

文部科学大臣賞

スピン流を用いた
エネルギーハーベスティング技術の開発

東北大学大学院 理学研究科 物理学専攻(金属材料研究所齊藤研究室)
博士課程 3年

内田 健一

1 緒言 —スピンゼーベック効果と絶縁体を用いた熱電発電—

熱や振動—それらはあらゆる場所に存在する身近なエネルギー源である。身の回りにありふれたエネルギー源を利用した新しいエネルギー変換原理の創出は、持続可能な社会に向けた環境・エネルギー問題への取り組みが活性化している現代科学技術における最重要課題の一つである。近年、地産地消のエネルギー社会を実現するためのエネルギーハーベスティング技術¹の候補として、熱電効果(ゼーベック効果²)や圧電効果³を用いた発電技術が盛んに研究されているが、その応用範囲は限定されているのが現状である。

一方で、電子が有する電荷の自由度に加えてスピン角運動量⁴の自由度も積極的に利用する新しい電子技術「スピントロニクス」がにわかに注目を集めている。従来のエレクトロニクスが電流と電圧の制御に基づいて体系化されたように、スピントロニクス技術の発展にはスピン流(スピン角運動量の流れ)とスピン圧(非平衡スピン流の駆動力)の生成・検出・制御技術の拡充が必須であり、これには全く新しい物理概念・現象の開拓と理解が必要であることが近年の諸研究によって明らかになった(図1)。新しいスピン圧生成法の開拓が盛んに行われている中、2008年に我々は磁性体に温度差を付けることによりスピン圧が生じる「スピン版のゼーベック効果」を世界に先駆けて発見した(図2(b)) [1-24]。伝導電子によって駆動される従来のゼーベック効果は導電体でのみ生じる現象であるため、同様にスピンゼーベック効果も金属や半導体でのみ生じる現象であると信じられてきたが、2010年に我々はスピンゼーベック効果が磁性絶縁体においても発現することを見出した(図2(c)) [10,12]。スピンゼーベック効果によって生成されたスピン流は、磁性体に金属薄膜を取り付けるだけで電圧に変換できるため(2.1節参照)、この効果を利用することによって従来は不可能だった「絶縁体を用いた熱電発電」を実現できる。以下で明らかにするように、スピンゼーベック効果を用いた熱電発電はゼーベック効果や既存のスピントロニクス現象とは全く異なる物理原理によって駆動されるものであり、エネルギーハーベスティングに適した様々な特性を示す。

本研究の目的は、スピンゼーベック効果が有する新奇な性質を利用することで、スピン流によって機能する新しいエネルギーハーベスティング技術の基本技術・原理を構築することである。本論文では、まず磁性絶縁体におけるスピンゼーベック効果の検出実験及びその発現機構について述べ、次いでスピンゼーベック効果が温度勾配のみならず音波(振動)注入に

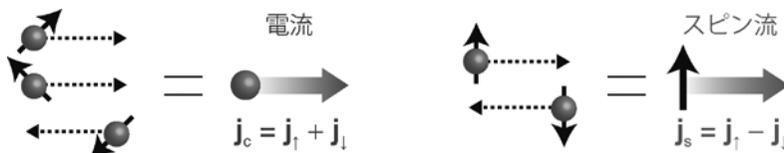


図1 電流 j_c 及びスピン流 j_s の模式図. $j_{\uparrow(\downarrow)}$ はアップスピン(ダウンスピン)を持つ電子の流れを表す. j_{\uparrow} と j_{\downarrow} が異なる量流れている際に生じる正味のスピン角運動量の流れがスピン流である。アップスピン電子とダウンスピン電子が互いに同量、逆向きに運動している場合 ($j_{\uparrow} = -j_{\downarrow}$) は正味の電荷の流れが打ち消され、電流を伴わない純粋なスピン角運動量の流れ“純スピン流”が生じる。本論文において単にスピン流と書いた場合は、純スピン流を指すものとする。

1 熱や振動、光、電磁波等、身の回りにありふれた小さなエネルギーを“収穫”して利用する技術。
 2 温度差を付けた金属や半導体の両端に電圧が生じる現象(図2(a))。1800年代前半にドイツの物理学者(兼医師)の Thomas Johann Seebeck によって発見された。
 3 物質に圧力を加えると圧力に比例した分極(表面電荷)が現れる現象と電界印加により物質が変形する現象の総称。
 4 電子が有する自転のような性質。スピンは磁石の磁場の発生源であり、スピンの状態にはアップ/ダウンの2つがある。

