

磁歪式振動発電技術の実用化展開

Magnetostrictive Vibrational Power Generator toward Practical Application

上野 敏幸^{*1}

Toshiyuki UENO (Mem.)

Vibration based power generation technology is utilized effectively in various field. Author invents novel vibrational power generator using Fe-Ga alloy, iron-based magnetostrictive material, with large inverse magnetostrictive effect, good machinability and high ductility. The generator is based on parallel beam structure consisting of Fe-Ga plate wound with coil and yoke accompanied with bias magnet. When bending force is applied on the tip of the generator, the magnetization inside the plate varies with induced stress due to the inverse magnetostrictive effect. In vibration, the time variation of the magnetization generates voltage on the wound coil. The magnetostrictive type is advantageous over conventional such using piezoelectric or moving magnet types in high efficiency and high robustness, and low electrical impedance. Author has established device configuration endurable for practical applications. This paper describes the principle and merit of magnetostrictive type, the evaluation results of miniature prototype, its problem and future potential.

Keywords: vibrational power generator, magnetostrictive material, Fe-Ga alloy.

1 緒言

振動発電は、振動や衝撃、動きから電気エネルギーを取り出す極めて汎用性の高い技術である。これが実用化できると、電池のいらぬ無線センサシステムおよびリモコンが実現する。振動を電源に、橋梁やトンネルなどインフラの状態管理や、機械のモニタリングがメンテナンスフリーになり、人やモノの動きを知らせることで防犯防災にも役立つ。またデバイスの大型化で、キロワットの発電も可能で、従来の風力・波力発電の代替も期待できる。

筆者が考案した磁歪式[1]は、鉄ガリウム合金[2,3]と磁性体の平行梁[4]を基本にしたシンプルな構造で、強度の振動から高効率の発電を行うのが特徴である。デバイスのインピーダンスは低く、電流を取り出すのに適し、発生した電力の蓄電も容易である。筆者の研究グループにおいては、デバイスの構造と回路、これらの連成の改良による高効率・高出力化、定常的な振動やゆっくりとした動き、衝撃、流体の流れで発電を行う要素技術、これを利用した無線センサシステム、リモコン[5]、デバイスの大型化から波力[6]、風力発電への応用まで研究開発を展開している。本稿では、筆者の得た知見をまとめるかたちで技術を解説する。Fe-Ga

合金の特徴から、これを有効に生かすデバイスの構造、発電原理、従来技術に対する優位性について試作デバイスの評価結果を交え説明する。また実用化展開において、用途と分野、大型化の可能性、課題について述べる。

2 鉄ガリウム合金

提案する技術は鉄系の磁歪材料を利用する。この代表的な材料が鉄ガリウム合金である。これは米国海軍研究所磁性材料部門で開発され、2000年に論文が発表されている[2] ("Galfenol"は海軍研究所が命名した材料の名称である)。磁歪特性は、鉄とガリウムの比率で変化し、ガリウム含有量 18.4 または 18.6%において磁歪がピークをとる。最大歪みはおおよそ 200~300 ppm で、これは組成、製法 (単、多結晶)、結晶粒、方位の均一性、後処理 (応力焼き鈍し) に依存する[7]。材料の提供 (販売) は米国の ETREMA 社が行っている。日本でも福田結晶技術研究所をはじめ[8]、複数の企業において量産に向けた研究開発が行われている。この合金は、振動発電用の材料として非常に優れた特徴を有する。

1. 逆磁歪効果が大きい。逆磁歪効果とは、適度に磁化させた材料に応力を加えると、その磁化が変化する効果である。その磁束密度 B の変化は簡単に $B = dT$ で与えられる (d : 磁歪定数, T : 応力)。この合金の d (=

連絡先: 上野 敏幸, 〒920-1192 石川県金沢市角間町
e-mail: ueno@ec.t.kanazawa-u.ac.jp

^{*1} 金沢大学



Fig. 1 Fe-Ga alloy, D22 L120 mm rod and its cut into plates.

