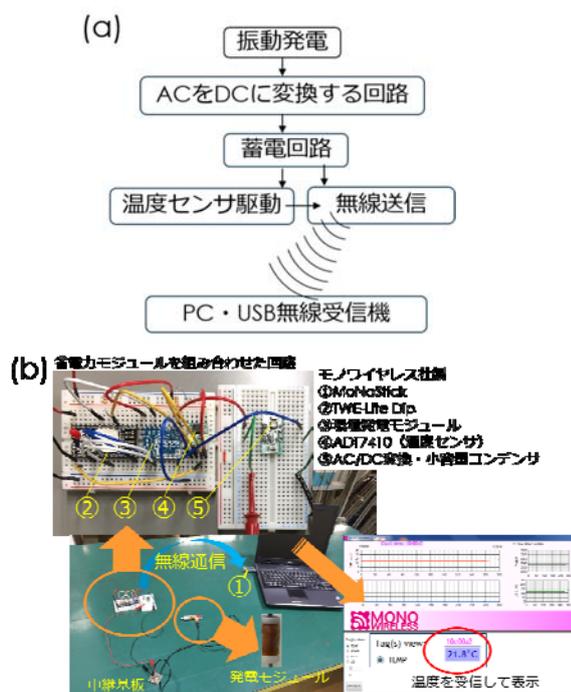


図 8 無線センサシステムへの適用

(a) 基本構成チャート, (b) 実際の構成と PC 側受信画面

各モジュールには、モノワイヤレス社製 TWE-Lite Dip (送信側), MoNoStick (受信側), 環境発電モジュールを使用し、さらに AC/DC 変換・コンデンサ回路も別途使用した。図 8(a)に示す通り、振動発電によって得られた電力を AC/DC 変換回路を通してコンデンサに蓄電し、10 回程度の衝撃振動発電によってセンサおよび無線送信機が駆動可能な電圧となり、温度センサから得られた温度データを無線送信した。それを PC に接続した USB 無線受信機で受信し、時間と温度データを表示、記録した。図 8(b)は実際の各部の構成と受信側 PC の受信画面である。本システムを駆動させるためには、本発電機の衝撃付加機構を 10 回程度押し駆動電力を確保する必要があったが、温度データが PC の画面上に表示され、本試作発電機を無線センサシステムに適用可能であることが示された。

## 6. 結言

本研究では、新しく考案した衝撃スライド型逆磁歪式振動発電機を試作し、その発電特性を評価した。その結果、810 巻きのコイルを用いて無負荷状態で起電力は最大で 60.4 V<sub>pp</sub> (開放電圧), 1 kΩ 負荷抵抗接続時 32.7 V<sub>pp</sub> であり、起電力はコイルの巻き数に比例した。また、負荷時の発電エネルギーとしては最大 253 μJ が得られた。

さらに有望なアプリケーションの例として無線センサシステムの電源への適用を試みたところ、衝撃付加 10 回程度の発電によって、温度データを PC へ無線送信することが出来た。

今後、Fe-Co 系合金の磁歪特性の向上および衝撃・振動の供給源の検討、共振振動を用いた発電機構の改良などにより、本開発振動発電機の特性はさらに向上が可能と考えている。

## 謝辞

本研究の一部は、JSPS 科研費 JP16K05997 のご支援により遂行することが出来ました。記してここに謝意を表します。

## 参考文献

- [1] 例えば 核融合最前線, 2015 年 冬号.
- [2] 小西勝久, 椎屋光昭, 平田俊一: 日本機械学会誌, 114, pp. 268-271 (2011).
- [3] 例えば Newton, No. 11 (2006).
- [4] 山浦真一: "逆磁歪振動発電", 「エネルギーハーベスティングの設計と応用展開」, シーエムシー出版, pp. 42-51 (2015).
- [5] 竹内敬治: "環境発電の市場動向", 「環境発電ハンドブック〜電池レスワールドによる豊かな環境低負荷型社会を目指して〜」, エヌ・ティー・エス, pp. 398-404 (2012).
- [6] 三浦謙介, 宮下剛, 長井正嗣: 「磁歪法を用いた鋼橋の応力計測の簡易化に関する研究」, 土木学会第 67 回年次学術講演会概要集, pp. 777-778 (2012).

- [7] 江田弘, 中村浩, 山本佳男:「精密工学会誌」, 63, pp. 706-710 (1997).
- [8] 上野敏幸:「機能材料」, 35, pp. 31-38 (2015).
- [9] A.E.クラーク, 江田弘:「超磁歪材料 マイクロシステム・アクチュエータへの応用」, 日刊工業新聞社 (1995).
- [10] A.E. Clark, K.B. Hathaway, M. Wun-Fogle, J.B. Restorff, T.A. Lograsso, V.M. Keppens, G. Petculescu, R.A. Taylor: J. Appl. Phys., 93, pp. 8621-8623 (2003).
- [11] S. Yamaura, T. Nakajima, T. Satoh, T. Ebata and Y. Furuya: Mater. Sci. Eng. B 193, pp. 121-129 (2015).
- [12] 瀧口徹, 佐々木敏夫, 中嶋宇史, 関口哲志, 山浦真一, 庄子習一:「FeCo 系磁歪材料を用いた小型発電素子の検討」, 第 31 回センサ・マイクロマシンと応用システムシンポジウム, 講演概要集 (2014).

(原稿受付 2017/01/10, 受理 2017/03/31)

\*山浦 真一, 博士 (工学)  
職業能力開発総合大学校 能力開発院, 〒187-0035 東京都小平市小川西町 2-32-1 email: s-yamaura@uitech.ac.jp  
Shin-ichi Yamaura, Polytechnic University of Japan,  
2-32-1 Ogawa-Nishi-Machi, Kodaira, 187-0035 Tokyo, Japan

\*浅賀 洋佑  
職業能力開発総合大学校 総合課程機械専攻, 〒187-0035 東京都小平市小川西町 2-32-1 email: asa.hand.gazette@gmail.com  
Yosuke Asaga, Polytechnic University of Japan,  
2-32-1 Ogawa-Nishi-Machi, Kodaira, 187-0035 Tokyo, Japan

\*奥屋 和彦, 博士 (工学)  
職業能力開発総合大学校 能力開発院, 〒187-0035 東京都小平市小川西町 2-32-1 email: okuya@uitech.ac.jp  
Kazuhiko Okuya, Polytechnic University of Japan,  
2-32-1 Ogawa-Nishi-Machi, Kodaira, 187-0035 Tokyo, Japan

\*佐々木 敏夫  
早稲田大学 ナノ・ライフ創新研究機構, 〒162-0041 東京都新宿区早稲田鶴巻町 513 早稲田大学研究開発センター120-5 号館 email: t.sasaki@aoni.waseda.jp  
Toshio Sasaki, Research Organization for Nano & Life Innovation,  
Waseda University, 120-5, Research and Development Center 513  
Wasedatsurumakicho Shinjuku-ku 162-0041 Tokyo, Japan

\*関口 哲志, 博士 (工学)  
早稲田大学 ナノ・ライフ創新研究機構, 〒162-0041 東京都新宿区早稲田鶴巻町 513 早稲田大学研究開発センター120-5 号館 email: t-sekiguchi@waseda.jp  
Tetushi Sekiguchi, Research Organization for Nano & Life Innovation, Waseda University, 120-5, Research and Development Center 513 Wasedatsurumakicho Shinjuku-ku 162-0041 Tokyo, Japan