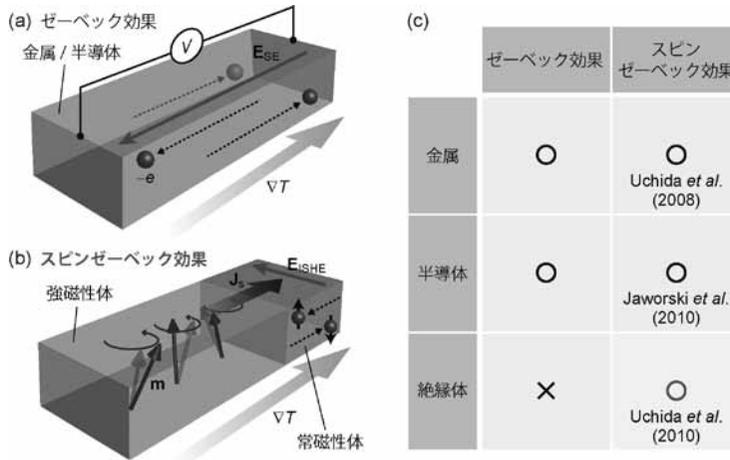


図2 図2 (a), (b) ゼーベック効果とスピンゼーベック効果の概念図. $-e$, ∇T , E_{SE} , E_{ISHE} , m , J_s はそれぞれ電子電荷, 温度勾配, ゼーベック効果 (逆スピンホール効果) によって生成された電場ベクトル, 磁化モーメント, スピン流の空間成分を表す. ゼーベック効果が伝導電子の運動によって生じるのに対し, スピンゼーベック効果は多数の磁気モーメント (局在スピン) の集団運動によって生じる [7,10,13,15]. (c) ゼーベック効果とスピンゼーベック効果が生じる物質群. ゼーベック効果は導電体中にしか存在しないが, 局在スピンは磁性絶縁体中にも存在するため, スピンゼーベック効果は絶縁体中でも発現し得る.

よっても励起可能であることを実験的に示す. さらに本研究では, 温度勾配や音波注入を経由したスピン流発電を, エネルギーハーベスティングに最適な全薄膜構造においても実現した. 最後に, スピン流を用いたエネルギーハーベスティング技術の利点や更なる高効率化・実用化への指針について議論し, まとめとしたい.

2 実験方法・結果

2.1 スピン流熱電変換素子の試料構造と起電力生成メカニズム

以下に, スピンゼーベック効果の基本的メカニズムの概略を示す. 磁性絶縁体/(常磁性)金属薄膜複合構造において磁性絶縁体層に温度勾配を付けた状況を考える. スピンゼーベック効果が発現すれば, 絶縁体層に生じたスピン圧によって金属薄膜中にスピン流が誘起される. このスピン流の起源は, 磁性絶縁体中の局在スピン (マグノン⁵) 系と金属薄膜中の伝導電子系との間に誘起される熱的非平衡性である. 絶縁体層に温度勾配が付いていない場合は, 磁性絶縁体中のマグノン系と金属薄膜中の伝導電子系は熱平衡にあり, 等しい有効温度⁶を有している [7,10,15]. 一方, 絶縁体層に温度勾配を付けると, マグノン有効温度と電子有効温度との間に差が生じる. 磁性絶縁体中の局在スピンと金属薄膜中の伝導電子スピンは界面交換相互作用を介して結合しているため [25], それぞれの有効温度に差が生じると絶縁体/金属界面近傍に有限のスピン流が誘起されるのである. 金属薄膜に注入されたスピン流は,

5 強磁性体において局在スピンの歳差運動の位相のずれによって生じる集団励起モードはスピン波と呼ばれる. スピン波を準粒子として記述したものがマグノンである.

6 非平衡状態において粒子 (電子, フォノン, マグノン等) の分布関数は一般に熱平衡下の関数形からずれるが, そのずれの度合いを“温度”として1つのパラメータに繰り込んだもの.

逆スピンホール効果[26,27]と呼ばれる量子相対論効果によって起電力に変換される。

ここで登場した逆スピンホール効果という現象は、その名の通りスピンホール効果の逆効果である。スピンホール効果とは、試料に電流を流した際に電子スピンの偏極方向と電流の両方に直交する方向にスピン流が生成されるという現象であり、スピン軌道相互作用⁷によりアップスピン電子とダウンスピン電子がそれぞれ逆向きに曲げられることによって生じる。すなわち、Pt等のように強いスピン軌道相互作用を有する金属において電流は効率良くスピン流に変換される。このスピンホール効果の逆過程、すなわち物質中のスピン流が電流に変換される現象が逆スピンホール効果である(図3(a))。スピン軌道相互作用の性質により、電子スピンの偏極方向を σ 、スピン流が流れる方向を J_s とすると、逆スピンホール効果によって電流 J_c が

$$J_c \propto J_s \times \sigma \quad (1)$$

を満たす方向に生成される。このような特徴を有する逆スピンホール効果を用いることで、シンプルな磁性絶縁体/常磁性金属二層構造から成る熱電変換素子を構成できる(図3(b))。この素子構造の接合界面の法線方向に温度勾配を付けると、金属薄膜に(温度勾配に沿った方向に)スピン流が注入される(図3(c))。(1)式中の σ は磁性絶縁体の磁化と平行であるため、絶縁体層の磁化と温度勾配の両方に直交した方向に逆スピンホール効果によって起電力が生じるのである。

