

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 19 日現在

機関番号：11101

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2016

課題番号：26870030

研究課題名(和文)電歪・磁歪型マルチフェロイック素子の性能を実用段階まで引き上げるための検証

研究課題名(英文)Verification for boosting performance of electro-magnetostrictive multiferroic device to practical stage

研究代表者

久保田 健(Kubota, Takeshi)

弘前大学・北日本新エネルギー研究所・准教授

研究者番号：70400405

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：誘電-磁歪型マルチフェロイック素子の無給電磁界センサ/振動磁界エネルギーハーベスタとしての出力特性を引き上げることを目的に、磁歪層の磁歪増加と肉厚化、ならびにデバイスとしての構成最適化研究を行った。

磁界応答性が良く、比較的高い磁歪、高いアモルファス形成能を有する鉄系アモルファス合金Fe-Si-B-Pを磁歪層として選択し、アモルファス単相からなる170 μ m厚の長尺薄帯の作製に成功、磁歪層の肉厚化で素子の出力が増加することを確認した。また、磁歪層を熱処理することで表面近傍だけ部分結晶化させた際、素子動作方向の磁歪量が増加することを利用して、素子の出力向上を確認した。

研究成果の概要(英文)：Enhancement of the magnetostriction and thickening for the magnetostrictive layer and structural optimization as a stacked device have been investigated with a purpose of the boosting generation output of the electro-magnetostrictive multiferroic device as passive-typed electromagnetic field sensor / magnetic field energy-harvester operating.

An Fe-Si-B-P amorphous alloy with a combination of good permeability, relatively high magnetostriction and high glass-forming ability was adopted for magnetostrictive layer. As the results, the critical thickness of the long melt-spun ribbon with single amorphous phase was reached 170 μ m, and generation output of the device improved with increase the thickness of the ribbon i.e. magnetostrictive layer was confirmed. Additionally leveraging in-plane magnetostriction increase of the annealed ribbon in consequence of partially crystallization only near the surface of the ribbon, enhancement of the output generation of the device has been confirmed.

研究分野：非平衡相軟磁性材料の創製とそれを用いた電磁デバイスの開発

キーワード：マルチフェロイック素子 磁歪 アモルファス合金 発電

1. 研究開始当初の背景

(1)マルチフェロイクス技術は機能素材の複合による多機能化、または新規に発現する機能によってエネルギー変換を行う技術で、既存の機能材料単体では不可能な装置並みの仕事を素子のみで達成できるため、単純構造・小型軽量・省資源等の観点から次世代材料として高い優位性を持つ。このため、高感度磁気センサや電力源(エネルギー・ハーベスタ)を製品出口として見据えた研究が国内外で活発に行われており、電力変換施設の安全管理用(漏洩磁界によるトランス状態の無給電モニタリング)や、アメリカではMEMS技術を用いた超小型の発電用(軍用途)等が提案されている。

(2)これら素子の感度や発電効率は「電歪材料の性能を如何にして引き出すか」に強く依存し、A:高性能な磁歪材料(や電歪材料)を用いる、B:共振モードで利得を稼ぐ、C:材料界面の接合度の向上(改善)の3項となる。

①Aについては、Fe-Co-V ($70\sim 90\times 10^{-6}$)、Fe-Ga (Galfenol: $140\sim 200\times 10^{-6}$)やTb-Dy-Fe (Terfenol-D: $\sim 2000\times 10^{-6}$)などの大磁歪材料、高磁歪感受率の観点からFe-Si-BやFe-Co-Si-B等のFe系アモルファス合金薄帯($20\sim 30\times 10^{-6}$)が用いられるが、低磁歪感度と応答性の観点から実用化には後者が適している。しかしながら、アモルファス薄帯は 10^6K/s 級の超急冷法でのみ製造されるものであって、 $40\mu\text{m}$ 厚とするのが限界である(市販品は $25\mu\text{m}$ 厚)。この厚み制約によって、 10Oe 以下の磁界で充分動作する材料ながらもアクチュエートすべき電歪材料(例えばPZT $\sim 260\mu\text{m}$ 厚)を効果的に動作させるだけ機械力が取り出せず、素子としての性能は極めて低下する。(図1のスパッタ材、2, 8.5, $10\mu\text{m}$ の差)他方、結晶系でバルク化できる大磁歪材料では、機械力は充分ながら動作に要する磁界として 200Oe (16kA/m)以上が必要であって強大すぎる。

