

磁歪材料を用いた振動発電と アクチュエータの実用化，現状と展望*

Energy Harvesting and Actuator Technology Using Magnetostrictive Material, Current Status and Prospective

上野敏幸**
Toshiyuki UENO

Key words magnetostrictive material, galfenol, energy harvest, actuator, vibration

1. はじめに

鉄などの磁性材料は磁化の過程で形状の変化を伴う。これを磁歪効果と呼ぶ。磁歪は発生する最大の伸び/長さで定義される。この磁歪効果が大きければ、磁歪による振動を音源や動力として利用できる。このように有用な磁歪を生じる材料が磁歪材料である。

近年、米国海軍研究所で“Galfenol”と呼ばれる画期的な磁歪材料が開発された¹⁾。この材料は鉄とガリウムの合金で、鉄と同様の高い加工性と機械強度を有する。Galfenolはこの優れた特徴により、アクチュエータや発電デバイスとして有用であることが筆者らの研究で明らかになった。本稿では、磁歪材料の基礎とGalfenolの特徴ならび、その応用として振動発電と骨伝導イヤフォンの研究例を踏まえ、磁歪材料の現状と将来展望を解説する。

2. 磁歪材料

2.1 磁歪効果と逆磁歪効果

磁歪材料について説明する。図1は磁化と歪の関係である。材料に磁界を加えると磁化し、同時に伸びを生じる。式(1)と(2)は磁歪材料の構成方程式で、それぞれ歪と磁束密度を与える。式(1)の意味は、全体の歪 S は、右辺第2項の外部応力で生じる歪と第1項の磁歪の和である。磁歪は磁界強度 H に磁歪定数 d を乗じた値で発生する。磁歪材料を振動アクチュエータやスピーカとして利用する場合、 d が大きいほど電流に対する変位の立ち上がりが高く、磁歪(最大値)が大きいほど振幅を大きく取れる。

$$S = dH + cT \quad (1)$$

$$B = \mu H + dT \quad (2)$$

S : 歪, H : 磁界強度

T : 応力, c : コンプライアンス

B : 磁束密度, μ : 透磁率

d : 磁歪定数

一方、磁束密度 B は、右辺第1項に示す磁界と第2項の応力 T で変化する。応力で磁化が変化する効果を逆磁歪効果と呼び、 d は T に対する B の変化率(感度)を与える。一般に圧縮応力で磁化は減少する。式(2)と(1)の d は同じで、つまり磁歪定数の大きな材料は、アクチュエータのみならずセンサや発電デバイスとしても有用である。

2.2 鉄ガリウム合金

鉄ガリウム合金(Galfenol)は、鉄をベースにした磁歪材料である。組成比はFe 81.6% Ga 18.4%で、ゾーンメルトなど結晶軸を磁化容易方向に揃える製法にて、最大300 ppmの大きな磁歪が発生する。この材料の一番の特徴は、その優れた機械特性にある。延性かつ堅牢で、440 MPaの引張り応力、0.25%の破断歪が報告されている²⁾。この高い機械強度により、引張りや曲げ、衝撃等が作用する状況下でも安定な動作が確保できる。

またGalfenolは加工性が良く、圧延や切削、溶接、放電加工などのほとんどの加工プロセスが施せる。例えば、図2は直径1インチの丸棒から3 mm厚や0.5 mm厚の板をワイヤー放電加工で切り出した例である。このように大きなバルク材から大量の部材が切り出せることから量産に適した材料であるといえる。

