

令和 6 年 6 月 25 日現在

機関番号：31302

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K18705

研究課題名（和文）1次磁気相転移を利用した熱誘起型電磁誘導発電技術の開発

研究課題名（英文）Development of energy harvesting technique of thermally induced electromagnetic induction using first order magnetic phase transition

研究代表者

梶 修一郎（HASHI, Shuichiro）

東北学院大学・工学部・教授

研究者番号：90324285

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 5,000,000円

研究成果の概要（和文）：磁性体の1次磁気相転移に伴う強磁性相 - 非磁性相の瞬間的な磁化（磁束）変化を利用した熱誘起型電磁誘導発電を目的として、原子濃度比が1：1のFe-Rh合金を作製し、5×7.4×2.5mmに切り出した試料に1100～1200℃、24時間の熱処理を施し評価用試料を得た。磁化の温度変化の測定結果より、試料は不規則相（fcc）を含んでおり緩慢な磁化変化であった。これより合金作製時の両元素の偏析が推察される。またこれらの試料を用いて、100℃程度の加熱状態から液体窒素を吹きかけて急速冷却することで、冷却時の相転移による磁化変化に伴う誘導起電力の発生が可能か試みたが、明確な誘導起電力は確認できなかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

熱を利用する環境発電は、大規模になりがちな熱機関以外ではゼーベック効果を利用する熱電材料に限られ、高温側と低温側の温度差の大きさが発電効率に大きく寄与するため、人工的な発熱源を利用しない限り、人の生活環境温度範囲において、気温や室温などわずかな温度差や温度変化による発電は困難である。これに対し、わずかな温度変化の範囲内で電磁誘導を引き起こすという新規概念の環境発電技術の原理が実証されれば、環境発電の分野のみならず、新たな視点での磁気相転移に関わる磁気物理・材料開発の研究及びその応用分野の開拓などに貢献できる潜在性を有する。

研究成果の概要（英文）：For thermally induced electromagnetic induction power generation using the instantaneous change in magnetization between ferromagnetic and non-magnetic phases accompanying the first-order magnetic phase transition of magnetic materials, Fe-Rh alloys with an equiatomic concentration ratio were prepared, and samples cut to 5 × 7.4 × 2.5 mm were heat-treated at 1100-1200 °C for 24 hours to obtain evaluation samples. Measurements of the magnetization change with temperature showed that the samples contained an irregular phase (fcc) and the magnetization change was slow. This suggests that the two elements segregated during the alloy preparation. In addition, using these samples, we attempted to see whether it would be possible to generate an induced electromotive force associated with the magnetization change due to the phase transition during cooling by spraying liquid nitrogen from a heated state of about 100 °C to rapidly cool them, but no clear induced electromotive force was observed.

研究分野：磁気応用工学

キーワード：環境発電 磁気相転移 熱誘起 電磁誘導

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

IoT (Internet of Things) 実現に向けた無線センサネットワークノード構築のため、また低炭素社会実現のため、環境に存在する光、熱、振動、電波などのエネルギーを活用する環境適合型の発電技術(環境発電)の開発が盛んである。利用する環境エネルギー毎に様々な方式が提案されているが、それぞれ一長一短がある。例えば、太陽電池に代表される光利用の光電変換型では、夜間や暗所での効率低下、振動利用型では振動源の持続性や安定性による効率変動などの問題が挙げられる。また、日照や稼働機構が不要な熱の利用は主に熱電発電材に限られ、特に大きな温度差をとれない生活環境温度近傍での発電では、変換効率が数%以下に留まっている。よって、使用環境に応じて複数方式を組み合わせる相補的な利用や、これまで利用が困難であった環境エネルギーの活用、また新規概念の発電技術の開発は非常に重要である。

2. 研究の目的

本研究では、磁性材料の示す特異で急峻な磁気相転移現象を利用することで、わずかな温度変化により生じる強磁性相 - 非磁性相の瞬間的な磁化(磁束)変化による熱誘起型電磁誘導発電技術を確立し、それをを用いた新規概念の高効率な熱利用型環境発電デバイスの実現を目指す。本方式は、磁気相転移磁性体、発電用巻線、バイアス用磁石のみの構成で、機械的な稼働機構を全く有しないため熱電材と同様に全個体方式とみなせ、耐久性が高くまた熱機関では困難とされるマイクロサイズまでの小型化への可能性を有している。

3. 研究の方法

物質の状態が熱や応力などの外的条件により異なる相に移り変わることを相転移と呼び、相の間を不連続に移り変わる1次相転移と連続的に移行する2次相転移に分類される。例えば、水と氷の間の相転移は中間の状態を持たない不連続な1次相転移であるが、常磁性・強磁性・反強磁性間の相転移は2次及び1次相転移のどちらの場合もあり得る。本研究では、瞬間的に大きな磁化(磁束)変化を示すFe-Rh合金の1次磁気相転移に注目した。