②Bについては、構造的問題であって、特定の周波数であればそこそこの性能を示すが、共振周波数以外での出力は極めて低く、5分の1以下に低下する。また、共振点はデバイスのアスペクト比にしか設計自由度が無いいため、汎用性を求めた場合の設計方針は逆であって、非共振点での性能を高め、これについて議論するべきである。

③Cについては、変形という機械力を材料間で如何に効果的に伝達するかであって、現在は2種の方法がとられる。MEMS系小型デバイスであればスパッタ法による磁歪層または電歪層の積層を行うため、その材料間の高い結合強度が担保される反面、大型品には適用困難である。大型品においてはセラミクスと金属間の異相接合技術が極めて高度・高価であるため、エポキシ系やシアノアクリレート系接着剤が常用される。

ただし、接着層の厚みや均一塗布の管理に難があること、および樹脂系接着剤はヤング率($2\sim 5\text{GPa}$)が金属やセラミクスの値より極めて小さく、この接着層が緩衝帯となることから、機械的結合強度としては致命的な問題を抱える。

(3)我々のグループでは、磁歪・電歪マルチフェロイック素子を磁界センサや磁界発電素子としてデバイス化するにあたり、電歪材料をPZTに固定し、磁歪材料を種々変更した研究を行い、さらには積層方法についてもスパッタと接着剤の2法を検証してきた。得られた成果の一つ、接着剤によるFe-Pd/PZT/Fe-Pdの3層積層素子のエネルギー・ハーベスタについては、世界最高値と肩を並べる(図1のribbon- $30\mu\text{m}$ のデータ)。しかしながら非共振周波数における生成電力はどちらの素子についても $100\mu\text{W}/\text{cm}^2$ 以下である。また、同種のデバイスではミリワット級の発電能力を有する素子は報告が無く、既存概念から脱却する必要性を痛感した。

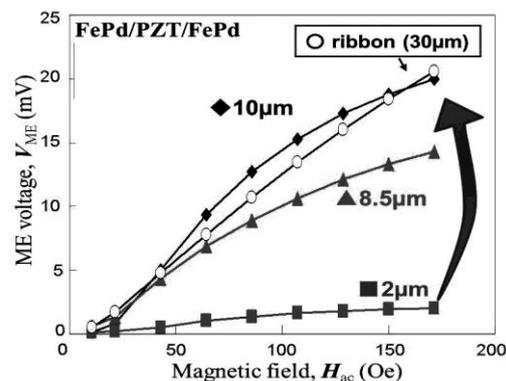


図1. Fe-Pd/PZT/Fe-Pd 複合素子における発生電圧の磁歪層厚み依存性と接合種別の影響

2. 研究の目的

(1)本研究は電歪材料が磁歪材料から感受する機械変形力を飛躍的に高めるための研究である。このため、磁歪の磁場応答性の高い鉄基アモルファス合金を磁歪層とし、その肉厚化、組織最適化、さらには素子の最適化を目指した。

3. 研究の方法

(1)試料の作製

① $\text{Fe}_{76}\text{Si}_9\text{B}_{10}\text{P}_5$ (at%) 母合金は Fe (99.9wt%)、Si (99.99wt%)、B (99.5wt%) および Fe_3P (99wt%) を原料にアーク溶解法にて作製し、これを大気中液体急冷法に供することで厚みの異なる薄帯材 (t: $21\sim 208\mu\text{m}$) を得た。