2.2 絶縁体/金属複合構造におけるスピンゼーベック効果の観測

本節では、イットリウム鉄ガーネット($Y_3Fe_5O_{12}$: YIG)平板/Pt 薄膜複合構造試料における熱起電力の測定結果を報告する。YIGはガーネット構造を有するフェリ磁性のモット絶縁体であり、磁気損失や結晶磁気異方性が非常に小さいといった特徴を有する。長さ6 mm、幅2 mm、厚さ1 mmの直方体状の単結晶YIG平板の $6 \times 2 \text{ mm}^2$ 面を鏡面研磨し、研磨面に長さ6 mm、幅0.5 mm、厚さ15 nmのPt薄膜をスパッタリング法により成膜した。このような試料を温度差を付けた2つの銅ブロックで上下から挟み込むことで、YIG平板の厚さ方向(YIG/Pt界面の法線方向)に温度勾配を付けた。逆スピンホール効果の対称性((1)式、図3(c))を満たす熱起電力を観測するために、磁場を研磨面内方向に印加しながら、Pt層の両端に発生した起電力を室温下において測定した。

単結晶YIG平板/Pt薄膜試料を用いて観測した起電力(V)の温度差(ΔT)依存性を図4(a)に示した[12]。磁場を図4(a)の挿絵中の x 方向($\theta = 90^\circ$ 方向)に印加した場合に、温度差に比

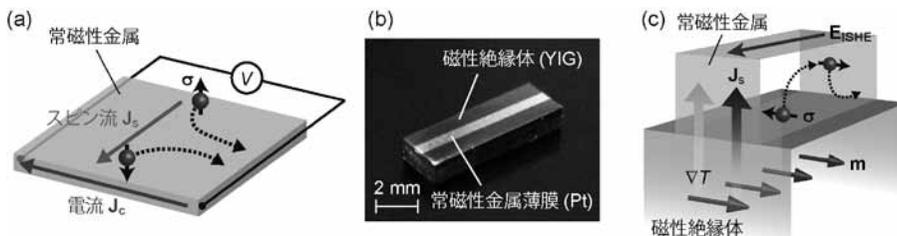


図3 (a) 逆スピンホール効果の模式図. (b) 磁性絶縁体(YIG)/常磁性金属(Pt)複合構造試料の写真. (c) スピンゼーベック効果による熱電発電メカニズム.

⁷ 電子のスピン角運動量と軌道角運動量との相互作用。スピン軌道相互作用により、スピンの流れを横向きに曲げる力が働く。

例した起電力がPt層に発生していることがわかる。また、温度勾配方向を反転させると出力起電力の符号も反転した。図4(b)は起電力の磁場(H)依存性であり、熱起電力の符号はYIG層の磁化反転によっても反転した。一方、磁場を y 方向($\theta = 0$ 方向)に印加した場合には有意な起電力信号は生じなかった(図4(a))。これらの起電力の振る舞いは、スピントラップ効果によって誘起された逆スピントラップ効果の対称性と完全に整合している。YIGは絶縁体であるので、電気伝導性に起因する外因的な信号が重畳している可能性もない。ゆえに、ここで観測された信号は純粋にスピントラップ効果に由来するものであり、絶縁体中を流れる熱流によって誘起された起電力を観測することに成功したと言える。

以上の実験によりスピントラップを用いた熱電発電を実証できたが、絶縁体層には単結晶を用いていたため、コスト面で問題があった。そこで次に、焼結体の多結晶絶縁体を用いてスピントラップ効果の測定を行った。多結晶絶縁体としては、YIGのYサイトの一部をAlで置換した4種類のフェリ磁性絶縁体($\text{Y,Al}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ (Al:YIG))を用いた。これらの試料はそれぞれ異なる飽和磁化を有する。各絶縁体の形状及びPt層のサイズ・膜厚は、単結晶試料と揃えた。図4(c)は各試料において測定した起電力の磁場依存性であり、すべての試料において明瞭なスピントラップ効果による熱起電力信号を観測することができた。図4(c)の挿入図は各Al:YIG平板/Pt薄膜試料で観測された(単位温度差当たりの)熱起電力強度の飽和磁化($4\pi M_s$)依存性である。熱起電力強度は飽和磁化に強く依存しており、 $4\pi M_s$ の増加に対して単調増加していることがわかる。今後の研究により更なる系統的な物質依存性測定を行う必要があるが、本実験によって飽和磁化が大きい絶縁体ほどスピントラップ起電力が増加する傾向にあるという、熱電変換能の向上に対する1つの指針が得られた。