20×10^9 [m/A]) は大きく、例えば 25 MPa の応力で B が 0.5 T 変化する。つまり材料に ± 25 MPa の応力を与えることができれば 1 T の幅で B が変化する（後述するデバイスにおいては、平行梁構造により、この応力を小さな力で発生させる）。エネルギー変換の指標となる電気機械結合係数はおよそ 0.7~0.8 で、1 サイクルで、機械エネルギーの最大 64% ($=0.8^2$) が電気エネルギーに変換される。

2. 延性材料のため加工性がよく、引張り強度も 200MPa と高い。よって材料の加工に、切削、研削、放電加工が利用でき、鉄と同等の扱いである（圧延については現在、研究中である）。Fig. 1 は合金からワイヤー放電加工で板を切り出した例である。また材料をはんだ、溶接で接合できる。結果、この合金と鉄、ステンレスで強固な構造体ができ、これが容易に作製できる。量産にも適する。そして強度が高いため、外力に曲げや引張り、衝撃が許容できる。これは脆性材料である圧電材料や超磁歪材料に対する大きな優位性である。

3. 適度な剛性および透磁率を有する。密度は 7.8 g/cm^3 （鉄と同程度）、縦弾性係数は 60~70 GPa（アルミと同程度）、熱膨張係数は鉄と同程度である。比透磁率は、応力や磁界で変化し、およそ 75~200 程度、飽和磁束密度は 1.5~1.7 T である。

4. 錆は一般的な鉄鋼より発生しにくい。問題になる場合、メッキやコーティング等の表面処理を行う。

5. 材料コストは、主にガリウムの材料単価、製法、後処理、形状加工で決定される。体積が小さい場合、材料単価はほとんど無視できる。

3 発電デバイスの構造、原理、その特徴

3.1 デバイスの基本構造と原理

発電デバイスは、Fig. 2 のように平行梁構造を基本

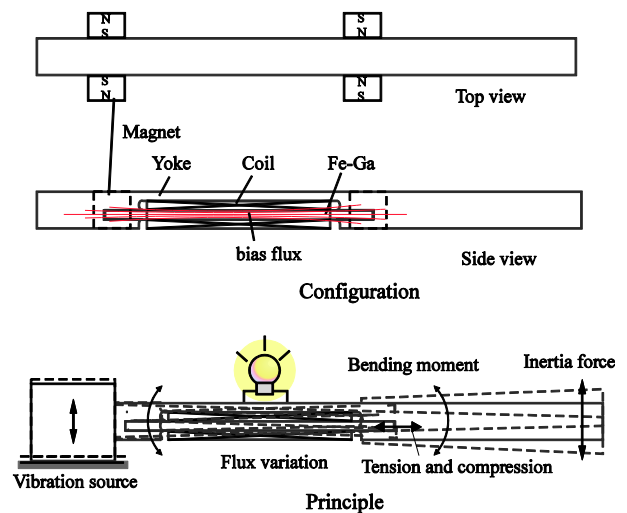


Fig. 2 Configuration (top) and principle (bottom).

とする。梁の一本は磁歪素子（Fe-Ga 合金）、もう一本は磁性体で、これらを適度な隙間を空け平行に並ばせ、その両端を可動・固定部になる磁性体に強固に接合する。素子にはコイルが巻いてあり、その層厚は隙間と同じとする。可動部は適度に長く、梁の材質（縦弾性係数、密度）、形状（厚さ）、透磁率は適度に設定する。この平行梁の側面には素子を適度に磁化させるバイアス用磁石を配置する。シンプルかつ耐久性を高めるため、磁性体の梁、可動部、固定部は一体で形成する。

発電原理を説明する。Fig. 2 のようにデバイスは片持ちで利用し、平行梁部の梁の並びと加振力の方向を同じとし、可動部が振れるよう固定部を振動源に固定する。このとき、質量を有する可動部には振動加速度に比例した慣性力が作用し、この曲げモーメントでデバイスは湾曲する。同時に、平行梁を構成する素子内部には一様な引張りもしくは圧縮の応力が交番状に発生する。このとき素子内の磁束は逆磁歪効果により増減する。この磁束の時間変化にコイルの巻き数を乗じた電圧がコイルに発生する。