②熱処理は真空中、結晶化温度 (550°C) 近傍を含めた $300\sim 560^\circ\text{C}$ にて2時間保持後、炉冷した。

③複合素子は、誘電体 PZT (Fuji Ceramics 製、C-3 および C-62, t: $260\mu\text{m}$) 板材の両面に

Fe₇₆Si₉B₁₀P₅ 磁歪薄帯を1枚ずつ貼り付けた3層構造素子、または2枚ずつ貼り付けた5層構造素子として作製した。

(2) 磁歪材料の物性評価

①薄帯材の初期構造について、相の同定はX線回折法による確認と、示差走査熱量計(DSC)での結晶化時ピーク波形の形状および発熱量からアモルファス単相と決定し、同時に熱処理温度の選定を行った。また、一部の磁歪試料については必要に応じて透過型電子顕微鏡で組織観察を行った。

②薄帯試料の磁歪は2軸直交歪ゲージを薄帯の両面に貼り付けたものを測定用試料とし、振動試料型磁力計のマグネットを用いて磁場を印可しながら測定した。なお本稿で示される飽和磁歪は、歪ゲージに対して平行な磁界を印可した場合のデータを示している。

③素子の出力特性評価には、ファンクション・ジェネレータ、バイポーラ・アンプ、ロックイン・アンプ、オシロスコープおよびソレノイドコイルで構築した自作システムを用い、素子は直流重畳磁界下にて、任意の周波数と強度をもった正弦波交流磁界で励磁し、その際に得られた出力信号から開放電圧を算出した。次いで素子に負荷抵抗を接続した際の電圧変化から生成電力を見積もった。

④接着層の材質影響評価は、金属系では種々のハンダおよびUアロイ、樹脂系ではエポキシ系接着剤を使用し、素子の共振周波数における発生電圧挙動から評価した。

4. 研究成果

(1) 肉厚なアモルファス合金磁歪層の作製

①Fe₇₆Si₉B₁₀P₅アモルファス合金は高飽和磁束密度と高磁歪、さらに低保磁力と高透磁率を兼ね備えた軟磁性合金材料である一方、従前の急冷アモルファス合金(Fe-Si-BやFe-Co-Si-B等)と比してアモルファス形成能は顕著に高い。肉厚化は薄帯作製時に使用する液体急冷装置の溶湯噴射ノズルの吹出圧力ならびに回転凝固ロールの周速度の制御により行った。

②図2に示した作製薄帯における厚み別のX線回折、ならびに最も厚い薄帯(171μm)における高分解電子顕微鏡像と制限視野回折図形のように、本研究で選択したFe₇₆Si₉B₁₀P₅アモルファス合金は、銅単ロール液体急冷法を用いた場合、約170μm程度の厚みまではアモルファス単相構造を形成できることがわかった。

③なお、肉厚な長尺連続薄帯を製造する場合、ロール径は大きい方が好ましく、直径200mmのロールでは厚み120μm程度であって、上述のデータは直径300mmのロールを使用した結果である。実験室規模の装置ではこれが限界といえ、工業的により大径のロールを使用した場合、その臨界厚みは向上するものと予想される。

