

【研究成果の要約】

氏名	田辺賢士
1. 研究題目	熱流センサーの開発に向けた低熱伝導率を有する磁気熱電発電材料の研究
2. 研究内容	<p>ガス燃焼機器の安全性の確保のためには、異常発熱を素早く感知する必要がある。ここでいう異常発熱は、単に温度が高い状態を指すのではなく、急激な熱の流れ込みによって、急な温度上昇が見込まれる状態も意味している。これまでの温度センサーでは物体の温度を感知していたため、急な温度上昇が見込まれる状態を感知することはできない。もし高感度な熱流センサーを開発できれば、発熱が生じる前に異常な熱流を感知し、素早く異常を知らせることが可能になる(図1)。</p> <p>我々が熱流センサーの開発のために注目したのは、磁性体を用いた温度差から電圧が発生する現象の一つである異常ネルンスト効果である。異常ネルンスト効果は、磁性薄膜を作製するだけで簡単にフィルム状の素子を作ることができ、発熱が生じるとされる場所に張り付けるだけで利用が可能になる。この素子作製の容易さ、および素子構造の汎用性の高さは応用上大きなメリットになる。これまでの異常ネルンスト効果の研究では、“温度勾配から電圧を取り出す指標(S_{ANE})”に注目した研究がほとんどであった。しかし、熱流センサーの開発のためには、熱流から電圧を取り出す指標で評価する必要がある。熱流と温度勾配には、$(\text{熱流}) = (\text{温度勾配}) \times (\text{熱伝導率})$ という関係があり、熱伝導率で結び付けられる。その為、“熱流から電圧を取り出す指標で評価する”とは、“温度勾配から電圧を取り出す指標(S_{ANE})”に加えて“熱伝導率”に注目することを意味している。低い熱伝導率を有する材料を開発できれば、高感度な熱流センサーへの応用が期待できる。本研究では、熱伝導率を1つのキーワードに掲げて熱流センサーの高感度化を目指した。具体的には、アモルファス構造をとり、熱伝導率が低いとされるTbCoやGdCoの異常ネルンスト効果の研究を行った。TbCoは大きな“温度勾配から電圧を取り出す指標(S_{xy})”と大きな保磁力の共存が可能であることを明らかにした。このことは無磁場下でのセンサー応用が可能になることを意味する。さらにGdCoは熱流センサー感度がある組成で過去最高を更新した。またナノインプリント法を用いて凹凸構造を使って高感度化の研究を行い、10倍以上の高度増強に成功した。</p>
3. 研究成果	<p>この2年間の研究成果として、3つ結果に分けられる。</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 低熱伝導率材料と期待される希土類遷移金属合金(TbCo)における大きな異常ネルンスト効果と大きな保磁力の共存 2. 低熱伝導率材料と期待される希土類遷移金属合金(GdCo)において、熱流センサーの感度指標の最高値更新 3. ナノインプリント法を用いて、低熱伝導材料で作製された凹凸構造による熱流センサーの高感度化

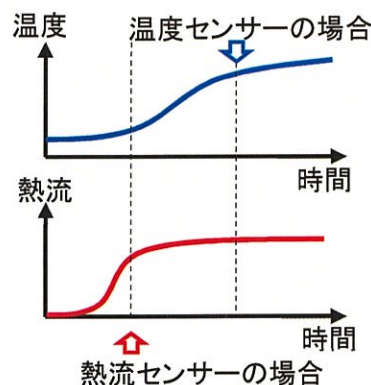
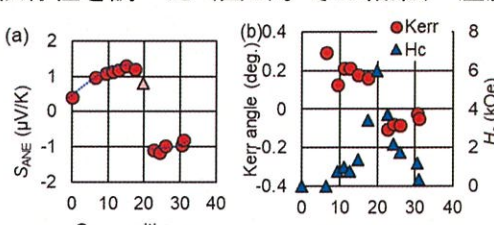
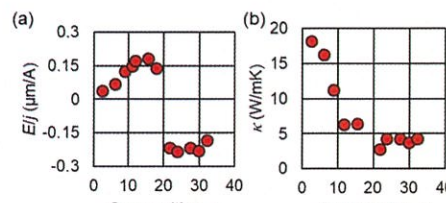


