

振動発電に及ぼす片持ち梁の振動の影響

川井哲郎・石川瑛士・大竹 充・二本正昭
(横浜国大)

Effect of the Vibration of Cantilever Beam on the Vibration Power Generation

Tetsuroh Kawai, Eishi Ishikawa, Mitsuru Ohtake, and Masaaki Futamoto

(Yokohama National University)

はじめに IoTの進展に伴い多量のセンサが使われ、その電源として環境からエネルギーを取り込む、いわゆるエネルギーハーベスト型が注目されている。磁歪材料を使った振動発電はその有力な方式の一つで、多くの報告がある¹⁾。発電効率の良いデバイスを設計するためには振動と発電電圧との関係を明確にしておく必要がある。本報告では磁歪材料を使った片持ち梁の振動発電の現象をデバイス設計に役立つ解析式として求めることを目的とする。片持ち梁の減衰定数を実測から求め、自由端の振動を減衰がある強制振動の運動方程式で記述し、その振幅が発電電圧に及ぼす影響を実測と比較しながら解析した。

実験方法 振動発電用片持ち梁にはCu基板(長さ:40 mm, 幅:10 mm, 厚さ:0.3 mm)にFe-B-Si系アモルファスリボン(日立金属製SA1, 厚さ:25 μm)をエポキシ樹脂で貼り付けたものを使用し、振動試験機で周波数を1 Hz刻みで強制振動させた(加速度は1重力加速度に固定)。発電コイル(抵抗:1.2 k Ω)にはCu線(0.1 mm径)を梁の長さ全体にわたって巻いたコイル(ターン数:8,000, 最内径:12 mm \times 16 mm)を使用した。このコイルの両端に発生する電圧をオシロスコープで観測した。梁にはバイアス磁場等は印可せず、純粋に振動だけの影響を解析にした。

実験結果と考察 片持ち梁の自由端を弾いて、その減衰振動の様子を動画に撮影し、振幅の時間依存性を指数関数近似して減衰定数 β ($\beta=0.0061$)を求めた。共振周波数は117 Hzであった。この減衰定数を使い、自由端の振動が強制振動の運動方程式に従うとして計算した結果をFig. 1(a)に示す。意図的に共振周波数から2 Hzずらして強制振動させた時の自由端の振幅の立ち上がりを時間の関数として示してある。充分時間が経ち安定した強制振動に至るまでにいわゆるうねりが生じていることがわかる。Fig. 1(b)はオシロスコープで観測した発電電圧の立ち上がりを示す。最も大きな発電電圧が得られた共振周波数から2 Hzずらした状態である。Fig. 1(a)と同様に安定した電圧が得られるまでにうねりを生じていることがわかる。これら2つの図を比較することにより、振動発電現象は減衰を考慮した強制振動の運動方程式で記述出来ることがわかる。

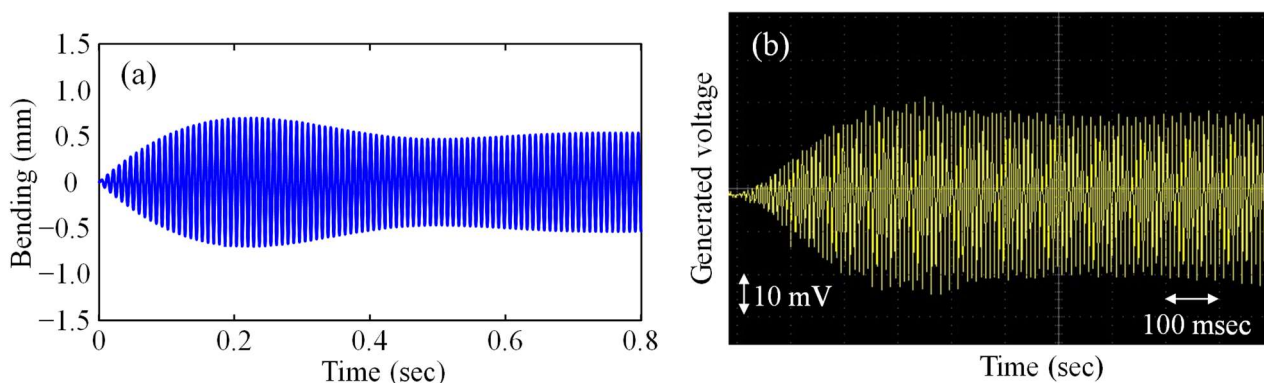


Fig. 1 (a) Calculated bending at free-end and (b) observed generated voltage of the cantilever beam at 119 Hz.