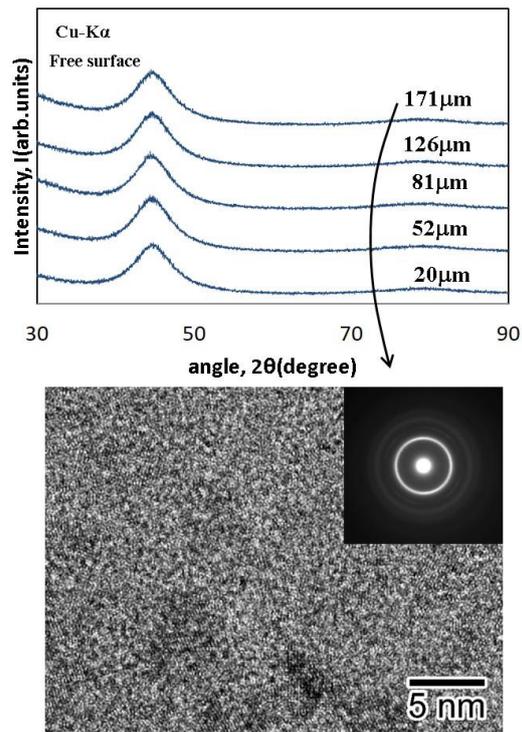


図2 種々の肉厚で作製したFe₇₆Si₉B₁₀P₅合金急冷薄帯におけるX線回折図形(上)と厚み171μm薄帯のTEM像。

(2) 肉厚化が素子の出力に及ぼす影響

①図3はアモルファス単相のFe₇₆Si₉B₁₀P₅合金薄帯を急冷直後の状態で誘電体PZT板(C-62)と積層した素子における発生電圧を示す。素子の磁歪層が肉厚化されることで、出力電圧は増加することが見てとれる。

②ここで、磁歪層の厚みは基準材(20μm)に対して2.5倍(52μm)あるいは4倍(81μm)である。磁界エネルギー・ハーベスタとしてみれば、曲線下の積分値が総出力としての取れ高に相当するため、厚みの増加は出力の増加ときれいに比例する。

③しかしながら、磁界センサとしてみれば、特定バイアス下での発生電圧は高い方が高性能であって、またバイアスは低いことが

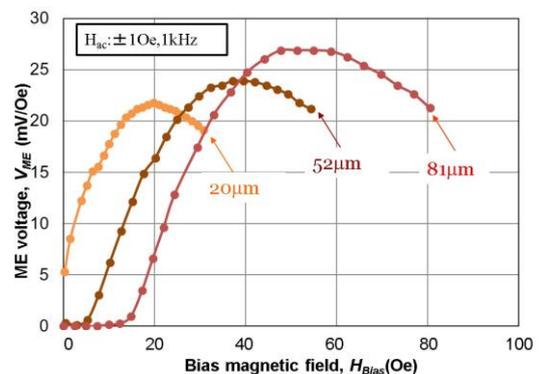


図3 種々の厚みのFe₇₆Si₉B₁₀P₅アモルファス薄帯(急冷材)を磁歪層として用いた複合素子における出力電圧の直流バイアス磁界依存性。

好ましい。この観点からいえば、肉厚化によって最適バイアス磁界は増大(劣化)し、発生電圧量は正の相関を示すものあまり増加しなかった。

④この原因については、肉厚化すると反磁界影響が大きくなるため透磁率は低下し、これが出力電圧の低下を招き、同時に生じている肉厚化(磁歪層の体積増加)による総出力の増加を一部相殺しているためと考えられる。

(3)熱処理軟磁性化による磁歪層の改質

①軟磁性アモルファス合金は、熱処理することで構造緩和が進行、あるいは急冷時の不均一な熱歪みが開放されることで軟磁気特性が向上する。そのため、軟磁性アモルファス合金はキュリー温度直下、または近傍で熱処理することが常識とされる。本研究過程においても、 $\text{Fe}_{76}\text{Si}_9\text{B}_{10}\text{P}_5$ アモルファス薄帯材の軟磁性化を目的に熱処理を実施した。

②その結果、アモルファス構造単相を維持する熱処理条件(例えば 500°C)では、複合素子(PZTはC-3)において、出力電圧の極大値をとるバイアス磁界が低下し、電圧自体も増加することが確認された(図4)。これは熱処理による軟磁性化効果であって、透磁率増加による磁歪の磁界応答性の向上によるものといえる。また、結晶材Fe-Pd合金を用いて作製した素子における最高データを合わせて示すが、最適バイアス磁界、発生電圧ともに高く、磁界センサとしてみれば性能は各段に向上したと言える。

(4)部分結晶化アモルファス合金の高磁歪

①一方、図4において高温熱処理材(520°C)が極めて高い出力電圧を示していることがわかる。この熱処理材はX線回折の結果から結晶相の生成が認められた。通常、アモルファス相に結晶相が析出すれば軟磁気特