図1. 異常感知のイメージ。
一般に温度の上昇よりも熱流の上昇が先に生じ、熱流センサーの感知の方が早い。

【研究成果の概要】

氏名	田辺賢士
1. 研究題目	熱流センサーの開発に向けた低熱伝導率を有する磁気熱電発電材料の研究
1. 希土類遷移金属合金 TbCo を用いた異常ネルンスト効果の研究[1]	
<p>固体における熱伝導は、一般に電子による熱伝導とフォノンによる熱伝導がある。フォノンによる熱伝導は主に結晶構造に強く依存する。今回我々は、フォノンによる熱伝導が低いとされるアモルファス構造を有する希土類遷移金属合金 (TbCo) に注目した。Tb_xCo_{1-x} 合金薄膜を作製し、異常ネルンスト効果の希土類元素 (Tb) の濃度依存性を調べた (図 2)。その結果、“温度勾配から電圧を取り出す指標”である S_{ANE} は希土類元素 (Tb) を 20%程度添加することで、Co 単体よりも 3 倍大きくなることが明らかになった。また応用には、無磁場下で動作する必要があるが、そのためには大きな保磁力を有する必要がある。TbCo の保磁力を調べると、大きな S_{ANE} と大きな保磁力が共存できる稀有な材料であることが明らかになった。</p>	
 <p>図 2. (a) S_{ANE} の組成依存性, (b) 保磁力の組成依存性. 20%程度の組成で, S_{ANE} が大きくなり, 保持力も発散的に大きくなっている.</p>	
2. 低熱伝導率材料 GdCo を用いた熱流センサー材料としての最高感度更新[2]	
<p>熱流センサーの開発には、大きな S_{ANE} だけでなく、低い熱伝導率を持つ材料が必要である。希土類遷移金属合金は、1. の研究より Co 薄膜より大きな S_{ANE} を持つことが分かっている。そこで次に、希土類遷移金属合金 (GdCo) の熱伝導率を評価、および熱流センサー感度を調べた。その結果、感度は Co₂MnGa で報告された過去最高感度 0.22 $\mu\text{m}/\text{A}$ に匹敵する 0.23 $\mu\text{m}/\text{A}$ を組成 23.7%のときに生み出すことに成功した。特にかなり広い組成範囲で 0.20 $\mu\text{m}/\text{A}$ 以上の高感度を実現しており、正と負の両方を実現できている点は応用上非常に意味がある。また熱伝導率は 5 W/mK 程度まで低減できることが分かった。</p>	
 <p>図 3. 感度 E/j の組成依存性, (b) 熱伝導率の組成依存性. 感度は 15%以上で増大している. 熱伝導率も 20%以上で 4 W/mK まで低減している.</p>	
3. 構造最適化による熱流センサーの高感度化[3]	
<p>これまでの熱流センサー開発の研究では、主に材料探索の観点から研究されたものがほとんどであり、構造最適化の研究例はほぼない。そこで我々は、熱流センサーの高感度化の観点から構造最適化の研究を行った。ナノインプリント法を用いて、低熱伝導率材料であるプラスチック基板に凹凸構造を作製し、その側面部分に磁性膜を成膜することで、熱流を集中させ感度上昇に成功した。平坦な膜に比べ 10 倍以上の感度上昇に成功し、この結果は、数値計算とも一致している。</p>	
[1] M. Odagiri (M2 の指導学生), K. Tanabe et al., arXiv:2401.04445, <i>submitted</i> .	
[2] M. Odagiri (M2 の指導学生), K. Tanabe et al., arXiv:2402.04259, <i>submitted</i> .	
[3] H. Imaeda (M1 の指導学生), K. Tanabe et al., <i>in preparation</i> .	