ヤング率は60~70 GPa(アルミと同程度)、比透磁率は50~200で、これらは構造材料や磁性材料として十分な値

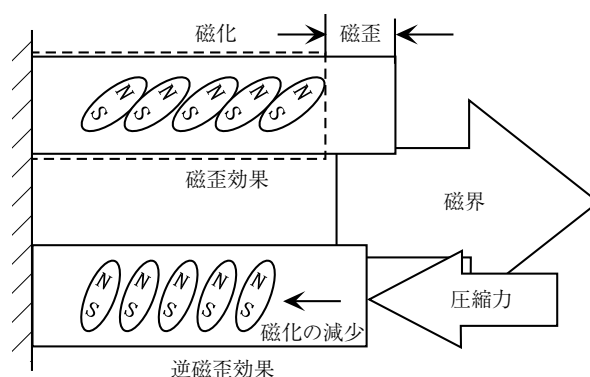


図1 磁歪効果と逆磁歪効果

*原稿受付 平成25年1月21日

**金沢大学理工研究域電子情報学系(石川県金沢市角間町)

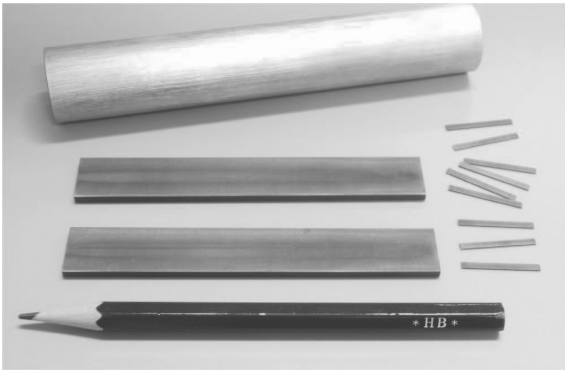


図2 Galfenolの加工例

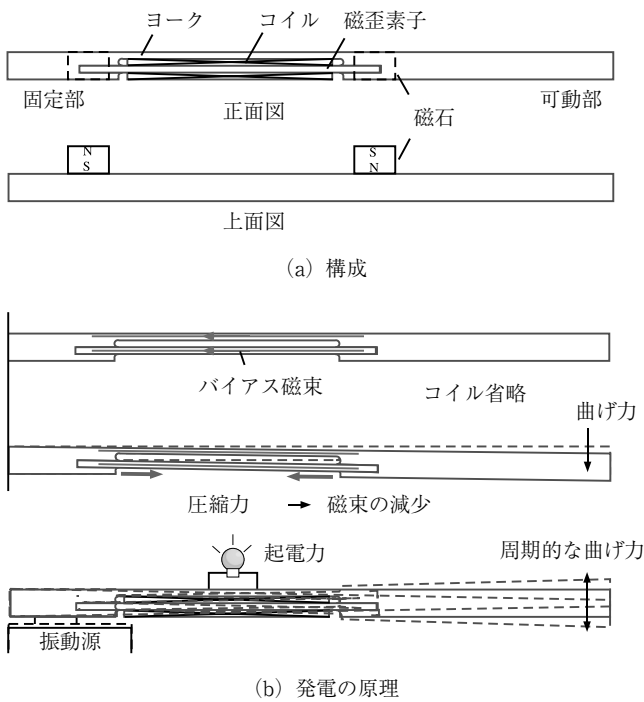


図3 デバイスの構成 (a) と発電の原理 (b)

である。そして $1.5 \sim 2 \times 10^{-8} \text{ m/A}$ と大きな磁歪定数は、この材料をアクチュエータや発電デバイスとして機能させる。その他、実用に優れた点に700度以上の高いキュリー温度がある。磁歪特性は極低温から200度の高温下でほとんど変化せず、温度や経年変化によるエージングもほとんどないことが確認されている。

3. 振動発電

著者らは磁歪材料を用いた振動発電技術の開発を行っている³⁾。これが実用化すれば、身近な振動や動きからエネルギーが取り出せ、将来、電池の要らないリモコンやワイヤレスセンサネットワークが実現できる。また大型化すれば、自然現象を振動源としたワットオーダの発電も可能である。

3.1 デバイスの構成と原理

発電デバイス⁴⁾は、図3 (a) のようにコイルが巻かれた磁歪素子、ヨーク、界磁用の永久磁石から構成される。ヨ

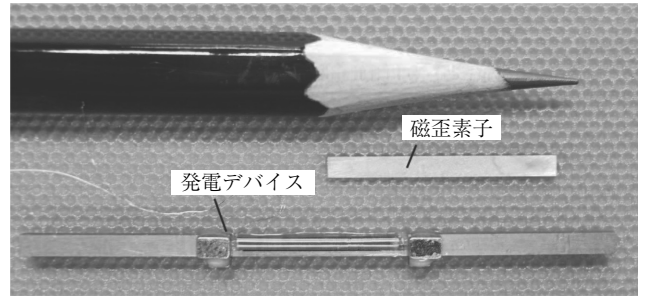


図4 試作した発電デバイス

ークの中央に素子が配置され、電圧はヨークと素子で構成される平行梁の湾曲で生じる。これを行うために素子の両端はヨークに強固に接合されている。デバイスは片持ちで振動源に固定され、可動部を振らせることで発電を行う。以下に原理を説明する。ヨークの側面には界磁用の永久磁石が取り付け、素子内に適度な磁束を通しておく(図3 (b) 上)。この磁束を変化させるのに、例えば図3 (b) 中のように可動部に下向きの曲げ力を加え、平行梁を湾曲させる。このとき素子の軸方向には一様な圧縮応力が加わり、逆磁歪効果により磁束が減少する。逆に上向きの力で、素子の磁束は増加する。この曲げ力を振動にて周期的に変化させると、素子内の磁束は交番状に変化し、ファラデーの電磁誘導の法則でコイルに起電力が発生する(図3 (b) 下)。このデバイスは平行梁を構成することに特徴がある。小さな曲げ力は大きな軸力として素子に作用し、これで変化した磁束は効率よく素子とヨークで構成された閉磁路を環流する。