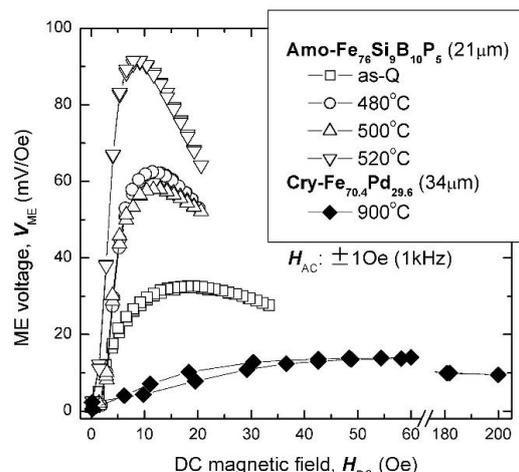


図4 熱処理 $\text{Fe}_{76}\text{Si}_9\text{B}_{10}\text{P}_5$ 合金薄帯を用いた素子における発生電圧のバイアス磁界依存性。(Fe-Pd結晶材を用いた素子の最適化データも参考用に示した)

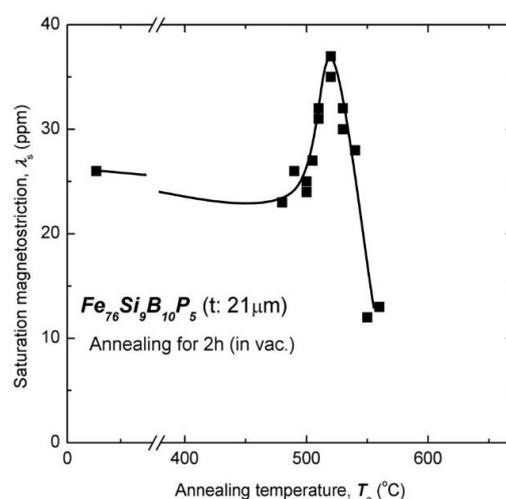


図5 $\text{Fe}_{76}\text{Si}_9\text{B}_{10}\text{P}_5$ 合金薄帯 ($t: 21\mu\text{m}$) における飽和磁歪量の熱処理温度依存性。

性は劣化するはずであって、当初の予想とは異なる結果が得られた。

②この現象を詳しく調査するため、熱処理温度別の飽和磁歪を評価した結果を図5に示す。まず、 $480\sim 500^\circ\text{C}$ はアモルファス単相であって、その飽和磁歪量は急冷直後の値(26×10^{-6})とほぼ同程度である。しかし、熱処理温度の増加に伴い結晶相の生成が起ると飽和磁歪は増加する。飽和磁歪量は 520°C で極大値の 37×10^{-6} を示し、結晶化が進行するそれ以上の高温熱処理では急激に低下して急冷直後の値を下回った。

③結晶相の析出初期において特異な高磁歪が発現する原因を調べるため、透過型電子顕微鏡観察を行った結果、高磁歪試料では表面近傍のみに結晶像が析出しており、内部のほとんど(少なくとも表面から $3\mu\text{m}$ 以深)はアモルファス単相を維持していることが確認された。一方、 520°C 以上の高温熱処理試料では、表面域における析出結晶相の分布量が増加しており、温度上昇と相まって内部にも結晶相の析出が認められた。

④これらの結果から、磁歪発生の主因子はアモルファス相であって、定量的結論に至っていないものの、表面近傍に特定量の結晶が分散析出した際に、素子動作方向への磁歪が増加することが分かった。

⑤薄帯材では本来、静磁エネルギー最小化の原理から面内方向を向いた磁区が優勢となる。しかし、結晶の析出に際しては体積収縮を伴うため、析出結晶粒の近傍では応力場が生じていると考えられる。本アモルファス相の磁歪は正であるため、磁区の向きと平行になる。表面近傍にのみ存在する応力によって、薄帯内部が面外方向に引っ張られると、形成磁区も面外に揃う。結果、素子動作方向である面内方向の磁歪伸縮量が見かけ上増加したと考えられる。