原子濃度比が50 : 50 (at.%)、且つ高温の熱処理でCsCl規則型結晶構造化したFe-Rh(鉄-ロジウム)合金は、約50で反強磁性-強磁性の急峻な1次磁気相転移を示すことが古くから知られている[1]。低温の反強磁性相では原理的に外部への磁気的応答を示さないため非磁性状態とみなせ、転移温度を超えると、約1.5T(テスラ)の飽和磁化(磁束密度)まで瞬間的に強磁性状態に転移する(図1上)。転移の温度幅はわずか2未満程度あり、転移と共に生じる内部磁化を一方向に揃えるための適当なバイアス磁界印加と合金に巻かれた巻線により、磁界印加方向に瞬間的に大きな磁束密度の時間変化による起電力が生じる。さらに強磁性相から冷却する場合も同様に、瞬時に同等の磁束密度の時間変化を生じるため、わずかな温度範囲での加熱・冷却を繰り返すことで発電が可能となる。よって相転移温度を境界として、合金全体を如何に均等且つ短時間で加熱・冷却できるかが発生起電力の大きさを左右する。その点では、銅巻線は熱伝導率が高いため有利に働く。またRhの一部を同じ白金族であるPd(パラジウム)、Pt(白金)、Ir(イリジウム)で置換することで、転移特性を損なうことなく環境温度範囲での転移温度の調整も可能である[2-4]。

4. 研究成果

アーク溶解法を用いて、鉄(Fe)とロジウム(Rh)の原子濃度比が1 : 1となるFe-Rh合金の作製を行い、約60gの母合金を得た。その母合金を再度溶解し長尺の金型に流し込むことで棒状インゴットを作製した。評価用試料として、幅5mm、厚さ2.5mmで、長さがそれぞれ7、43、86mmの試料片を切り出し、結晶構造のCsCl型の規則化を行うため熱処理を施した。1100で24時間の保持時間に加え、熱処理後の降温時には徐冷が必須のため、計40時間程度の熱処理時間を要した。なお、徐冷速度は2/minとした。また熱処理時の試料の酸化防止のため、炉内を水素ガスで置換した。

熱処理後の試料(5×7.4×2.5mm)について、振動試料型磁力計(VSM)を用いて-100、30、150の磁化曲線の測定を行った結果を図1に示す。図1より印加磁界5kOeでそれぞれ13.8、33.3、132.4emu/gの磁化値を示し、特に低温

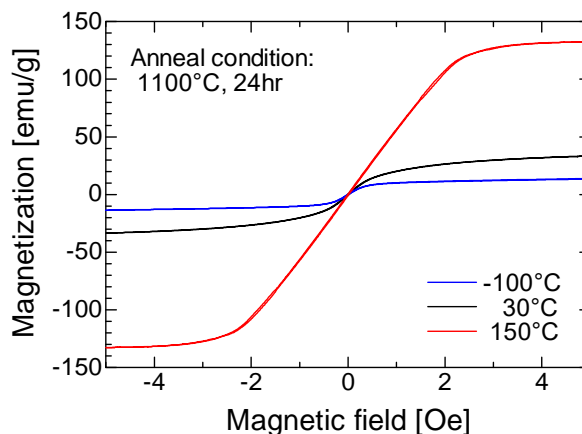


図1 - 100, 30, 150 における磁化曲線

でも強磁性を示していることが判る。次に VSM を用いて温度を変化させながら磁化変化の測定を行った。測定条件は液体窒素温度 (-196) から 160 まで上昇させ、その後 -100 まで冷却した。昇温及び降温速度は 5 /min とした。測定結果を図 2 に示す。図 2 より、0 付近から 1 次磁気相転移により磁化値が上昇し始め約 120 で 133.6emu/g の最大磁化値を示した。温度変化による磁化の勾配は 2emu/g/ となり緩やかな変化であったが、昇温時と降温時の温度差である温度ヒステリシスは約 15 と比較的狭い値が得られた。これらの結果より、熱処理後の合金試料は低温に置いて強磁性相が残存しており、その割合を磁化値から概算すると約 1/5 程度と見積もられる。この原因として、結晶構造の規則化のための熱処理条件が十分ではない、また合金試料内部の Fe と Rh の組成比のずれにより、強磁性を示す不規則構造 (fcc) の相が残存していることが考えられる。