3.2 平行梁構造のメリット

このデバイスの大きな特徴は平行梁構造である (Fig. 3)。加振力の作用する方向が、平行梁の長手方向と垂直である点において、従来の磁歪式[9]と大きく異なる。(i) 曲げ変形において応力が零となる中立軸を磁歪素子外に存在させることで、素子内の応力の方向が一様、かつ大きさがほぼ均一になる。つまり一様な磁束変化が素子全体で発生する。

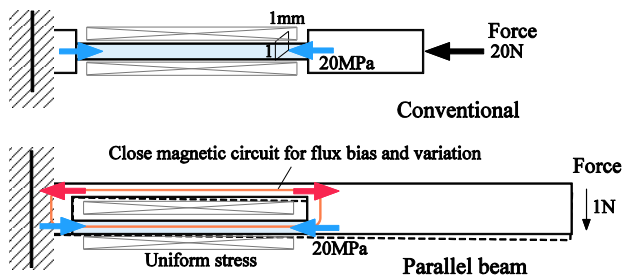


Fig. 3 Merit of parallel beam structure.

- (ii) てこの原理により慣性力が 10~20 倍に拡大され、素子に付加される。つまり小さな力で大きな応力が素子内に発生する。例えば、素子の断面積を 1 mm^2 と仮定する。これに 20 MPa の応力を発生させる目的で、加振力を軸力で付与する従来式では 20 N (=2 kgf) の軸力が必要である。一方、平行梁を構成すると 1/20 の 1 N で十分である。また前者の場合、一様な応力を発生させるのは一般に難しい。(軸力を端部に均一に作用、方向も真っ直ぐにする。そうでないと屈曲変形が生じる。) 一方、平行梁は一様に湾曲する性質を有し、力の方向が多少ずれてもよい。(i)と(ii)は、材料力学、また有限要素法による数値計算で確認できる。
 - (iii)磁気回路の役割を担う。素子と磁性体により閉磁気回路が構成される。磁気バイアスが効果的に素子に付与され、また逆磁歪効果で変化した磁束がこの磁路を環流する。つまり全体の磁気抵抗が小さく、磁束が構造体内に集中、その変化も効率よく発生する。
 - (iv)空隙にコイルを配置することができる。素子の磁束変化が効果的にコイルに鎖交し、起電力が発生する。
 - (v) 構造がシンプルである。
- 以上の原理、メリットが機能するには、磁歪素子が延性材料で、適度な剛性と磁性を持つことが必要である。現状、この用途において Fe-Ga 合金が最も適している。

3.3 他の発電技術に対する優位性

従来の振動発電技術に対して、磁歪式は以下の優位性を持つ。

- (i) 変換効率が低い。Fe-Ga 合金の最も効率の高い方向の逆磁歪効果を利用する。上記、平行梁の効果で、小さな加振力で、素子全体の磁束が最大 1 T の幅で変化、これがコイルに鎖交し、起電力が発生する。つまり振動の仕事を効率よく電力に変換する。
- (ii) 発電部が鉄系の構造体、かつシンプルな形状のため、作製が容易かつ堅牢性も高い。大きな仕事率 (力×

速度)の振動を許容する。摺動部が存在しないため、損失が低く、耐久性、疲労強度も高い。

- (iii)出力インピーダンスが小さい。主はコイルの抵抗 (数~数百Ω) である。よって電源として電流を取り出せる。扱いは一般的な回転の発電機と同様である。発生電圧はコイルの巻き数で調整が可能で、電力の整流、蓄電も容易である。
- (iv)共振周波数が高い。つまり高周波数の振動 (数百~数千 kHz) で高出力の発電ができる。また可動部の形状や錘等の付加により共振周波数の調整も容易である。
- (v) 耐熱性が高い。Fe-Ga 合金のキュリー温度は 800°C と高く、基本的に温度範囲はその他の構成部品 (磁石、コイル) の仕様で決定される。Fe-Ga 合金と磁性体の熱膨張係数は同程度で、熱衝撃による劣化は小さいと予想される。
- (vi)固定部、可動部の構成や形状の自由度が高い。構造体に組み込むことも可能である。機械的なインピーダンスを振動源とマッチさせるインターフェースを可動部、固定部に形成することで、効果的に振動のエネルギーを発電部に伝達することができる。

