

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

上野 敏 幸*

1. はじめに

磁歪振動発電は磁気を介した発電技術である。磁気を介したエネルギー変換が実用的であることは、我々の使う電力の大半が発電機(回転機)でつくられることから類推できる。発電機はタービンの大きな回転エネルギーを、磁気を介し電気エネルギーに変換する。筆者が開発する振動発電も同様、磁歪材料の応力で磁化が変化する逆磁歪効果を巧みに利用し、身の回りにある振動や動きを高効率で電力に変換する。その汎用性は極めて高く、機械振動から人・モノの動き、衝撃、波、流れまで多くがその適用対象になる。このエネルギー変換の基になる Fe-Ga 合金⁽¹⁾は鉄系の磁歪材料で、延性で加工性がよく、大きな逆磁歪効果を有する。開発する振動発電デバイスはこの合金の優れた特徴を反映し、シンプルで堅牢、高出力、高感度など数多くの実用的な特徴を備える。圧電材料やエレクトレット(永久電荷)方式などの従来の振動発電を凌駕し、電池を代替する。IoT(モノのインターネット)の課題は、無線通信モジュールの電源、つまり電池で、振動発電で、この電池の交換や寿命管理の課題が解決されることで、IoTの普及に貢献する。またデバイスを大きくすることで、キロワットオーダの電力を生成することも可能で、電力回生や波力、潮流発電といった再生可能エネルギーの分野へも展開できる。この技術の実用化を見据え、材料からデバイス、応用まで数多くの企業が商品開発に着手した。本稿では、この磁歪振動発電と構造と原理、特徴、出力特性を述べ、磁歪式で実現する電池フリー IoT、また大型化の展望について解説する。

2. デバイスの構造と動作原理、特徴

図1上が発電デバイスの構造である⁽²⁾⁽³⁾。磁性体のU字

フレームをベースに、その上面の一部に板状の Fe-Ga 合金(長手方向に磁化容易軸)を貼り付けユニモルフ(積層部)を構成し、これにコイルを巻き、内側に永久磁石を配置したものである。発電の原理を図1下に示す。Fe-Ga 合金は永久磁石により適度に磁気バイアスされた状態にあり、フレーム下面の片端を振動する物体、例えば機械などに固定し、他端に錘を取り付け振動させる。この時、錘に作用する慣性力でフレーム開口部が開閉するようデバイスは変形し、合金には長手方向に引張りと圧縮の力が交互に作用する。同時に逆磁歪効果で磁束が増減し、この磁束は図1下のループを流れ、この時間変化に比例した起電力がコイルに発生する。新規性はU字の「磁性体」と磁歪材料の積層、また磁歪材料を適度に磁化させながら、フレームの積層部(直下)の部分は磁気飽和させ、それ以外は磁気飽和させない構造にある。その関係を図2のB-H曲線で説明する。図中の矢印はデバイスが変形したときの Fe-Ga 合金内の磁束密度で、積層構造により合金内の応力は引張りもしくは圧縮でほぼ一様、つまり合金全体に大きな磁束変化が発生し、これがフレーム(磁気飽和でない部分)をヨークとした磁気回路を環流する。一方、

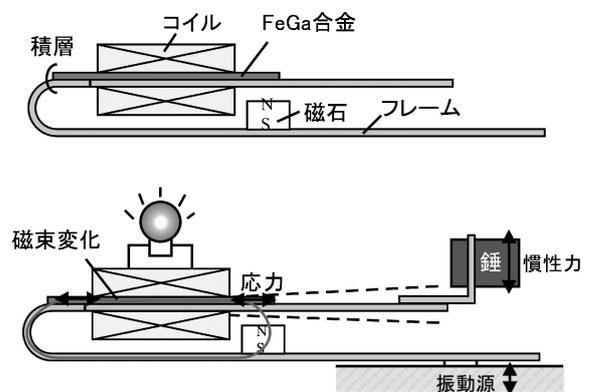


図1 発電デバイスの構造(上)と発電原理(下)。

* 金沢大学理工研究域電子情報通信学系; 准教授(〒920-1192 金沢市角間町)
Magnetostrictive Vibrational Power Generator and Its Application for Battery-free IoT; Toshiyuki Ueno (Kanazawa University, Kanazawa)
Keywords: vibrational power generator, magnetostrictive material, inverse magnetostrictive effect, IoT
2019年8月20日受理[doi:10.2320/materia.59.6]

