

公益信託 NEXCO 関係会社高速道路防災対策等に関する支援基金
受託者 三菱UFJ 信託銀行株式会社 宛

研究概要書

研究課題：トンネル・架橋等故障検知システムに向けた自立電源技術の研究

研究代表者：九州大学大学院システム情報科学研究院 教授 湯浅 裕美

はじめに

高度経済成長を経て整備されてきた高速道路インフラは、経年劣化が無視できない時期を迎えている。これに対し、AE センサー等を無線ネットワークで繋ぐ故障検知システムを駆動するため、環境発電が注目されている。一つの候補として、トンネル・橋梁に自然に存在する温度勾配を利用した、磁性体におけるスピン熱電発電素子の研究開発を行った。

1. 研究の目的

磁性体と非磁性体のハイブリッド構造体に温度差を掛けて得られるスピンゼーベック発電素子を開発する。この発電メカニズムは、温度差の掛かった磁性体でスピン流が発生し、非磁性体に流れ込んで、非磁性体の中でスピン流から電流に変換される、というものである（図-1）。従来のゼーベック発電素子と異なり温度勾配と起電力が直交し、一様膜で発電できることから、構造体に沿うフレキシビリティをもち、大面積化しやすいというメリットがある。一方、現状の発電密度は低く、従来のゼーベック発電に比べて小さいことが課題である。そこで、トンネルや橋梁の温度差から微小電力を得る程度まで発電量を向上する方策を確立する。

2. アプローチ

図-2 に試料構造と起電力向上のアプローチを示す。通常スピンゼーベック発電に使われるのは、酸化物フェリ磁性体である $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ (YIG) と重金属である Pt のバイレイヤーである。YIG に温度勾配を加えると、それに沿ってスピン流が Pt へと流れ込む。このスピン流が、重金属で一般的な電流に変換されて、起電力を取り出すことが出来る。本研究では、スピン流を出るだけ効率的に Pt へ注入すべく、0.6nm 以下の極薄い磁性体を YIG と Pt の間に挿入した。目論見通り起電力は 2 倍程度向上したので、メカニズムを明らかにするため、同じく界面に敏感なスピンホール磁気抵抗を測定し、Generalized Magneto-Optics Ellipsometry (GME) という手法で界面の磁化を評価した。

3. 結果

図-3(a) は、極薄磁性層を挿入したときの起電力に相当するスピンゼーベック係数 S である。あらゆる磁性体を試したが全てで起電力の向上が見られ、0.6nm 程度の膜厚のときに大きくなった。この 0.6nm 挿入したときのスピンホール磁気抵抗効果による抵抗変化率 MR_{xx} を測定し図-3(b)、 S との関係を示したのが図-4 である。両者に正の相関がみられ、極薄磁性体の挿入によってスピン流の注入効率が向上したことが分かった。磁性層は概ね原子層であり、通常のバルクの性質とは異なる可能性がある。そこで、スピン流注入効率向上のメカニズムを調べるため、GME により極薄磁性層の磁化を測定したところ、いずれも膜も磁化が存在しないことが分かった。図 5 は磁化解析の結果である。バルクでは強磁性体の材料であるが、非常に薄いために磁気秩序温度が室温以下となり、磁気モーメントがランダムになっている状態と考えられる。1nm 以上の厚さにすると起電力向上の効果もスピンホール磁気抵抗効果も減退してしまうので、このランダムな状態がスピン流注入効率向上のポイントである可能性が高い。

まとめ

フェリ磁性体 YIG と重金属 Pt の構造では、これらの間に極薄磁性層を挿入すると、スピントラッキング起電力が向上した。さらに界面を反映するスピンホール磁気抵抗効果も向上し、極薄磁性層がスピン流を制御できることが分かった。この極薄磁性体では磁気モーメントが揃った強磁性状態を示さない。この状態がスピン流注入効率向上のポイントである可能性が高い。今後は、この状態を保持する好適な磁性材料を見つけ、起電力の大幅な向上に結び付ける。

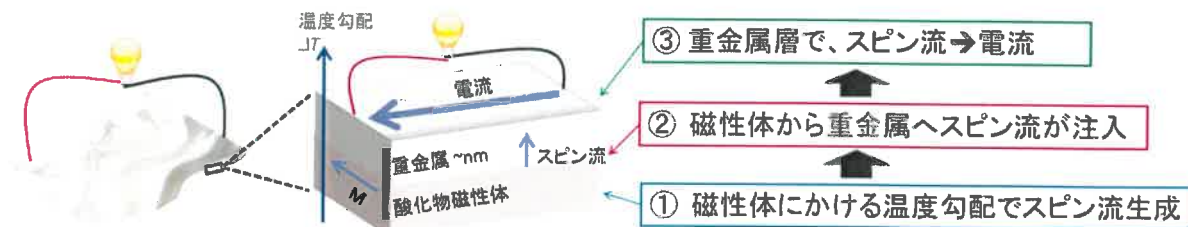


図-1 スピントラッキング発電の機構

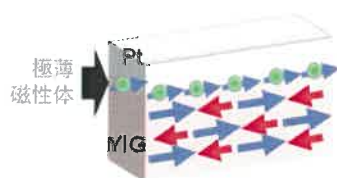


図-2 起電力向上のアプローチ

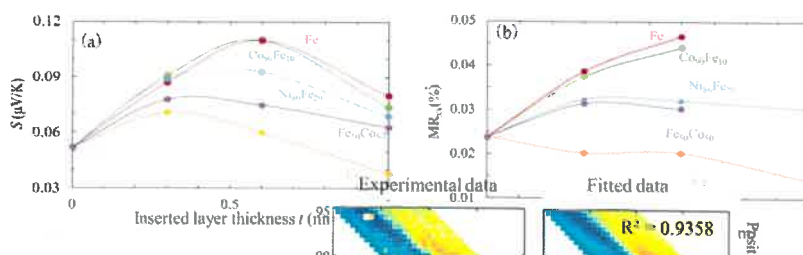


図-3 各種極薄磁性層を挿入した際のスピントラッキング係数 (a) とスピンホール磁気抵抗効果 (b) の挿入膜厚依存性

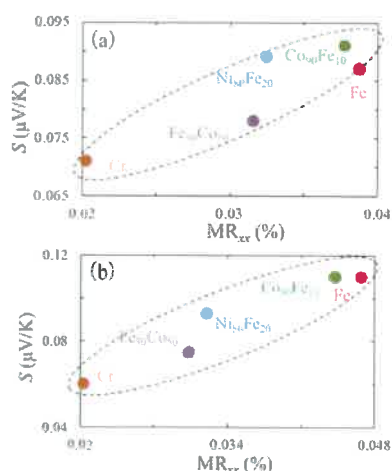


図-4 各種極薄磁性層が 0.3nm (a) 0.6 nm (b) の試料におけるスピントラッキング係数 (a) とスピンホール磁気抵抗効果の関係

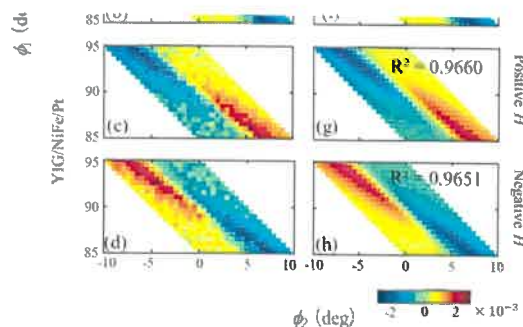


図-5 極薄磁性層が Ni₈₀Fe₂₀ 0.6nm の試料における GME の測定結果と解析結果。磁化が無視できるほど小さいという結果。