3.2 試作評価と特徴

Galfenol の特性は発電デバイスの発電量と耐久性に反映される。図4はこの検証のために試作したデバイスの一例である。これは $2 \times 0.5 \times 22 \text{ mm}^3$ の磁歪素子(Galfenol)、1345巻き 85Ω のコイル、 $2 \times 3 \times 2 \text{ mm}^3$ のネオジム磁石、SUS430のヨークで構成される。大きさはマッチ棒ほどの小型なものである。以下に評価結果を述べる。

- 一次共振周波数(約400 Hz, 20 G)で振らせると、可動部が片振幅0.8 mmで変位し、5 V程度の電圧が発生する。このときの発生電力は62 mW(電力密度 50 mW/cm^3)である(図5参照⁵⁾)。
- エネルギー変換効率(出力電気エネルギー/入力機械エネルギー)は15~20%程度で、一回の自由振動にて0.3 mJ程度の電気エネルギーが取り出せる。
- 10 Gの10億回以上の繰り返し振動(共振)でも発電特性はほとんど低下しない。
- 出力インピーダンスが小さいことで、LEDやキャパシタなどの負荷で効率よく電力が取り出せる。図6は電動歯ブラシの振動で50個のLEDを点灯させるデモである。
- 負荷で電力が消費されると同時に振動を減衰させる

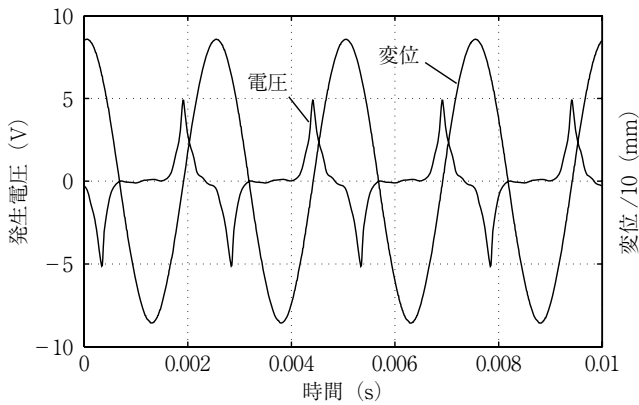


図5 一次共振での変位と発生電圧の時間応答



図6 振動発電のデモ

ダンピング効果が発生する。

また体積を1000倍したデバイスではワットオーダの発電ができ、つまり電力は体積に比例するスケール効果が実証されている。よく知られた振動発電に圧電材料を利用する技術がある。磁歪式の優位性は、デバイスが堅牢であること、これは構造がシンプルで、力が作用する発電部が鉄系材料で構成されていることに由来する。デバイスは共振状態で使うことが多く、10年以上の出力を維持するため高い耐久性は必須である。

また出力の向上のため動作周波数を上げるのは発電の基本である。磁歪式の長所は、その上限を決める共振周波数を高く取れることである。実際、このデバイスは、さらに高い2次共振(1850 Hz付近)でも発電ができ、このとき、出力は4倍程度に増加する⁹⁾。準静的な動き、また数10 Hzの低周波数域でも出力を取り出すことは可能である。剛性を下げる、低い周波数の共振系や弾く機構と組み合わせるなどのさまざまなアイデアがある。デバイスが鉄系の構造体として、これらの改良や工夫が容易にできるのも磁歪式のメリットである。