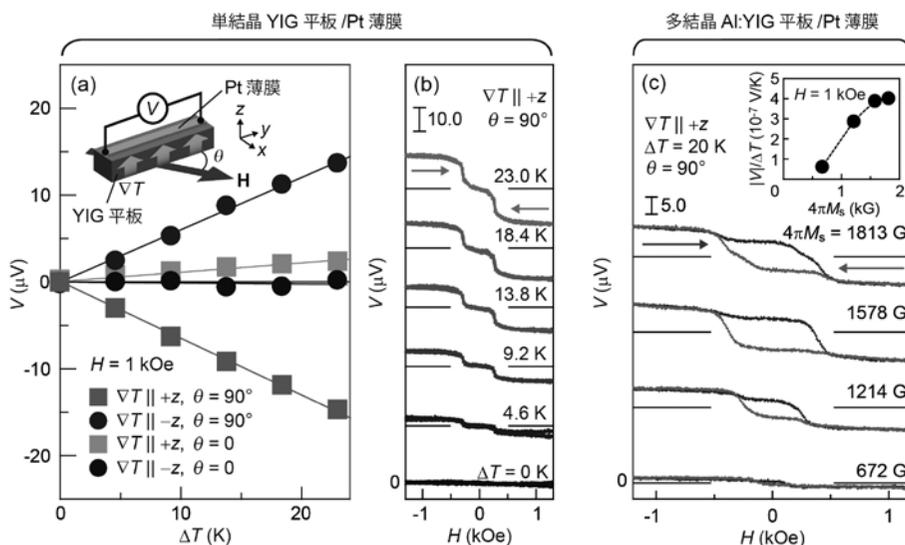


図4 (a) 単結晶YIG平板/Pt薄膜試料における起電力 V の温度差 ΔT 依存性。温度勾配 ∇T を $+z$ 方向(上面が高温側)、 $-z$ 方向(下面が高温側)に付けた場合の測定結果をそれぞれプロットした。また、磁場を逆スピントラップ効果の対称性を満たす方向($\theta = 90^\circ$)、及びそれと直交する方向($\theta = 0$)に印加した場合の結果を比較した。(b) 起電力の磁場 H 依存性($\nabla T \parallel +z, \theta = 90^\circ$ の場合)。(c) 飽和磁化($4\pi M_s$)が異なる4種類の多結晶Al:YIG平板/Pt薄膜試料における起電力の磁場依存性($\nabla T \parallel +z, \Delta T = 20 \text{ K}, \theta = 90^\circ$ の場合)。(c)の挿入図は単位温度差当たりの熱起電力強度 $|V|/\Delta T$ の飽和磁化依存性である。

2.3 音波注入によるスピン流熱電変換

2.2節に示した実験によって、磁性絶縁体/常磁性金属複合構造に温度勾配を付けることによりマグノン系と伝導電子系間の有効温度差が誘起され、常磁性金属層にスピン流を生成できることが明らかになった。本節では、温度勾配を付ける代わりに、磁性絶縁体に音波を注入することでもマグノン有効温度を変調でき、スピン流を生成可能であることを実験的に示す。

図5(a)に音波注入によるスピン流熱電変換の実証実験に用いた試料系の模式図を示した。試料には2.2節の実験で用いた単結晶YIG平板/Pt薄膜複合構造と同一のものを使用し、これを圧電体であるポリフッ化ビニリデン(Polyvinylidene difluoride: PVDF)フィルム上に固定した。PVDFフィルムの上下電極にAC電圧を印加することで素子が厚み振動し、YIG平板に縦波音波を注入することができる。YIGへの音波注入により、マグノン-フォノン相互作用を介してマグノン有効温度が変調されれば、上部に取り付けたPt層にスピン流が誘起される(図5(a))。このスピン流は、YIG平板の磁化が x 方向に向いていれば、これまでの実験と同様に逆スピンホール効果によってPt層の長手方向(y 方向)のDC起電力に変換される。本実験では、音波誘起スピン流によって生成された逆スピンホール起電力を観測するために、YIG平板に定常的に縦波音波を与えながら、Pt層の両端に発生した起電力を測定した。本章で示す実験は、すべて室温及び大気圧下で行った。

Pt層の両端に発生した起電力 V と(AC電圧印加による)PVDFフィルムの温度上昇 ΔT_{PVDF} をAC電圧の周波数 f の関数としてプロットした結果をそれぞれ図5(b)、5(c)に示した[19,23]。PVDFフィルムに印加したAC電圧の振幅(ピークピーク値) V_{pp} は10Vに固定し、起電力を測定する際には1kOeの外部磁場を x 方向に印加した。 $f > 5$ MHzのAC電圧をPVDFフィルムに印加した場合、 ΔT_{PVDF} は周波数の上昇に従い単調に増加した(図5(c))。この周波数領域ではPt層に正符号の起電力が生じ、その周波数依存性は ΔT_{PVDF} の周波数依存性曲線と良く対応していた。これは、高周波領域において観測された正符号の起電力信号は、PVDFフィルムの発熱によって誘起されたスピンゼーベック効果に由来していることを