4 汎用デバイスとその評価

4.1 汎用デバイス

現状、理論効率の発電特性と耐久性を確保し、シンプルで安価な汎用デバイスが確立しつつある[10]。小型デバイスを例に、その構造と評価結果を説明する。Fig. 4 は構造図である。磁歪素子 (Galfenol, $\text{Fe}_{81.4}\text{Ga}_{18.6}$, ETREMA 製) は $2 \times 0.5 \times 11\text{ mm}^3$ の板で、これに巻き幅 7 mm, 層厚 1 mm, 線径 0.05 mm, 巻き数 1744 のコイル (120 Ω) が巻かれる。これと平行梁をつくる磁性体 (ステンレス) の厚みは 0.5 mm で、先に述べたようにこれに可動・固定部が連結され、片持ちのバックヨークを含め一体で形成する。バックヨークは閉磁路のバイアス回路を構成する役割を担い、これと平行梁部の間に $2 \times 3 \times 1\text{ mm}^3$ の Nd-Fe-B 磁石を配置することで素子に適度なバイアスが付与される。また素子とヨークの接合は、はんだで行う。はんだは、ステンレス用の強度の高いもので、平行梁の接合部にはんだを盛ることで、強度を確保する。また可動部の先端をテーパ状にする。これは可動部の軽量化と、この先端に錘を付加した場合の平行梁に作用する曲げモーメントの増加を目的としている。Fig. 5 は試作したデバイス

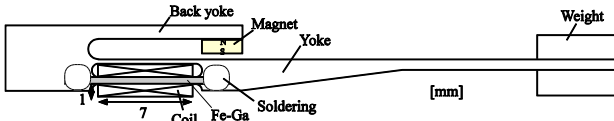


Fig. 4 Configuration of miniature prototype.



Fig. 5 Picture of prototype.

の写真である。素子およびヨークの形状加工はワイヤー放電加工で行っている。

4.2 評価結果

デバイスの評価のため、以下の項目の測定を行う。

1. 振動源の加速度に対する発生電圧の周波数応答：微小振動での電圧/加速度の感度、共振周波数、Q値がわかる。
2. 共振振動時の時間応答：加速度と変位、電圧の関係、これらの線形性、発生電力、素子内の局所的な磁束変化の様子がわかる。
3. 自由振動の時間応答：電気/機械エネルギーによる変換効率、減衰がわかる。

現在、詳細な測定中のため、途中の結果を報告する。

Fig. 6は、加速度 (G) に対する開放電圧 (V) の周波数応答 (振幅、位相) である。加振信号として白色雑音を用いている。共振周波数と感度は、1次で 367 Hz, -7.3 dB, 2次で 1511 Hz, -10.6 dB, 3次で、2428 Hz, 12 dB である。この3つの共振モードにおいて、平行梁部は一樣に湾曲し、効率よく発電が行われる。2次、3次の共振においては周波数が高いことで出力も高い [11]。一次共振のQ値は13.4である。1, 2, 3次の共振に続いて反共振が見られ、これは平行梁部の素子とヨークの接合が十分で金属の構造体に近い特性が現れるためである。

Fig. 7は、共振周波数の 362 Hz の正弦波で、デバイスを振動させた時の電圧の時間応答である。振動加速度 5 G で 2.3 V, 12 G で 3.8 V の電圧が発生する。整合負荷を仮に直流抵抗を同じとすると、発生電力は 11 mW, 30 mW と算出される。つまり磁歪式は大きな加速度を許容し、高い出力の発電を行う。また振動加速度を 5~12 G, また周波数 200 Hz~1 kHz の範囲でス

weepを繰り返しても性能の劣化は見られず、高い耐久性が予想される。Fig. 8に、加速度 5 G での先端変位と素子の磁束密度変化 dB の関係を示す。dB の変化幅は 0.74 T もあり、微小な変位で素子に大きな応力を付加する平行梁の効果が裏付けられる。