謝辞 Fe-B-Si系アモルファスリボンをご提供頂いた日立金属(株)メトグラス安来工場 備前嘉雄 様に厚くお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 上野敏幸: 応用物理, **89**, 82–86 (2020).

磁歪式振動発電における磁化挙動と出力電圧に及ぼす バイアス磁界の影響

石川瑛士・川井哲郎・大竹充・二本正昭
(横浜国大)

Influences of Bias Magnetic Field on the Magnetization Behavior and the Output Voltage
in Magnetostrictive Vibration Power Generation

Eishi Ishikawa, Tetsuroh Kawai, Mitsuru Ohtake, and Masaaki Futamoto
(Yokohama Nat. Univ.)

はじめに 環境発電デバイスをセンサと無線モジュールの自立型電源として組み合わせることで、IoTデバイスのワイヤレスかつメンテナンスフリー化が可能になることが期待されている。磁性材料の磁化方向が応力により変化する逆磁歪効果を活用した振動発電では、磁化の変化量を大きくするためには、適度なバイアス磁界が必要であることが知られている¹⁻³⁾。しかしながら、バイアス磁界の強度や印加方向が発電特性に及ぼす影響を調べた報告は殆ど無い。本研究では、等方的な性質を持ち、比較的大きな磁歪を持つことが知られているFe-B-Si系アモルファス薄帯から成る梁材料を用いて、バイアス磁界強度および印加方向が出力電圧に及ぼす影響を系統的に調べた。

実験方法 梁材料はCu板(50 mm×10 mm×0.3 mm)にFe-B-Si系アモルファス薄帯(日立金属製 SA1, 50 mm×10 mm×25 μm)をエポキシ接着材で貼り付けることにより作製した。長手方向の10 mmの部分を固定し、梁を片持ちの状態にし、発電コイル(抵抗: 1.2 kΩ, 巻数: 8,000回, 最内径: 12 mm×16 mm, 全長: 40 mm)に挿入し、梁のみを振動試験機を用いて強制振動させた。梁の共振周波数は105 Hzであった。また、ヘルムホルツコイルを用いて梁にバイアス磁界を印加した。また、片持ち梁をビデオカメラで撮影することで自由端の振幅を計測した。

実験結果 はじめに、梁の長手もしくは短手方向にバイアス磁界を印加し、磁界強度が発電特性に及ぼす影響を調べた。Fig. 1に発電ピーク電圧の磁界印加強度依存性を示す。長手方向に印加した場合、出力が最大となる磁界は10 Oeであったのに対して、短手方向では38 Oeで最大となった。また、長手方向に印加した場合、376 mVの高い出力が得られた。一方で、長手方向に強い磁界を印加してしまうと、出力が急激に減衰してしまうのに対し、短手方向では比較的強い磁界でも、出力が殆ど低下しないことが分かった。次に、振動の周波数が発電特性に及ぼす影響を調べた。Fig. 2に周波数依存性を示す。長手および短手のいずれの方向にバイアス磁界を印加した場合においても、共振周波数近傍で高い出力が得られ、そこから外れると出力が低下する傾向が認められる。当日は、これらの現象を磁化挙動のモデルに基づいて説明する。