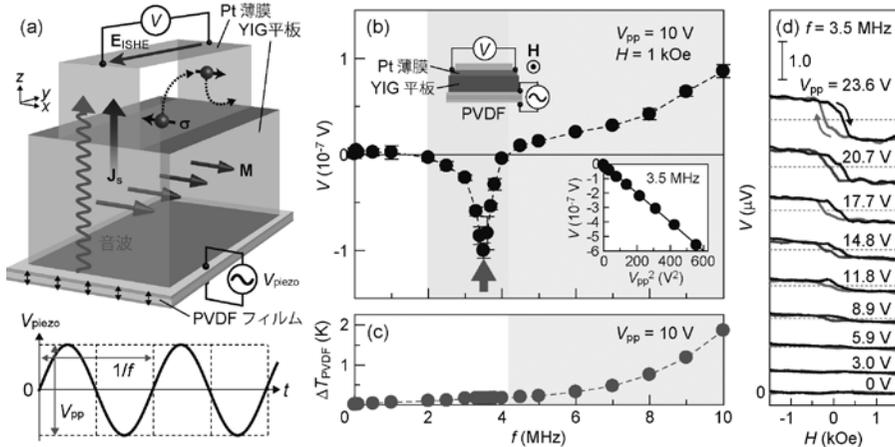


図5 (a) 音波注入によるスピン流熱電変換実験に用いた試料構造の模式図と発電メカニズム。 V_{piezo} は圧電素子に印加したAC電圧 (f : 周波数, V_{pp} : 振幅(ピークピーク値))である。(b) YIG平板/Pt薄膜複合構造における起電力の周波数依存性。(b)の挿入図は $f = 3.5$ MHzにおける起電力の V_{pp} 依存性である。(c) PVDFフィルムの温度上昇 ΔT_{PVDF} の周波数依存性。(d) $f = 3.5$ MHzにおける起電力の磁場依存性。

示す結果である。一方、 $f < 5$ MHz の場合には発熱による影響は無視できるほど小さいにもかかわらず、3.5 MHz 近傍に急峻なディップ構造を有する負符号の起電力が観測された(図 5(b))。図 5(b)の挿入図からわかるように、3.5 MHz において生じた起電力信号の大きさは AC 電圧振幅の二乗(V_{pp}^2)に比例して増大した。圧電素子によって生成された音波のエネルギー強度も V_{pp}^2 に比例するため、この結果は Pt 層に発生した起電力信号強度と YIG 平板に注入された音波エネルギーとの比例関係を明示している。また、起電力の符号は YIG 層の磁化反転により反転した(図 5(d))。以上の結果は、3.5 MHz 近傍で観測された起電力信号の起源が、YIG 平板に注入された音波によって駆動された逆スピンホール起電力であることを裏付けるものであり、本実験によって音波誘起スピン流による発電が初めて実現された。なお、音波注入によって生じた逆スピンホール起電力が急峻なディップ構造を有するのは、圧電素子の共振に由来する [19,23]。

2.4 全薄膜構造におけるスピン流熱電変換

本研究では、温度勾配及び音波注入によるスピン流発電現象を、磁性絶縁体層も薄膜化した YIG/Pt 全薄膜構造においても観測することに成功した。3節で述べるように、全薄膜構造はエネルギーハーベスティングに適した構造であり、本成果によって従来技術では全く利用できなかったエネルギー源からのスピン圧・電圧生成が可能になる。

YIG 薄膜の成長方法としては、液相エピタキシー法を用いた。液相エピタキシー法は、基板の配向性を維持させながら溶液から結晶薄膜を晶出させる方法であり、気相成長等と比べて成長速度が速い、大面積な素子の作製が容易、熱平衡に近い条件で結晶成長させるため結晶性の低下が小さい等の特徴を有する。厚さ $2\mu\text{m}$ の単結晶 YIG 薄膜を $\text{Gd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$ (GGG) 基板上に成長させ、その上に厚さ 15 nm の Pt 薄膜を成膜した。図 6(a) は試料の断面図を透過型電子顕微鏡を用いて観察した結果であり、液相プロセスによって高品質な単結晶 YIG 薄膜を作製できていることがわかる。

図 6(c)、6(d) はそれぞれ、YIG/Pt 全薄膜試料に 2.2 節に示した実験と同様の方法で温度勾配を付けながら測定した起電力の温度差依存性及び磁場依存性である。図 4 の場合と同様に、