Fig. 9は自由振動時の発生電圧の時間応答である。

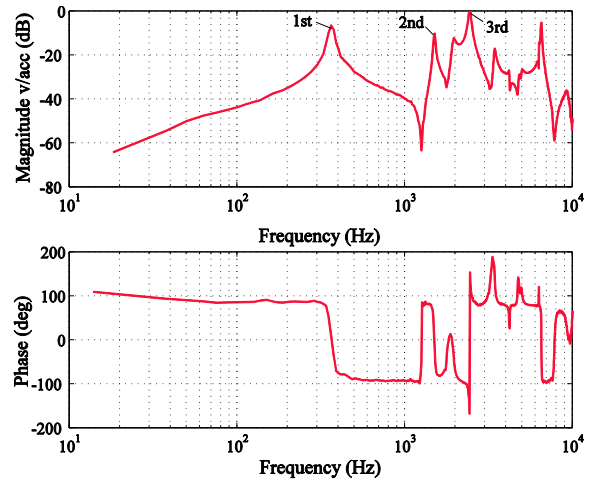


Fig. 6 Frequency response of voltage (V) /acceleration (G), magnitude (top) and phase (bottom).

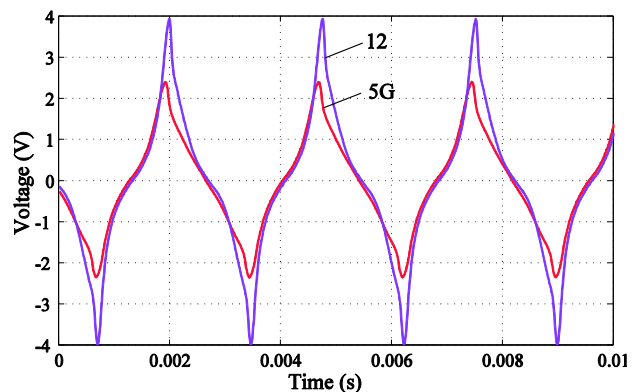


Fig. 7 Time response of open voltage at resonant frequency.

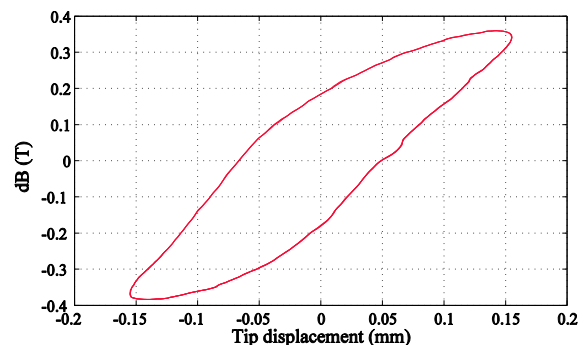


Fig. 8 dB vs. tip displacement.

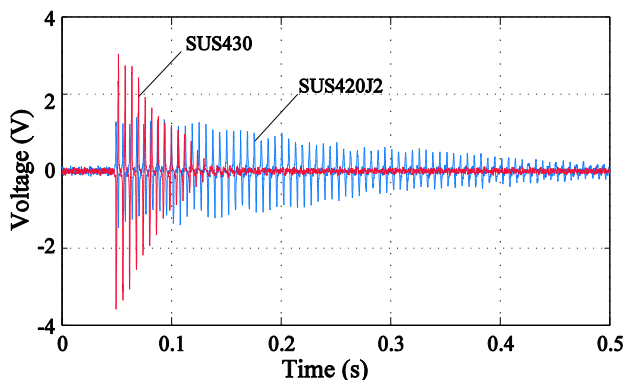


Fig. 9 Time response at free vibration.

この測定により変換効率 (=負荷抵抗におけるジュール損/入力機械エネルギー (力×変位/2)) が算出できるが、これはその途中の結果である。

筆者は、ヨーク材の選定を確立し、結果が示すよう従来のステンレス SUS430 に対して、SUS420J2 の方が、減衰が小さく、振動が持続する。一般に SUS420J2 は引張り強度が高くバネに利用されている。つまり、このバネ性がデバイスの減衰特性に反映されている。SUS430 で効率 30% の実績があり、SUS420J2 への変更で効率が更に向上する可能性がある。更に、固定端損失が最小化できれば(おおよその工夫を考案している)、ほぼ理論通りの効率が達成できる。

上記の測定はいずれも開放電圧で、負荷を結線した場合の電圧を測定することで、より詳細な発電量、それによる副次的な振動減衰の効果を検証する。

このほか、デバイスの動作シミュレーションや回路設計のために、等価質量、バネ定数、減衰、インダクタンス、抵抗、これらの連成の度合いを示す力係数を電気インピーダンスの測定で算出する。