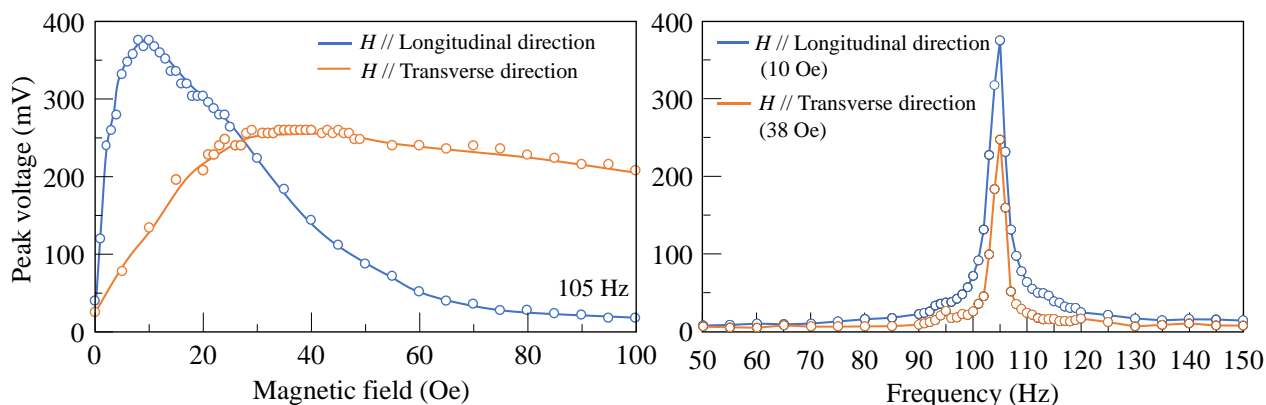


Fig. 1 Magnetic field dependence of peak voltage. Fig. 2 Frequency dependence of peak voltage.

謝辞 日立金属株式会社メトグラス安来工場の備前嘉雄様にアモルファス薄帯をご提供頂きました。

- 1) T. Ueno: *J. Appl. Phys.*, **117**, 17A740 (2015).
- 2) 上藤枝俊, 栢修一郎, 川又透, 志村玲子, 石山和志, 福田承生, 鈴木茂: まてりあ, **59**, 14 (2020).
- 3) Z. Yang, R. Onodera, T. Tayama, Z. Yang, R. Onodera, T. Tayama, M. Watanabe, and F. Narita: *Appl. Phys. Lett.*, **115**, 243504 (2019).

磁歪式振動発電における電力密度向上のための 片持ち梁の磁氣的断面構造の設計

石川瑛士・川井哲郎・大竹充・二本正昭
(横浜国大)

Design of Magnetic Cross-Sectional Structure of Cantilever Beam for
Improvement of Power Density in Magnetostrictive Vibration Power Generation

Eishi Ishikawa, Tetsuroh Kawai, Mitsuru Ohtake, and Masaaki Futamoto
(Yokohama Nat. Univ.)

はじめに IoT デバイスに搭載する自立型電源として、周囲の振動や衝撃から電力を取り出す振動発電デバイスが注目されている。中でも、逆磁歪効果を利用した発電には、高出力化が可能で、耐久性や耐熱性も優れることから、近年、盛んに研究されている¹⁻⁴⁾。交流発電の効率向上のためには、発生電圧の最大値だけでなく、波形の積分値に関する電力密度も増加させることが重要である。多くの磁歪式発電デバイスでは、磁歪材料の板と磁歪材料にバイアス磁界を印加するためのヨーク材料の板を貼り合わせた梁を片持ちで支持する構造が採用されている。そして、振動で梁に作用する交番曲げ荷重により、中立面を境とする上下で引張と圧縮の異なる応力が発生する。通常、中立面と交わらないように磁歪材料板が配置されるため、磁歪材料に引張と圧縮の応力が同時に働くことはない。しかしながら、同時に活用することが出来れば、電力密度の向上に繋がる可能性がある。本研究では、現象の基礎検討を目的に、バイアス磁界をヨーク板からではなく、ヘルムホルツ・コイルにより外部から印加することにより、梁の設計制約を取り除き、梁の磁氣的な断面構造と出力電圧波形の関係を調べた。そして、電力密度を向上させるための断面構造を考察した。

実験方法 梁の寸法は50 mm×10 mm×0.3 mmで一定とし、Fig. 1(a)に示す4種類の梁を使用した。1つ目は0.2 mm厚のCu板上に0.1 mm厚の方向性珪素鋼 (Fe-Si) 板を圧延方向が長手方向となるようにエポキシ樹脂で貼り合わせた (Fig. 1(a-1))。2つ目は1つ目の上下を逆にしたもの (Fig. 1(a-2))、3つ目は2枚の0.1 mm厚のFe-Si 板で0.1 mm厚のCu板を挟み込んだもの (Fig. 1(a-4))、そして、4つ目は0.3 mm厚の板 (Fig. 1(a-5)) とした。長手方向の10 mmの部分をつまみ、梁を片持ちの状態とし、発電コイル (抵抗: 1.2 kΩ, ターン数: 8,000, 最内径: 12 mm×16 mm, 全長: 40 mm) に挿入した。そして、コイルは振動させず、梁のみを振動試験機で振動させた。また、バイアス磁界をヘルムホルツコイルを用いて梁の長手方向に印加した。なお、振動試験機の加速度の波形は、圧電式加速度ピックアップを用いて計測した。