3.3 振動発電の応用

応用分野として自動車や鉄道などの輸送機械が挙げられる。デバイスを車両のフレームに設置すると、エンジンや走行時の振動で発電し、照明や無線センサシステムの電源

として機能する。インフラの分野においては橋脚や道路、配管などの振動で発電し、電池や配線が不要のヘルスマニタリングシステムが実現できる。このときの課題は低周波数振動(～20 Hz)の効率的な利用およびその変化への対応である。ボタンを押す動作も振動を介してエネルギーに変換でき、電池のいらぬリモコンや踏むと光る照明などが実用化できる。リモコンは、自由に配置できる呼び出しや警報システムとして医療や介護、防犯の分野でも役立つ。1 mJあれば一回の無線送信が可能で、小型化とともに、この発電量をいかに確保するかが開発の目標になる。また振動には衝撃も含まれ、叩くと光る棒や杖として玩具や福祉機器に搭載できる。これに関しては、30 cmの棒に取り付き、コツコツと叩くと10 V以上の電圧が発生しLEDを点滅させる単4電池程度のデバイスが完成している。大きな発電を行うためには、加振源として水などの流体力を利用する。一様な流れでは、ギャロッピング現象で自励振動をいかに発生させるかポイントである⁶⁾。また波においては、浮力とスイッチを組み合わせる方法で連続的な発電ができる。

4. 骨伝導イヤフォン

アクチュエータについて解説する。鉄ガリウム合金を用いたアクチュエータは小型化で従来にないメリットが生まれる。材料の加工性がよく、構成がシンプルであることから、小型化が容易である。また一般にデバイスを小さくすると耐久性が低下するが、磁歪式の場合、引張り強度が高いため壊れにくい。また動作に必要な電流および電圧が小さくなると同時に、スケール効果で共振周波数も増加する。つまり高い駆動周波数で動作させることで、大きな出力が得られる。薄型化で渦電流損失が低下する、また放熱効果が向上するのも小型化が適する理由である。

応用例として骨伝導イヤフォンを紹介する⁷⁾。骨伝導は骨を伝導する振動にて音を聞かせる技術で、近年、携帯電話にも搭載されている。骨導音は騒音下でも明瞭に知覚されることから、レストランや工事現場での利用に適している。従来の圧電素子を用いたものはヘッドフォンのように装着し、振動部をこめかみ付近に押し当てる。欠点としてサイズが大きく、動作には別途アンプが必要である。鉄ガリウム合金を用いると、振動部を劇的に小さくでき、シンプルな構造にて骨導音と気導音を同時に聞ける機能的なイヤフォンが実現できる。これは図7左のように主にH型のフレームと磁歪素子、コイル、磁石、半円筒の振動板で構成され、耳穴に収まるほどのサイズである。振動部のメインは発電デバイスと同じで、Hフレームの中央でコイルが巻かれた素子とヨークが平行梁を構成する。音声信号に対応する電流をコイルに流すと、素子は磁歪効果で伸縮する。図7右のようにこの伸縮は平行梁にて曲げ変形に変換され、フレームの外部に装着された振動板を変位させる。これを耳穴に挿入し、皮膚に密着するよう配置することで、振動板は軟骨に振動を与え、この振動は頭蓋骨を介

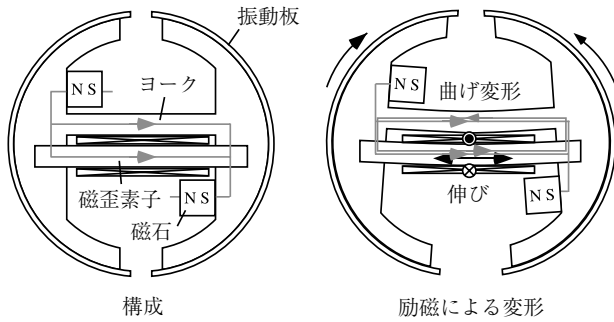


図7 骨伝導イヤフォンの構成(右)と原理(左)

振動特性の評価結果で0.2 A (2 V) の励磁電流で8.3 μm の曲げ変位が発生し、共振周波数は2.2 kHz程度、可聴域において60 dB以上の振動加速度レベルを確認している。またこのデバイスは低電圧で動作し、別途アンプを必要としない。つまり携帯音楽プレーヤなどのイヤホンジャックに接続することで利用できる。現在の構成は、図8のように振動板を2段にし、市販のカナル型イヤホンのように外径が小さい1段目に柔軟なシリコンキャップを被せることで装着性を向上させている。実際、著者が耳穴に装着し試聴したところ、明瞭な音声を知覚し、同時に周囲の音声も聞くことができた。現在、直径が7 mm程度で全体が耳穴に収まるような超小型のデバイスも完成している。

5. おわりに

アクチュエータについては超小型3軸球面モータ⁸⁾や触感提示用の振動デバイスの研究も進行中である。最後に、小型化の一番のメリットは、材料コストが無視できる点である。またいずれのデバイスもシンプルな構造で、従来の部品加工や組み上げ技術によりできる。このための精密加工や生産技術は日本の得意とするところである。材料の低コスト化については、ガリウムをアルミに置き換える安価な磁歪材料の研究開発も始まっており、数年以内の量産化も期待される。現在のアクチュエータや振動発電の研究は、電磁力や圧電材料を用いるものが主流だが、磁歪材料にも注目が集まり、実用化が進むことを願う次第である。