5 デバイスの使い方、応用と課題

5.1 デバイスの使い方と応用

振動発電は非常に汎用性の高い技術で、磁歪式の特徴を生かすと、以下の用途また分野で活用できる。電池を必要とせず、メンテナンスフリーで半永久的に動作することが大きなメリットである。

- (i) 定常的な振動で発電し、これを電源に情報を送る (Fig. 10 左上)。利用分野として、自動車、鉄道、船舶、飛行機などの乗り物、橋梁、道路、鉄塔などのインフラ関連、生産機械や工作機械のモータ、コンプレッサなどである。例えば、老朽化が懸念さ

れる橋梁の監視 (センサの動作と情報の送信) に、車の通行に伴う振動が利用できる。

- (ii) 一定の力、変位から自由振動を介して発電、情報を送る (Fig. 10 右上)。照明や呼び出しのリモコンが電池不要で動作し、ドアの開け閉めや踏んだ情報を送ることで防犯やお年寄りの見守りにも役立つ。
- (iii) 衝撃で発電し、LED を点滅させる (Fig. 10 左下)。叩くと光る杖や、玩具、楽器、スポーツ用品ができる。例えば、靴底にデバイスを配置することで、歩行時の衝撃で発電、LED を点滅し、夜間歩行時の周囲への注意喚起に役立つ。衝撃は高い加速度と高周波の振動成分を含むことから電力を取り出しやすい。
- (iv) 水の流れや風、波から発電を行い、これを電源に情報を送信する (Fig. 10 右下)。一様な流れ中で半円柱が振動することが知られており、この現象を積極的に利用する。従来は振動を抑えることに主眼であるが、逆に振動を発生するような構造や工夫を考える。水道管の管理や、河川・海洋の情報収集に利用できる。

以上の応用においては、振動や変位、衝撃等の作用力を効果的に平行梁に付加する機械インターフェース、具体的には発電デバイスの可動部と固定部の形状の考案、設計がポイントである。

5.2 大型化について

デバイスの高出力化のためには大型化も考慮する。この可能性についてサイズ効果を説明する。まず発生電圧 (振幅) V は、コイルの巻き数 N 、振動 (共振) 周波数 f 、磁束密度の変化幅 B (最大 0.5 T 程度)、素子の断面積 S に比例し次式で与えられる。

$$V = 2\pi f N B S \quad (1)$$

コイルの抵抗 R は、コイルの長さ L 、線径、抵抗率 ρ

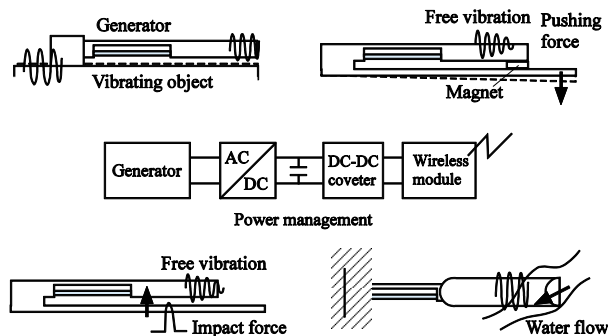


Fig. 10 Applications.

で、次式で計算でき、

$$R = \rho L / (\pi r^2) \quad (2)$$

これらを用い、最大電力 P (整合を仮定) は、

$$P = V^2 / (4R) \quad (3)$$

となる。ここでデバイスの寸法が K 倍されたとすると、発生電圧 V_k 、巻き線抵抗 R_k (巻き数は同じ) は、以下のようになる。

$$V_k = 2\pi (f/K) NB (K^2 S) = KV \quad (4)$$

$$R_k = \rho KL / \{\pi (Kr)^2\} = R/K \quad (5)$$

よって、電力 P_k は次式になる。

$$P_k = K^3 P \quad (6)$$

つまり電力は体積に比例し、所望の出力を満たすためには、デバイスのサイズアップも検討する。実際、筆者は体積でおおよそ 1000 倍したデバイスも試作しており、ワットオーダの発生電力を確認している[12]。試算によるとデバイスのスケールアップ、代表長さ 3 m, 30 m において、kW, MW オーダの発電もできることになる。