実験結果 0.1 mm 厚の Fe-Si 板と 0.2 mm 厚の Cu 板を貼り合わせ、Fe-Si 板が上面になるように振動させた場合の出力電圧の波形を Fig. 1(b-1)、下面になるようにした際の電圧波形を Fig. 1(b-2)に示す。両者は位相が反転した関係となっていることが分かる。Fig. 1(b-4)に 0.1 mm 厚の Fe-Si 板で 0.1 mm 厚の Cu 板を挟み込んだ梁を振動させた場合の波形を示す。片面に Fe-Si 板を貼り付けた場合に比べて、ピークピーク値は大きくは変わっていないものの、周波数が2倍になっていると見なすことができ、電力密度が向上していることが分かる。また、Fig. 1(b-3)は Fig. 1(b-1)と(b-2)の波形を足し合わせたものであり、Fig. 1(b-4)とよく一致している。このことは、上下の Fe-Si 板は独立して動作していることを示唆しており、梁に発生する引張と圧縮の応力を同時に活用できていることが分かる。そして、Fig. 1(b-5)に 0.3 mm 厚の 1 枚の Fe-Si 板を振動させることにより得られた出力波形を示す。Fig. 1(b-5)も Fig. 1(b-4)と同様な波形となっており、磁歪材料として Fe-Si 合金を用いる場合、3層構造にしなくても、同様な効果が得られることが示された。

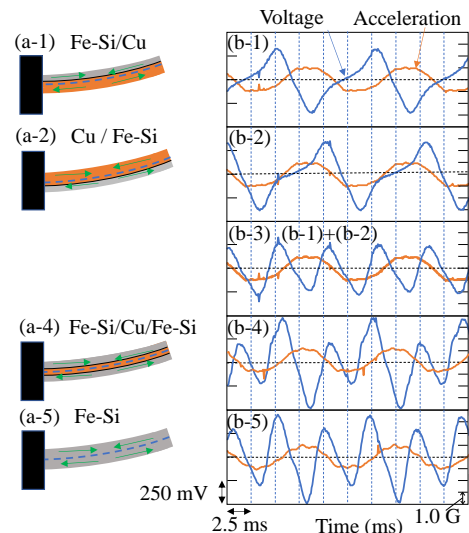


Fig. 1 (a) Cross-sectional structures of cantilever beam and (b) output voltage waveforms.

- 1) T. Ueno: *J. Appl. Phys.*, **117**, 17A740 (2015).
- 2) Z. Yang, K. Nakajima, R. Onodera, T. Tayama, D. Chiba, F. Narita: *Appl. Phys. Lett.*, **112**, 073902 (2018).
- 3) S. Yamaura, N. Kimura, M. Yokoyama, T. Kubota, Y. Furuya: *Trans. Mat. Res. Soc. Japan*, **42**, 131 (2017).
- 4) T. Okade, S. Fujieda, S. Hashi, K. Ishiyama, S. Suzuki, S. Seino, T. Nakagawa, T. Yamamoto: *Mater Trans*, **61**, 1799 (2021).

電解めっき法により形成した Fe-Co 合金厚膜を用いた磁歪式振動発電

明田俊祐・石川瑛士・中村優太・大竹充・川井哲郎・二本正昭
(横浜国大)

Magnetostrictive Vibration Power Generation by Using Electroplated Fe-Co Thick Film
Shunsuke Aketa, Eishi Ishikawa, Yuta Nakamura, Mitsuru Ohtake, Tetsuroh Kawai, Masaaki Futamoto
(Yokohama Nat. Univ.)

はじめに エネルギー・ハーベスティング技術の一つである磁歪式振動発電が注目されている。これまで、逆磁歪効果を発現させる磁性材料として、磁歪定数の大きな Fe-Ga¹⁾や Fe-Co²⁾合金に加え、磁気異方性が小さな Fe-B³⁾や Fe-Si⁴⁾合金が検討されている。また、出力電圧は磁性材料の断面積に比例するため、25~500 μm 厚のバルクの薄板もしくは薄帯が用いられている。一方で、数十 μm 程度の厚さであれば、膜で置き換えることができる。厚膜を形成する手法として、製膜速度が速いめっき法が有効である。また、めっき膜は残留応力によりバルクよりも大きな磁歪を持つ場合も報告されており、磁歪式発電用磁性材料に適していることが考えられる。本研究では、磁性材料として Fe-Co 合金に着目し、電解めっき法により厚膜形成を行った。そして、発電用磁性材料への適用を試みた。