参考文献

- 1) A.E. Clark, M. Wun-Fogle and J.B. Restorff: Magnetostrictive Properties of Body-Centered Cubic Fe-Ga and Fe-Ga-Al Alloy, IEEE Trans. Magns., **37** (2000) 3238-3240.
- 2) R.A. Kellogg, A.M. Russell, T.A. Lograsso, A.B. Flatau, A.E. Clark and M. Wun-Fogle: Tensile Properties of Magnetostrictive Iron-gallium Alloy, Acta Materialia, **52** (2004) 5043-5050.
- 3) <http://vibpower.w3.kanazawa-u.ac.jp>
- 4) 上野敏幸, 池畑芳雄, 山田外史: 発電素子および発電素子を備えた電子装置, 特許 4905820.
- 5) 上野敏幸: 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年度年次大会講演論文集, (2012) J102015.
- 6) 山口誠, 木綿隆弘, 上野敏幸, 河野孝昭, 小松信義, 木村繁男: 片持ち梁弾性支持矩形柱の流力振動応答特性と振動発電に関する研究, 日本機械学会 2012年度年次大会講演論文集, (2012) J101011.
- 7) 上野敏幸, 三浦英充, 山田外史: 磁歪材料を用いた中空骨伝導イヤフォンの開発, 第21回 MAGDA コンファレンス in 仙台講演論文集, (2012) 279-283.
- 8) 上野敏幸, 超小型3軸球面モータ, ケミカルエンジニアリング, **57** (2012) 66-70.

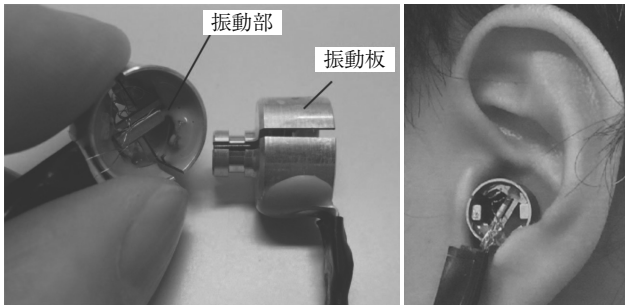


図8 試作した骨伝導イヤフォン

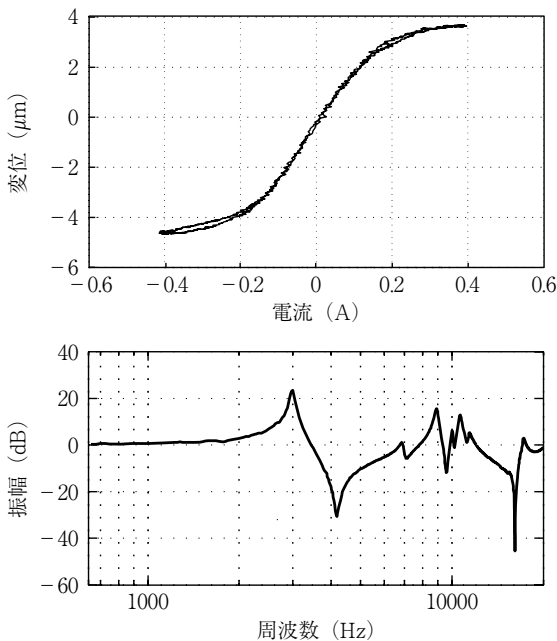


図9 変位(上)とその周波数応答(下)

し音声として知覚される。このデバイスでは、H型のフレームの隙間から周囲の音声筒抜けである。結果、工事や飲食店の現場では周囲の音声や作業音と同時に、センターからの指示を骨導音で聞くことができる。

図8左は著者らが試作したデバイスの写真である。1×1×10 mm³の磁歪素子(Galfenol)、67ターン10 Ω の励磁コイル、12 mm径のH型ヨーク(SUS430)、2×3×2 mm³の界磁用ネオジウム磁石から構成されている。図9は



上野敏幸

1995年東北大学工学部卒業。2001年東北大学工学研究科機械電子工学専攻博士後期課程修了。博士(工学)。日本学術振興会特別研究員、東京大学特任助教を経て、現在、金沢大学理工研究域電子情報学系・准教授。主に、磁歪材料を用いたアクチュエータ、振動発電とその応用に関する研究開発に従事。