5.3 課題

一般に環境振動は低周波数かつ加速度も小さい (20 Hz, 0.5 G 以下)。ここで述べた結果は実験室での測定で、実際の環境振動下のものではない。つまり用途ごとに振動の加速度や周波数分布、これらの経年変化を計測し、目的の仕様を満たすデバイスの設計が必要である。特に Q 値の高いデバイスにおいては帯域幅が狭く、課題は周波数の変化への対応である。また近年、環境発電用の超低消費電力 DC-DC コンバータが複数の企業よりリリースされているが、これは主に圧電素子 (高電圧, 高インピーダンス) を想定したもので、磁歪式 (低電圧, 低インピーダンス) に対応した整流、蓄電、コンバータの開発も必要である。電力の高効率な消費、蓄電ができれば、副次的な振動減衰効果も期待できる。そして技術の普及には磁歪材料の量産技術、低価格化が必須である。現状 ETREMA 社においては、直径 30 mm, 長さ 200 mm の合金作製の実績があり、ガリウム (おおよそ 1 ドル/1 グラム) がその価格を決定している。ガリウムを同族元素であるアルミへの置換することを目的に、米国海軍研究所をはじめ、複数の研究機関において研究開発が進行中である。また板の加工において圧延ができれば、加工費の削減が図れる。

6 まとめ

磁歪式振動発電技術について解説した。身近な振動や動きで発電し、これを電源に情報を送る技術は、極めて汎用性が高く、その応用は多岐にわたる。その市場規模は数兆円で、新たなビジネスや産業の創出にも繋がる。現状、磁歪材料の量産化と共に、複数の企業において商品開発に向けた研究開発が行われており実用化は近い。また現在、振動発電を標準化する流れがあり、筆者は、磁歪式において日本がイニチアチブ取るよう力を注ぐつもりである。同時に、日本から世界への展開、技術の普及を目指す予定である。

参考文献

- [1] 上野, 山田, 磁歪材料を用いた小型振動発電素子の特性評価, 日本 AEM 学会誌, Vol. 20, 1, pp. 168-173, 2012.
- [2] A.E.Clark, M.Wun-Fogle, J.b.Restorff, "Magnetostrictive Properties of Body-Centered Cubic Fe-Ga and Fe-Ga-Al Alloy", *IEEE, Trans.Mag.*, Vol.37, pp.3238-3240, 2000.
- [3] A.E.Clark, M.Wun-Fogle, J.b.Restorff, "Magnetostrictive Properties of Galfenol alloys under compressive stress", *Materials Transaction*, Vol.43, pp.881-886, 2002.
- [4] 上野, 池畑, 山田, 発電素子および発電素子を備えた発電装置, 特許 4905820.
- [5] 八田, 上野, 山田, 磁歪式振動発電スイッチを用いた電池フリーリモコンの実用化に関する研究, 第 26 回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム講演論文集, pp. 188-193, 2014.
- [6] 北, 上野, 山田, 磁歪材料を用いた波力発電システムの基礎的研究, 第 25 回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム講演論文集, pp.200-201, 2013.
- [7] E. Summers, T. Lograsso, J. Snodgrass, J. Slaughter, "Magnetic and mechanical properties of polycrystalline Galfenol", *Proc. SPIE 5387, Smart Structures and Materials*, 2004.
- [8] 藤枝, 鈴木, 湊, 福田, 振動発電デバイスへの応用に向けた Fe-Ga 合金単結晶の CZ 法による作製および評価, 日本金属学会 2013 年秋期 (第 153 回) 講演大会, 2013
- [9] 松井, 振動発電機, 特開 2009-296734.
- [10] 上野, 磁歪式振動発電技術の実用化に向けたデバイス改良, 第 26 回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム講演論文集, pp.184-187, 2014.
- [11] 上野, 磁歪式振動発電の高次共振モードにおける発電特性, 日本機械学会 2012 年度年次大会, 2012.
- [12] 坂本, 上野, 山田, L 字フレームを用いた磁歪式振動発電デバイスの特性評価, 日本 AEM 学会誌, Vol. 21, No. 2, pp. 222-227, 2013.