実験方法 膜形成には陽極が Fe 板、陰極が Cu 基板 (25 mm×8 mm×0.1 mm) の電解めっき装置を使用した。浴中の Fe と Co イオンの比率を変えることで膜組成を変化させた。膜組成分析には EDS, 構造評価には XRD, 磁気特性評価には VSM, 磁歪特性評価には片持ち梁法を用いた。発電特性の評価には、ヘルムホルツ・コイルにより外部からバイアス磁界を印加できる試験装置を用いた。めっき試料の長手方向の 5 mm の部分を固定し、片持ち梁の状態とし、検出コイル (抵抗: 0.53 Ω , 巻数: 4000 回, 最内径: 14 mm×10 mm, 全長: 20 mm) に挿入した。そして、コイルは振動させず、梁のみを振動させた。また、長手方向にバイアス磁界を印加した。

実験結果 Fig. 1 に Cu 基板上に形成した 27 μm 厚の Fe₆₀Co₄₀ 膜を 151 Hz で共振させ、長手方向に 34 Oe のバイアス磁界を印加した場合に得られた出力電圧波形を示す。振動の周期に伴い、100 mV 程度の電圧が観察されており、めっき膜によっても出力が得られることが分かった。Fig. 2 に単位膜厚あたりの出力電圧の組成依存性を示す。出力電圧は組成に強く影響を受けていることが分かる。当日は、めっき膜の構造・磁気・磁歪特性と発電特性の関係について詳細に議論する。

- 1) A. E. Clark, K. B. Hathaway, M. Wun-Fogle, J. B. Restorff, T. A. Lograsso, V. M. Keppens, G. Petculescu, and R. A. Taylor: *J. Appl. Phys.*, **93**, 8621 (2003).
- 2) I. Hasif, T. Kubota, M. Matsumoto, S. Yamaura, and Y. Furuya: *J. Jpn. Soc. Appl. Electromagn. Mech.*, **26**, 254 (2018).
- 3) 長内史也, 栢修一郎, 石山和志: 電気学会全国大会., **2**, 146 (2019).
- 4) 長内史也, 栢修一郎, 藤枝俊, 石山和志: 日本磁気学会学術講演概要集, **43**, 26aE-7 (2019).

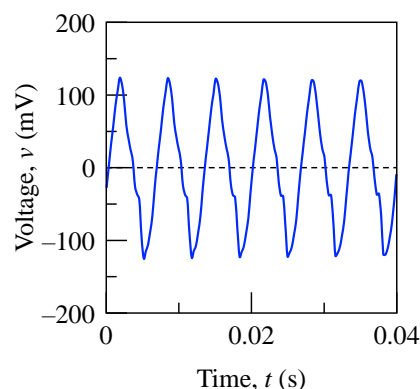


Fig. 1 Output voltage waveform obtained by using an Fe₆₀Co₄₀ thick film.

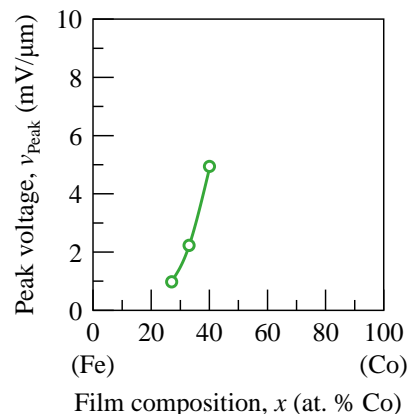


Fig. 2 Compositional dependence of peak voltage.

方向性電磁鋼板の振動発電特性に及ぼす大型化の効果

岡田 拓^{*}、藤枝 俊^{*}、鈴木 茂^{**}、清野智史^{*}、中川 貴^{*}

(*阪大 工学研究科、**東北大 マイクロシステム融合研究開発センター)

Effect of device size on vibration power generation property of grain-oriented electrical steel

T. Okada^{*}, S. Fujieda^{*}, S. Suzuki^{**}, S. Seino^{*}, T. Nakagawa^{*}

(*Graduate School of Engineering, Osaka Univ., **μSIC, Tohoku Univ.)