(5)肉厚化と部分結晶化効果の両立可能性

①項目(2)では磁歪層の肉厚化による発生電圧の増大、項目(4)では磁歪層($21\mu\text{m}$ 厚)

の部分結晶化による発生電圧の増大について論じたが、これらを両立できれば本研究にて開発する素子の性能はより高くなると期待されるため、追跡調査を実施した。

②図6には、種々の厚みの $\text{Fe}_{76}\text{Si}_9\text{B}_{10}\text{P}_5$ 合金アモルファス薄帯における飽和磁歪の熱処理温度依存性として、典型的な3つ (t : 21, 64, 121 μm) を示す。急冷直後の飽和磁歪は 26×10^{-6} 程度とすべての試料がほぼ同じ値であるが、結晶化の開始とともに増加、以後結晶化が進行するにつれて低下する傾向がみられる。極大値を示す熱処理温度は 520°C と変化はなく、これらの結果から、試料の厚みが異なっても初期の構造ならびに熱処理による構造の変化(結晶化)に差異はないと考えられる。その一方、飽和磁歪の極大値には明らかな厚み依存性が現れ、厚みが増加するに伴い飽和磁歪量は低下した。

③飽和磁歪が極大値を示すことは、磁歪薄帯の表面層近傍のみに収縮を伴って析出する結晶相の影響と考えられる。他方、厚みの増加で飽和磁歪量が低下することについては、熱分析の結果や低温側熱処理時の磁歪挙動から考えるに、試料表面層は結晶化するものの内部はアモルファス相が維持され、析出結晶による応力場効果の体積寄与率が低いと予想される。極大以降の飽和磁歪量の低下には若干の厚み依存性がみられるが、磁歪量の減少そのものは結晶相の体積分率の増加が原因であって、単純な体積分率効果と残存アモルファス相の発現可能な飽和磁歪量の2つのバランスによるものと考えられる。

④図7は種々の厚みの $\text{Fe}_{76}\text{Si}_9\text{B}_{10}\text{P}_5$ 合金薄帯を磁歪層とした三層構造素子(PZTはC-3)における出力電圧の重畳磁バイアス磁界依存性を示す。ここで、磁歪層はいずれも最大飽和磁歪を発現する熱処理を施した薄帯を用いている。図から、磁歪層の厚みによって出力電圧が顕著に変化する

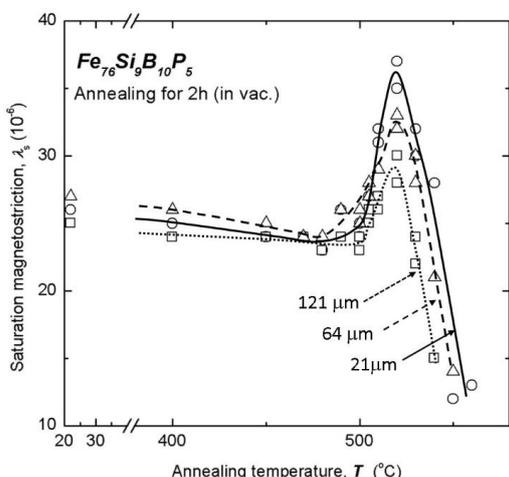


図6 種々の厚みの $\text{Fe}_{76}\text{Si}_9\text{B}_{10}\text{P}_5$ アモルファス薄帯における飽和磁歪量の熱処理温度依存性.