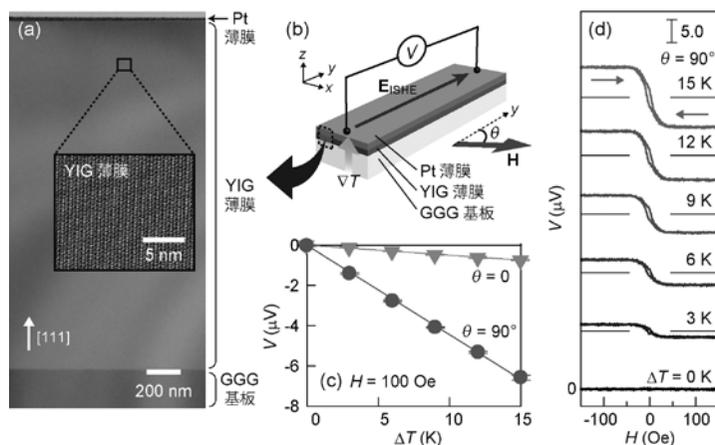


図6 (a) 透過型電子顕微鏡で観察したYIG/Pt全薄膜試料の断面図. (b) YIG/Pt全薄膜試料におけるスピナーゼバック効果の測定セットアップ. 温度勾配 ∇T は $\pm z$ 方向に付けた. (c) YIG/Pt全薄膜試料における起電力の温度差依存性. (d) 起電力の磁場依存性 ($\theta = 90^\circ$ の場合).

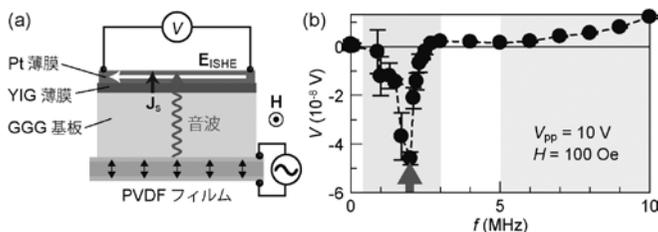


図7 (a) PVDF/YIG/Pt全薄膜試料における音波誘起スピンの測定セットアップ。(b) YIG/Pt全薄膜試料における起電力の周波数依存性 ($V_{pp}=10\text{ V}$ の場合)。

YIG/Pt 全薄膜構造においても試料上下面間の温度差に比例し、スピンゼーベック効果によって誘起された逆スピンホール効果が示す対称性(図3(c))を満たす起電力信号が生じた。一方、図7(b)はYIG/Pt全薄膜試料をPVDFフィルム上に固定し、音波を注入しながら測定した起電力の周波数依存性である。このセットアップにおいては、2 MHz 近傍に音波誘起スピン流に由来する逆スピンホール起電力が観測された。

本節に示した実験により、全薄膜構造においても温度勾配や音波を利用したスピン流誘起熱電発電を実現することができた。ここで重要なことは、YIG 薄膜の膜厚はGGG基板の厚さの1/100以下であるため温度差や音波の大部分は非磁性絶縁体基板中に存在しているにもかかわらず、YIG/Pt全薄膜試料において観測された起電力信号はYIG平板を用いた場合の出力信号と同程度の大きさであったという点である。この結果は、磁性絶縁体層のマグノンが基板中のフォノン(熱流や振動)によっても励起され得ることを示すものであり、スピンゼーベック効果を用いれば電気的にも磁気的にも不活性な絶縁体材料からもスピン圧や電圧を生成するためのエネルギーを取り出し可能であることが見出された。

3 まとめと今後の展望

本研究では、スピンゼーベック効果を用いることで絶縁体中の温度差や振動による起電力生成を室温下において実現し、スピン流に基づくエネルギーハーベスティング技術の基本原則を確立した。以下に、従来の導電体を用いた熱電変換素子にはない、スピン流熱電変換素子の特性・利点を列挙した。

(1) 熱伝導部と電圧生成部をそれぞれ絶縁体層とそれに取り付けた金属薄膜に分離可能

この特性により、熱電変換素子の設計・材料選択の自由度を大幅に向上でき、従来技術が抱えていた熱電性能指数改善に関する問題を根本的に解決できる可能性がある。熱電変換素子の性能指数は電気伝導率と熱伝導率の比に比例するため、熱流と出力電圧が同じ物質中に存在している従来型熱電変換素子では、ヴィーデマン・フランツ則⁸による制約によって性能指数の向上には限界があると考えられてきた。一方、本研究で開発したスピン流熱電変換素子を用いれば、熱伝導部と電圧生成部を独立に設計できることから、ヴィーデマン・フランツ則による制限を回避できる。

(2) シンプルな二層構造であるので、大面積化・積層構造化が容易で低コスト

従来のゼーベック効果を用いた熱電変換素子とスピンゼーベック効果を用いた熱電変換素

8 電気伝導率と(伝導電子に由来する)熱伝導率の比が一定になるという法則。

子の模式図を図8に示した。従来の熱電変換素子は、半導体P/N接合から成る熱電対構造のモジュールを直列に接続して集積化した複雑な構造を有しており、出力電圧を高めるためには集積度を向上させる必要があった。その構造の複雑さゆえに製造コストの削減は困難であり、熱電材料として現在主に使用されているBiTe系半導体は毒性や供給量の制限などの問題も抱えている。一方で、スピンゼーベック効果を用いた熱電変換素子は、シンプルな磁性絶縁体/金属薄膜二層構造により構成される。従来の熱電変換素子とは異なり、スピン流によって生成される熱起電力にはスケーリング特性(熱電変換能が素子サイズに比例する⁹⁾)があり、構造がシンプルであるため出力電圧を高めるための大面積な素子作製も容易である。