はじめに

逆磁歪効果（応力印加による磁気特性の変化）を利用した振動発電は、IoT デバイスの次世代電力源として注目されている¹⁾。発電出力向上の一つの手段としてデバイスサイズの大型化が有効であるが²⁾、有望材料である Fe-Ga 合金単結晶の大型化技術は研究開発の段階である。このような状況で、Fe-Si 合金単結晶および方向性電磁鋼板と呼ばれる圧延方向に<100>配向した Fe-Si 合金多結晶においても良好な振動発電特性が報告された^{3,4)}。本研究では、方向性電磁鋼板を搭載した振動発電デバイスの発電特性に及ぼす大型化の効果を調べた。

実験方法

方向性電磁鋼板を圧延方向(RD : rolling direction)に対して平行に長く切り出すことで、試料を得た。この試料を鉄製の U 字フレームに貼り付け、空芯コイルと永久磁石を取り付けることでユニモルフ U 字型デバイスを構成した。これらのデバイスを強制振動させ、発電特性を評価した。

実験結果

Fig. 1 (a)に示すように、 $16 \times 4 \times 0.35 \text{ mm}^3$ の試料、 $32 \times 8 \times 0.35 \text{ mm}^3$ の試料 2 枚重ね、および $64 \times 16 \times 0.35 \text{ mm}^3$ の試料 4 枚重ねを用い、全長 40 mm のデバイス(40mmRD)、全長 80 mm のデバイス (80mmRD) および全長 160mm のデバイス (160mmRD) を作製した。これらのデバイスを加振機で周波数 f が 100 Hz となるように振動させた。また、デバイスの大型化に合わせて 40mmRD、80mmRD、および 160mmRD の先端変位の振幅 Δd はそれぞれ 2.0 mm、4.0 mm および 8.0 mm に調整した。コイルに接続した負荷抵抗 R にかかる電圧から求めた平均電力 P_{ave} を Fig. 1 (b)に示す。40mmRD の P_{ave} は最大値で 0.28 mW を示した。デバイスの大型化に伴い P_{ave} は増加し、160mmRD の P_{ave} は 36.7 mW の最大値を示した。つまり、デバイスの寸法を 4 倍（体積は 64 倍）にすることで、 P_{ave} は約 131 倍となった。よって、方向性電磁鋼板において大型化の効果は顕著であり、高出力な大型デバイスへの応用が期待できる。

参考文献

- 1) T. Ueno *et al.*, IEEE Trans. Magn., **47** (2011) 2407.
- 2) 上野敏幸, 日本金属学会会報 あたりあ **59** (2020) 6.
- 3) F. Osanai *et al.*, Proc. 24th Soft Mag. Mater. Conf., (2019) P-071.
- 4) T. Okada *et al.*, Mater. Trans., **62** (2021) 1798.

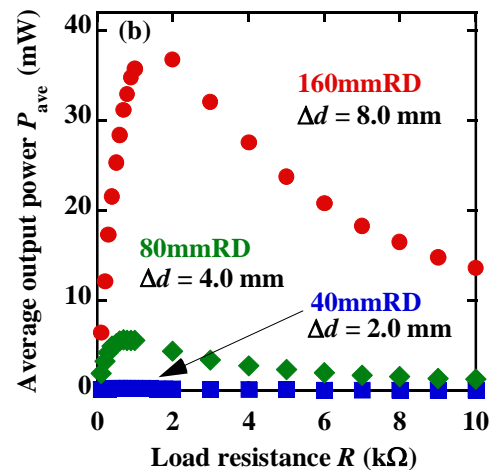
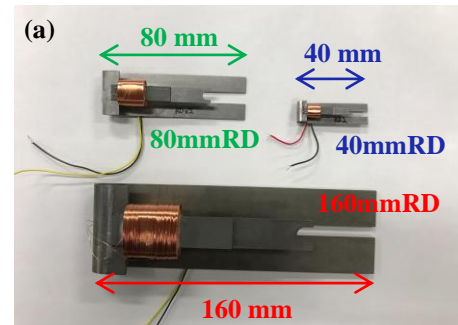


Fig. 1 (a) Picture of vibration power generation devices using grain-oriented electrical steel. (b) Relationship between average output power P_{ave} and load resistance R .