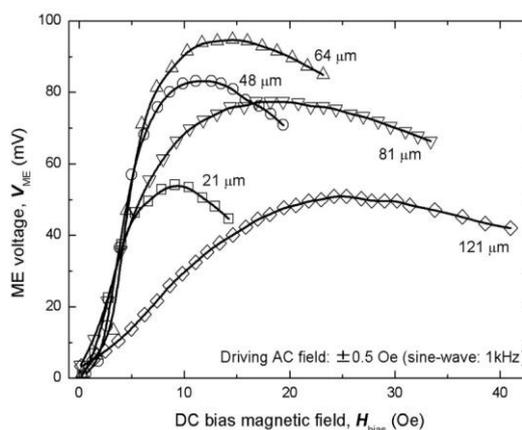


図7 種々の厚みの熱処理 $\text{Fe}_{76}\text{Si}_9\text{B}_{10}\text{P}_5$ 合金薄帯を用いた素子における発生電圧のバイアス磁界依存性.

こと、厚みの増加に応じて出力電圧の極大値をとる直流重畳磁界 (H_{bias}) は増加することがわかる。ここで、出力電圧値については、図4に示すデータと励起磁界幅が異なるが、21 μm 厚の磁歪層を用いた素子では駆動磁界0.5Oe下で53.6mV (107mV/Oe)を示し、図4に示す駆動磁界1.0Oe下で91.2mVの場合よりも最適なバイアス状態で動作できていると言える。出力電圧は肉厚化に伴って増加し、64 μm で190mV/Oeと約2倍にまで達した。その後、さらなる肉厚化では出力電圧は次第に減少する傾向を示し、121 μm では約100mV/Oeまで低下した。

⑤項目(2)に示す80 μm 厚までのアモルファス単相薄帯を磁歪層とした素子の実験では、肉厚化と出力電圧に単調な正相関がみられたのに対し、部分結晶化した磁歪層を用いた今回の実験では、64 μm 厚を極大とする傾向がみられており、これらの相違から出力電圧の大小を決定する要素に違いがあると予想される。磁歪層が発現する飽和磁歪(図6)は肉厚化するに伴い減少していることを踏まえて考えれば、磁歪層の部分結晶化による飽和磁歪量の増大効果(伸縮代の増加)、ならびに肉厚化効果(変形力の増加)のいずれもが出力電圧の増加に寄与するが、磁歪層に内部構造に依存した最適な厚みが存在するといえ、今回の場合ではそれが64 μm 厚であったといえる。なお、極大値が肉厚化によって高重畳磁界側へ遷移する現象については、磁歪層の反磁界効果と考える。

(6)研究まとめ

- ①本研究では、圧電-誘電複合素子の出力向上を目的に、磁歪層としてアモルファス合金を選択し、Fe-Pd結晶性磁歪合金を用いた三層複合素子との比較で、非共振域における出力電圧を50倍とすることを目指した。
- ②素子の性能を高める要素として、アモルファス磁歪層の肉厚化による磁界伸縮部の体積増加、ならびに部分結晶化効果による

素子動作方向の磁歪量増加を見出した。

③結果、開発素子の出力電圧は飛躍的に増大したが、研究に得られた三層素子の最高出力は従来素子と比して13倍程度、片側二層とした五層素子では17倍程度であって、実用化指標として設定した50倍には達するには、さらなるアイデアが必要といえる。

④本研究素子は接着剤や低融点合金を用いた接合で素子化される。接着層の材質・機械的性質によっても素子の性能が左右されることを見出しており、せん断応力が高いほど出力電圧が高くなる傾向を得ているが、断面占積率が70~80%程度となる急冷薄帯を磁歪層として用いており、接合においては主に薄帯の表面性状の影響を強く受けるため、確度のあるデータ獲得には達していない。これについては継続して取り組む。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 1 件)

- ①久保田 健, 木村 奈津子, 古屋 泰文, “磁歪/電歪複合型パッシブ磁界センサの高性能化にむけた非晶質系磁歪層の構造制御”(査読無), 第24回 MAGDA コンファレンス講演論文集, 101-104 頁 (2015).
<http://www.jsaem.gr.jp/magda2015/index.html>

〔学会発表〕(計 10 件)