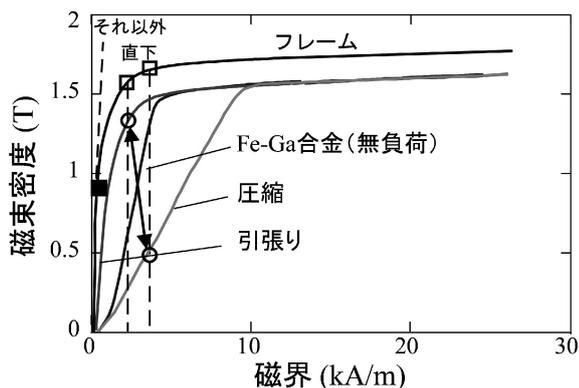


図2 デバイス構成要素のB-H曲線と動作挙動。

合金直下のフレーム部分は合金と同じ磁界ではほぼ磁気飽和(非磁性体と見なせる)の状態にある。結果、合金に発生した磁束変化がそのままコイルの鎖交磁束起電力に利用できる。なお従来の磁歪材料を用いた屈曲型の振動発電の大半は、磁歪材料と非磁性体との積層で、材料に発生する応力は一樣になるが、磁気バイアスや磁束の変化を上手に電力として取り出す磁気回路を構成していない。また本構造では自由端(可動部)と固定端が近い位置にあるため固定端に曲げモーメントが生じにくく、固定端に起因する損失も小さい。よって振動減衰が小さく感度も高い。また劣化の原因となる摺動部がなく、合金とフレームの剥離、金属疲労や引張強度以上の応力が発生しない限りデバイスは壊れない。シンプルで組み上げも容易、安価で構成できるのも大きな特徴である。

3. デバイスの特性

本デバイスは様々なサイズや形状の作製が可能である。その特性の概要を図3の写真左の小型のサイズ(質量4g, 体積0.5 cm³)で説明する。これはFe-Ga合金4×0.5×16 mm(福田結晶技術研究所製⁽⁴⁾), 0.5 mm厚のフレーム(ペーナイト鋼), 線径0.05 mm, 3500巻きのコイル, Nd-Fe-B磁石4×3×2 mmで構成される。一般に振動発電では共振現象を利用し、振動源の周波数とデバイスの共振周波数を一致させることで振幅が最大になり大きな発電が行われる。また大きな振動を得るためには先端に錘を付けた方がよい。例えばこれに錘10.2 gを付けた場合、周波数28.5 Hzで共振し、加速度0.049 G(1 G=9.8 m/s²)で、1 Vの電圧(開放)が発生する(図4)。これに抵抗を付けてジュール損で考慮した電力を評価した結果が図5で、0.075 Gで最大電力1.1 mW, 実効電力0.39 mWを出力する。なお28.5 Hz, 0.075 Gの振動振幅は0.015 mm(指で触れてもほとんど感じない)で、この時の出力0.39 mWは、コイン電池CR2032(直径20 mm, 質量2.9 g)を3年間持たせる場合の平均電力0.026 mWを大きく上回る。錘1.7 gの場合、88.7 Hzで共振し、0.6 Gで更に大きな電力2.0 mWを出力する。実際、発生電圧から逆算した合金内の磁束変化は1.3 Tで、先に説明した