(3) 非磁性絶縁体中の熱や振動からもスピン圧・電圧を生成可能

スピンゼーベック効果を用いれば、非磁性絶縁体を含むあらゆる固体中の熱や振動(フォノン)からスピン圧・電圧を生成することができる(2.4節参照)。すなわち、従来型の熱電変換素子では設置対象の表面の熱しか利用できなかったのに対し、スピンゼーベック効果を用いれば素子から離れた領域の熱や振動からもエネルギーを“収穫”できるのである(図8)。これらは従来技術では全く利用できなかったエネルギー源であり、スピン流を用いることで新しいエネルギーハーベスティングが可能になったことを意味する。

以上のような新奇な特性を有するスピン流・エネルギーハーベスティングを実現する上で、温度差や振動による起電力生成を全薄膜構造においても実現できたことは特筆に値する。全薄膜構造と液相プロセス(塗布技術等)を応用すれば、大面積な素子の作製や、様々な界面・表面への熱電変換素子の直接実装が可能になるからである。また、全薄膜構造化することでデバイス体積を劇的に減少させることができるため、設置可能箇所数や材料コスト面でも大きな優位性がある。

スピン流を用いたエネルギーハーベスティング技術の開発は始まったばかりであるが、大きなスピンゼーベック効果を示す絶縁体材料及び強いスピン軌道相互作用を有する金属薄膜の探索・作製、絶縁体/金属界面におけるスピン流交換の高効率化、素子の大量積化・積層

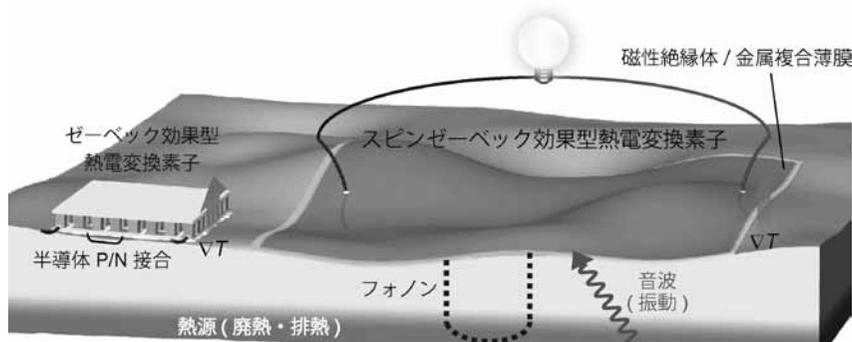


図8 ゼーベック効果を用いた熱電変換素子とスピンゼーベック効果を用いた熱電変換素子の比較。従来の熱電変換素子は、半導体の製造プロセスやその後の組み立てが複雑であり、コスト面の制約から素子の大量積化や集積化(=高出力化)は困難であった。一方、スピンゼーベック効果を用いた熱電変換素子の製造プロセスは最小2行程であるため、コストや生産性の観点から有利であり、全薄膜構造を用いれば大量積化や積層化も容易に実現できる。

9 従来の熱電変換素子の熱電変換能は素子(材料)固有のパラメータである。

化等を行うことにより、熱電変換能を大幅に改善できる可能性がある。そして、スピン流熱電変換素子が有する高い設計自由度を最大限に利用すれば、ありふれた廃熱や振動によって駆動される小型電源やセンサー等として幅広い用途への応用が期待できる。

謝 辞

本研究の一部は、科学技術振興機構、新エネルギー・産業技術総合開発機構の援助の下に行われました。本研究を遂行するにあたり、御指導、御鞭撻を賜りました指導教官の齊藤英治教授(東北大学金属材料研究所)に心より感謝致します。また、日本原子力研究開発機構先端基礎研究センターの前川禎通センター長、安立裕人博士、家田淳一博士、東北大学金属材料研究所の Gerrit E. W. Bauer 教授、高橋三郎助教、東邦大学理学研究科の大江純一郎講師、カイザースラウテルン工科大学(ドイツ)の Burkard Hillebrands 教授、復旦大学(中国)の Jiang Xiao 准教授、東北大学工学研究科の戸田雅也助教、FDK 株式会社の梅澤浩光氏、河合博貴氏、NEC グリーンイノベーション研究所の桐原明宏氏に多くの御指導、御助言を頂きました。この場をお借りして厚く御礼申し上げます。