Cu_xCo_{1-x}Fe₂O₄ の磁歪特性と結晶構造の関係

藤枝 俊、久松美佑、小杉静花、清野智史、中川 貴
(阪大 工学研究科)

Relation between magnetostrictive properties and crystal structure of Cu_xCo_{1-x}Fe₂O₄

S. Fujieda, M. Hisamatsu, S. Kosugi, S. Seino, T. Nakagawa
(Graduate School of Engineering, Osaka Univ.)

はじめに

立方晶スピネル構造のCoFe₂O₄系フェライトは、室温において比較的大きな磁歪を示す。例えば、Co_{0.8}Fe_{2.2}O₄の室温における<100>方向の磁歪定数は-590 ppmであり、この絶対値はFe₃O₄の値よりも約30倍も大きい¹⁾。CoFe₂O₄系フェライトの磁歪材料への応用に向けて、磁歪特性を向上させる有効な部分置換元素が求められている。立方晶スピネル構造のFe₂TiO₄は142 K以下で協力的Jahn-Teller効果により正方晶に相転移し、77 Kにおいて<100>方向の磁歪定数が4700 ppm程度の巨大磁歪を示すことが報告されている²⁾。そこで、スピネル構造を構成する6つの酸素で囲まれた八面体の中心、すなわち八面体サイトをCu²⁺が占有するとJahn-Teller効果が生じることに着目し、本研究ではCoをCuで部分置換したCu_xCo_{1-x}Fe₂O₄の磁歪特性と結晶構造の関係を調べた。

実験方法

CoO、Cu₂Oおよびα-Fe₂O₃を出発原料として用い、それらを混合してペレット化した後、大気中において950 °Cで10時間の熱処理を施してCu_xCo_{1-x}Fe₂O₄試料を作製した。X線回折測定により結晶構造を調べた。また、磁歪特性の評価には、歪みゲージを用いた。

実験結果

室温においてCu_xCo_{1-x}Fe₂O₄試料は、 $x \leq 0.7$ では立方晶構造を示し、 $x \geq 0.8$ では協力的Jahn-Teller効果により正方晶構造を示した³⁾。そこで、立方晶構造の $x = 0.5$ および正方晶構造の $x = 0.8$ の歪み $\Delta L/L$ の磁場依存性をFig. 1に示す。歪みの測定方向に対し、平行および垂直方向に磁場を印加した。正方晶構造の $x = 0.8$ の $\Delta L/L$ は平行磁場印加($H_{//}$)により減少し、垂直磁場印加(H_{\perp})により増加する。つまり、比較のために示した $x = 0.0$ (CoFe₂O₄)と同様に、 $x = 0.8$ において負の磁歪が生じる。 $x = 0.8$ の最大印加磁場における $H_{//}$ および H_{\perp} の $\Delta L/L$ の絶対値は、 $x = 0.0$ の値よりも小さい。ここで注目すべき点は、立方晶構造の $x = 0.5$ も負の磁歪を示すが、最大印加磁場における $H_{//}$ および H_{\perp} の $\Delta L/L$ の絶対値は、 $x = 0.0$ の値よりも大きいことである。つまり、立方晶構造が安定な組成領域においてCoFe₂O₄の磁歪特性はCoのCu部分置換により向上することが明らかになった。

参考文献

- 1) R. M. Bozorth et al., Phys. Rev., **99** (1955) 1788.
- 2) Y. Ishikawa et al., Phys. Rev. Lett., **26** (1971) 1335.
- 3) M. Hisamatsu et al., IEEE Trans. Magn., **57** (2021) 2100804.

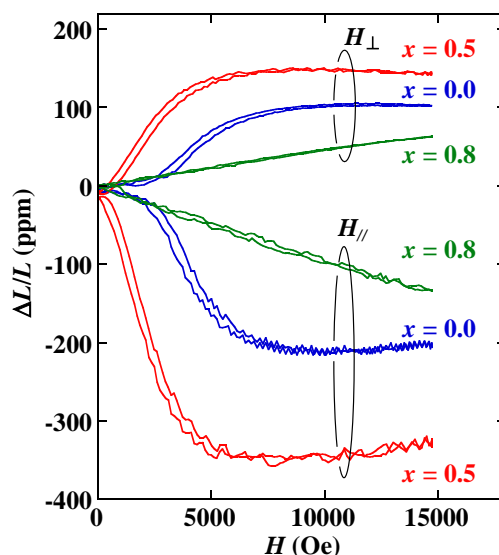


Fig. 1 Magnetic field dependence of strain $\Delta L/L$ of Cu_xCo_{1-x}Fe₂O₄ with $x = 0.0, 0.5$ and 0.8 .