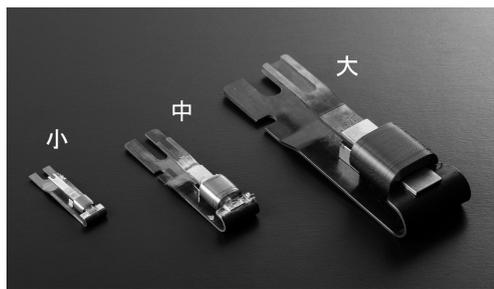


図3 デバイスの写真(左から小, 中, 大)。

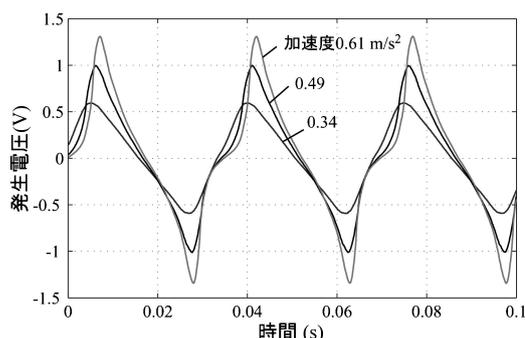


図4 振動周波数28.5 Hzの場合の発生電圧。

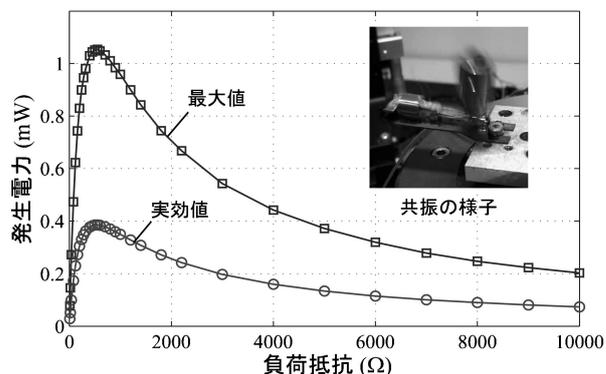


図5 振動周波数28.5 Hz, 加速度0.075 m/s²の場合の発生電力。

発電原理を裏付ける。また先端に錘を付けず先端を弾く自由振動(共振周波数420 Hz)では25 Vの電圧が発生し、0.5~1 mJのエネルギーが取り出せる。磁歪式では、スケール効果が成り立ち、形状を3辺等尺でK倍すると、共振周波数は1/K, 電圧はK倍, コイルの巻き数と同じなら抵抗は1/K, 結果、出力はKの3乗, つまり体積に比例する⁽⁵⁾。図3の写真の中, 右のデバイスは, 前述の小型をそれぞれ2倍, 4倍したもので, 動作周波数はそれぞれ1/2, 1/4となり出力は8倍, 64倍になる。以上の関係からデバイスの動作周波数と発生電力(実効)をまとめると図6になる。筆者は, 小型デバイスを10倍, 1/2倍にした超大型, 超小型のデバイス(図6中に写真あり)も開発している。

変換効率について, 実測で機械エネルギーの最大40%を

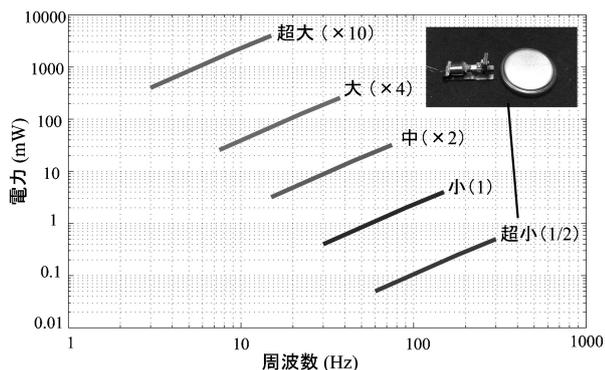


図6 デバイスサイズによる動作周波数と発生電力(実効値). 右上は超小型 1/2 サイズとコイン電池の写真である.

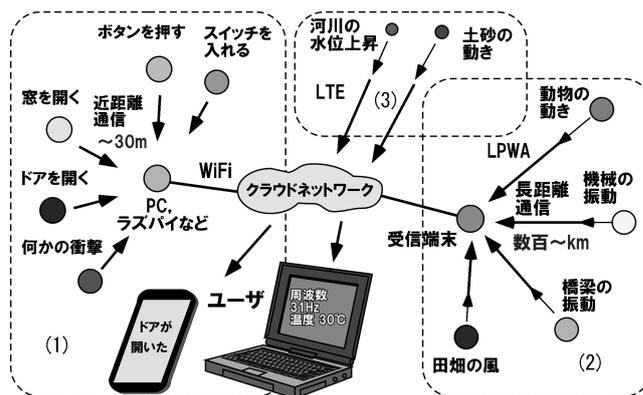


図7 磁歪振動発電デバイスで実現できる電池フリーIoT.