そこで、保持温度を 1200 に引き上げて再度熱処理を施し、同様に磁化の温度特性の測定を行った。図 3 にその結果を示す。図 2 の結果と比較して、低温における磁化値が半分程度まで減少しており、また温度上昇に伴う磁気相転移の変化が鋭く且つ線形的な変化を示していることが判る。しかしながら、70 付近から傾きの緩やかな線形変化に移行しており、140 程度で 120emu/g 弱程度の最大磁化値を示した。この結果より、この合金試料内には次に述べる二つの相の存在が示唆される。一つは原子濃度比が 1:1 に近い組成比の Fe-Rh 合金相であり、もう一方は Fe が過多となっている Fe-Rh 合金相である。これらの原因として、合金作製時において長尺の鋳型を用いたことにより合金内で両元素の偏析が生じたことが推察される。

次にこれらの試料を用いて、100 程度の加熱状態から液体窒素を吹きかけて急速冷却することで、冷却時の相転移による磁化変化に伴う誘導起電力の発生が可能か試みた。巻き数 1000 ターンのソレノイドコイルを机上に垂直に設置し、その中央部にバイアス磁界印加用ネオジム磁石を接着した Fe-Rh 合金試料を、磁石の磁化方向がソレノイドコイルの円筒軸と平行に配置できるように非磁性且つ非金属の台座を設置した。まず磁石が接着された試料を 200 程度まで加熱したホットステージ上で加熱してから、ソレノイドコイル内に素早く置き液体窒素を吹きかけることで急速冷却を行った。1100 及び 1200 で熱処理を行った試料の数個で実験を行ったが、明確な誘導起電力は確認できなかった。この原因として、合金組成比のわずかなずれによる 1 次磁気相転移特性の緩慢さ [5] が、冷却による磁化の減少速度を緩やかにしているものと思われる。よって、急峻な磁気相転移特性を示す試料が得られるよう、組成比が厳密に制御された試料を改めて作製し、目的とする電磁誘導発電の可能性について検討する必要がある。

< 引用文献 >

- [1] J. S. Kouvel, C. C. Hrtelius, "Anomalous magnetic moments and transformations in the ordered alloy FeRh," J. Appl. Phys., vol. 33, pp. 1343-1344 (1962).
- [2] J. S. Kouvel, "Unusual nature of the abrupt magnetic transition in FeRh and its pseudobinary variants," J. Appl. Phys., vol. 37, pp. 1257-1258 (1966).
- [3] 湯浅新治、大谷義近、宮島英紀、佐久間昭正、「心立方晶 FeRh 系合金の磁性」、日本応用磁気学会誌、vol. 18, pp. 235-240 (1994).
- [4] S. Yuasa, T. Katayama, K. Murata, M. Usukura, Y. Suzuki, "Change in the resistivity of bcc and bct FeRh alloys at first-order magnetic phase transitions," J. Phys. Soc. Jpn., vol. 64, pp. 3978-3985 (1995).
- [5] S. Hashi, S. Yanase, Y. Okazaki, M. Inoue, "A large thermal elasticity of the ordered FeRh alloy film with sharp magnetic transition," IEEE Trans. Magn., vol. 40, pp. 2784-2786 (2004).

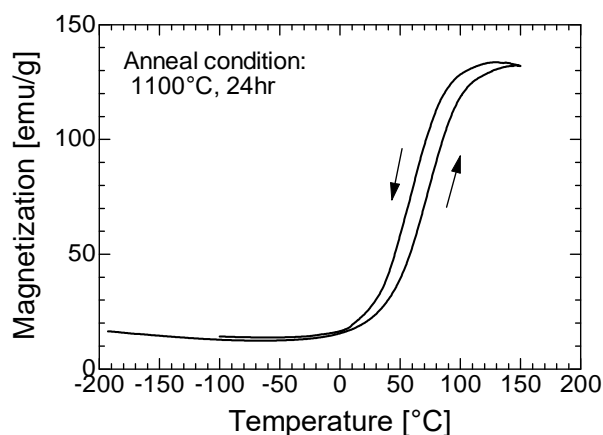


図 2 1100 で熱処理した試料の磁化の温度特性の測定結果

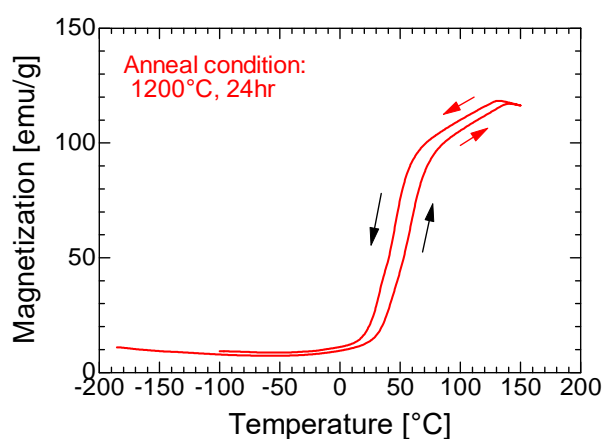


図 3 1200 で熱処理した試料の磁化の温度特性の測定結果

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計0件

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------