参考文献

- [1] K. Uchida, S. Takahashi, K. Harii, J. Ieda, W. Koshibae, K. Ando, S. Maekawa, and E. Saitoh, *Nature* **455**, 778 (2008).
- [2] K. Uchida, S. Takahashi, J. Ieda, K. Harii, K. Ikeda, W. Koshibae, S. Maekawa, and E. Saitoh, *J. Appl. Phys.* **105**, 07C908 (2009).
- [3] K. Uchida, T. Ota, K. Harii, K. Ando, K. Sasage, H. Nakayama, K. Ikeda, and E. Saitoh, *IEEE Trans. Magn.* **45**, 2386 (2009).
- [4] 内田健一, 齊藤英治, *固体物理* **44**, 281 (2009).
- [5] K. Uchida, T. Ota, K. Harii, S. Takahashi, S. Maekawa, Y. Fujikawa, and E. Saitoh, *Solid State Commun.* **150**, 524 (2010).
- [6] K. Uchida, T. Ota, K. Harii, K. Ando, H. Nakayama, and E. Saitoh, *J. Appl. Phys.* **107**, 09A951 (2010).
- [7] J. Xiao, G. E. W. Bauer, K. Uchida, E. Saitoh, and S. Maekawa, *Phys. Rev. B* **81**, 214418 (2010).
- [8] 内田健一, 太田岳, 齊藤英治, *まぐね* **5**, 283 (2010).
- [9] 内田健一, 太田岳, 齊藤英治, *まてりあ* **49**, 357 (2010).
- [10] K. Uchida, J. Xiao, H. Adachi, J. Ohe, S. Takahashi, J. Ieda, T. Ota, Y. Kajiwara, H. Umezawa, H. Kawai, G. E. W. Bauer, S. Maekawa, and E. Saitoh, *Nature Mater.* **9**, 894 (2010).
- [11] C. M. Jaworski, J. Yang, S. Mack, D. D. Awschalom, J. P. Heremans, and R. C. Myers, *Nature Mater.* **9**, 898 (2010).
- [12] K. Uchida, H. Adachi, T. Ota, H. Nakayama, S. Maekawa, and E. Saitoh, *Appl. Phys. Lett.* **97**, 172505 (2010).
- [13] H. Adachi, K. Uchida, E. Saitoh, J. Ohe, S. Takahashi, and S. Maekawa, *Appl. Phys. Lett.* **97**, 252506 (2010).
- [14] K. Uchida, T. Nonaka, T. Ota, and E. Saitoh, *Appl. Phys. Lett.* **97**, 262504 (2010).

- [15] H. Adachi, J. Ohe, S. Takahashi, and S. Maekawa, *Phys. Rev. B* **83**, 094410 (2011).
- [16] J. Ohe, H. Adachi, S. Takahashi, and S. Maekawa, *Phys. Rev. B* **83**, 115118 (2011).
- [17] C. M. Jaworski, J. Yang, S. Mack, D. D. Awschalom, R. C. Myers, and J. P. Heremans, *Phys. Rev. Lett.* **106**, 186601 (2011).
- [18] S. Bosu, Y. Sakuraba, K. Uchida, K. Saito, T. Ota, E. Saitoh, and K. Takanashi, *Phys. Rev. B* **83**, 224401 (2011).
- [19] K. Uchida, H. Adachi, T. An, T. Ota, M. Toda, B. Hillebrands, S. Maekawa, and E. Saitoh, *Nature Mater.* **10**, 737 (2011).
- [20] 内田健一, 齊藤英治, シーエムシー出版
「熱電変換技術の基礎と応用—クリーンなエネルギー社会を目指して—」第2章 (2011).
- [21] K. Uchida, T. An, Y. Kajiwara, M. Toda, and E. Saitoh, *Appl. Phys. Lett.* **99**, 212501 (2011).
- [22] K. Uchida, A. Kirihara, M. Ishida, R. Takahashi, and E. Saitoh, *Jpn. J. Appl. Phys.* **50**, 120211 (2011).
- [23] K. Uchida, H. Adachi, T. An, H. Nakayama, M. Toda, B. Hillebrands, S. Maekawa, and E. Saitoh, *J. Appl. Phys.* **111**, 053903 (2012).
- [24] S. Bosu, Y. Sakuraba, K. Uchida, K. Saito, W. Kobayashi, E. Saitoh, and K. Takanashi, *J. Appl. Phys.* **111**, 07B106 (2012).
- [25] Y. Kajiwara, K. Harii, S. Takahashi, J. Ohe, K. Uchida, M. Mizuguchi, H. Umezawa, H. Kawai, K. Ando, K. Takanashi, S. Maekawa, and E. Saitoh, *Nature* **464**, 262 (2010).
- [26] E. Saitoh, M Ueda, H. Miyajima, and G. Tatara, *Appl. Phys. Lett.* **88**, 182509 (2006).
- [27] K. Ando, S. Takahashi, J. Ieda, Y. Kajiwara, H. Nakayama, T. Yoshino, K. Harii, Y. Fujikawa, M. Matsuo, S. Maekawa, and E. Saitoh, *J. Appl. Phys.* **109**, 103913 (2011).