電気エネルギーとして取り出すことができることを確認している. これは Fe-Ga 合金の高い電気機械結合係数(0.7~0.8程度)と優れた構造と磁気回路に由来する. 比較として, 板に圧電素子を貼り付けたユニモルフ型の場合, 圧電横効果を利用し, 材料に応力が付与される長手方向と垂直な方向から電荷を取り出す. 横効果の電気機械結合係数は PZT で0.3~0.4程度, 変換効率は最大 16%程度である. ほかに電磁誘導式, 例えば永久磁石の往復運動を利用するタイプでは, 磁石を相当に変位させないと, コイルの鎖交磁束が変化しない. これは空隙の磁気エネルギーが主になるからで, 付随して大きな磁気力が発生する. 結果, 磁石を保持する機構が必要で, 摺動損が生じ, これが効率と感度, 耐久性を低下させる. 磁歪式では, 錘の振動速度が適度で, その運動を妨げる摺動部がない. よって効率と感度と共に耐久性も高い. 疲労試験も実施し, 錘なしで共振 420 Hz, 8 G, 1 億回の繰り返し振動後も出力の劣化がないことを確認し, 半永久の寿命をもつ可能性を実証している⁽⁶⁾.

4. 磁歪振動発電による電池フリー IoT

磁歪振動発電を IoT 電源に利用すると図7のような主に3つのシステムが構築できる.

- (1) 人やモノの「一度」のちょっとした動きや衝撃で発電し, 近距離に無線を送信する
- (2) 定常的な振動や風などで発電し, 定期的に長距離にセンサ信号を無線送信する
- (3) 大きな動きで発電し, 長距離にセンサ信号を送信する, 等である.

3つのシステムの主な応用例とそれによる効果を以下に示す.

(a) 例えば家屋や学校, 病院, 飲食店などで, ドアや窓を開く, 照明のスイッチや呼び出しボタンを押すなど, デバイスに構造的な工夫を施し, 一度のモノの動き, 衝撃でデバイスを励振し, 無線送信を行う. これらの信号を PC や Raspberry Pi で一括に受信し, メールや Line など遠隔の

ユーザーに知らせる. これにより簡単に防犯や見守り, 呼び出しのシステムができる.

(b) 工場の生産機械や工作機械, モーター, 変圧器などの電気機器, 橋の振動で発電し, これを蓄電することで, 機械や構造体の振動周波数, 加速度, 温度などのセンサ信号を LPWA (低電力長距離無線モジュール) で定期的に送信する. これら信号の時刻暦を分析することで機械の予兆保全が出来る. 人が現地で行う定期的な計測が不要になり, 人件費の削減に繋がる.

(c) 例えば土砂や水位の動き, 波などで大きな動きで発電し, その情報を遠隔に知らせることで防災が出来る.

上記を実現するための技術的手法を以下に示す.

() 小型のデバイスを基本に, ボタンを押すやドアを開く動きでデバイスを励振し(別途, 永久磁石の吸脱着で自由振動を発生させる), 一度で 0.5 mJ のエネルギーを発生し, 無線モジュール(interplan 社製 IM315⁽⁷⁾)を動作し, 信号を送信する. 一度の動作の発電(2019年現在, 中型デバイスを利用)でアナログ信号を長距離で飛ばすことも可能で, 例えばドアを開くことで, 動きと共にその部屋の温度を送信するシステムもできる⁽⁸⁾. これは従来の低出力な振動発電ではできない使い方である.

() 中型のデバイスで 30 Hz, 0.2 G 程度の振動で, マイコンとセンサを動作させ, 2分おきに加速度センサで振動の周波数と加速度(実効値), 温度を送信するシステムを完成している(図8). このときデバイスは乾電池以上の電力を出力している. また振動だけでなく風速 1 m/s 以下の微風による振動でも発電し⁽⁹⁾, 定期的にセンサ信号を送信するシステムもできる.

() デバイスを大型化することで, 大きな入力に対応し, ワットオーダの発電, また長距離の通信を行うことも可能である. ほかに靴底にデバイスを取り付ける⁽¹⁰⁾と一歩毎(衝撃発電)にスマホ通信を行うことができ, これは玩具や楽器, スポーツ用具に応用できる. これら入力になる振動や動きと送信するセンサ信号を組み合わせれば応用は無限である. これ