- ①久保田 健, “材料開発から環境発電デバイス・システム開発へ磁性材料と電磁デバイスの開発”, NPO 法人 CAE 懇話会 東北ブロック第26回東北 CAE 懇話会, 2016年10月26日, 青森県産業技術センター弘前地域研究所(弘前).
- ②久保田 健, “磁性材料と電磁デバイスの開発”, 産官学金オープンイノベーションサロン(青森県商工労働部), 2016年9月1日, 弘前大学青森キャンパス(青森).
- ③久保田 健, 木村 奈津子, Ijlal Hasif, 古屋 泰文, “形状と構造の最適化によるアモルファス系磁歪薄帯を用いた磁界発電素子の高出力化”, 日本金属学会2016年春期大会, 2016年3月24日, 東京理科大学葛飾キャンパス(葛飾区).
- ④久保田 健, 木村 奈津子, 古屋 泰文, “FeSiPB/PZT/FeSiPB マルチフェロイック・コンポジットのエネルギーハーベスティング特性”, 第25回 MRS-J 年次大会, 2015年12月10日, 万博橋会議センター(横浜).
- ⑤久保田 健, 木村 奈津子, 古屋 泰文, 湯蓋 邦夫, “磁歪/電歪複層素子 FeSiBP/PZT の生成電圧におよぼす磁歪層の影響”, 第14回日本金属学会東北支部研究発表大会, 2015年12月5日, 弘前大学文京キャンパス(弘前).
- ⑥久保田 健, 木村 奈津子, 古屋 泰文, “磁歪/電歪複合型パッシブ磁界センサの高性能化にむけた非晶質系磁歪層の構造制御”, 第24回 MAGDA コンファレンス in Tohoku, 2015年10月12日, 東北大学流体科学研究

所(仙台).

- ⑦Takeshi Kubota, Shuta Fukuoka and Yasubumi Furuya, “Improvement of Generation Output in Multi-ferroic FeSiBP/PZT/FeSiBP Composite with Thick Magnetostrictive Layer”, IUMRS-ICAM2015, 2015年10月27日, 済州島(韓国).
- ⑧久保田 健, 木村 奈津子, 古屋 泰文, “アモルファス磁歪合金薄帯/PZT 積層型マルチフェロイック素子の高出力化にむけた磁歪層の組織制御”, 日本金属学会2015年秋期大会, 2015年9月18日, 九州大学糸伊都キャンパス(福岡).
- ⑨久保田 健, 福岡 修太, 古屋 泰文, “磁歪/圧電複合素子の出力電圧・電力におよぼす磁歪層の設計と特性”, 日本金属学会2015年春季講演大会, 2015年3月19日, 東京大学駒場Iキャンパス(目黒).
- ⑩福岡 修太, 木村 奈津子, 久保田 健, 古屋 泰文, “FeSiBP/PZT/FeSiBP 積層型 ME 磁気センサの磁歪層厚みと熱処理の効果”, 日本金属学会2014年秋季講演大会, 2014年9月25日, 名古屋大学東山キャンパス(名古屋).

〔その他〕

ホームページ等

- ①弘前大学北日本新エネルギー研究所ホームページ-情報公開(年報、リーフレット)
<http://njrise.cc.hirosaki-u.ac.jp/contents/information-disclosure>
- ②久保田 健, 木村 奈津子, “部分結晶化させた Fe 系アモルファス合金の高磁歪化とそれを用いた発電デバイス”, 東北大学金属材料研究所共同利用研究平成26年度研究部共同研究報告書, 117-118 頁(2015).
<http://www.imr.tohoku.ac.jp/media/files/research/reports/rep2015/3-6.pdf>

6. 研究組織

(1)研究代表者

久保田 健 (KUBOTA, Takeshi)
弘前大学・北日本新エネルギー研究所・准教授
研究者番号: 70400405

(4)研究協力者

古屋 泰文 (FURUYA, Yasubumi)
湯蓋 邦夫 (YUBUTA, Kunio)
木村 奈津子 (KIMURA, Natsuko)
福岡 修太 (FUKUOKA, Shuta)
イジュラル ハシフ (IJLAL, Hasif)