



アモルファス GdFe フェリ磁性合金薄膜における異常ネルンスト係数への異常ホール抵抗率の寄与

Effect of anomalous Hall resistivity on anomalous Nernst coefficient in amorphous GdFe ferrimagnetic alloy thin film

小林祐希^{a)†}・笠谷雄一^{b)}・吉川大貴^{b)}・塚本新^{b)}

^{a)} 日本大学大学院理工学研究科, 千葉県船橋市習志野台 7-24-1 (〒274-8501)

^{b)} 日本大学理工学部, 千葉県船橋市習志野台 7-24-1 (〒274-8501)

Y. Kobayashi^{a)†}, Y. Kasatani^{b)}, H. Yoshikawa^{b)}, and A. Tsukamoto^{b)}

^{a)} Graduate School of Science and Technology, Nihon Univ., 7-24-1 Narashinodai, Funabashi-shi, Chiba 274-8501, Japan

^{b)} College of Science and Technology, Nihon Univ., 7-24-1 Narashinodai, Funabashi-shi, Chiba 274-8501, Japan

The anomalous Nernst effect (ANE), which is the generation of transverse voltage due to a mutually orthogonal temperature gradient and magnetization, has been studied with several types of magnetic materials. We investigated the contribution of the anomalous Hall effect (AHE) to ANE in amorphous GdFe ferrimagnetic alloy thin film with precise composition control. According to transverse and longitudinal voltage measurements with an applied temperature gradient or current, the anomalous Nernst voltage and anomalous Hall voltage showed a magnetic field dependence reflecting that of the net magnetization. It was also found that the Gd-composition ratio dependence of the anomalous Nernst coefficient was similar to that of anomalous Hall resistivity. Furthermore, an anomalous Nernst component due to AHE with a Seebeck current was estimated to contribute to the anomalous Nernst voltage by at least more than 13 %. In amorphous GdFe ferrimagnetic alloy thin film, the AHE is considered to be one of the essential mechanisms for ANE.

Keywords: anomalous Nernst coefficient, anomalous Hall resistivity, Seebeck coefficient, ferrimagnetic alloy, GdFe

1. はじめに

微小電圧駆動素子の自立電源への応用に向け、環境発電に関する研究が進んでいる。熱電効果は環境発電に用いられる原理の一つであり、半導体や金属において温度勾配により起電力が生じる現象である¹⁾。縦型熱電効果(ゼーベック効果)に比べ高い発電効率が期待される横型磁気熱電効果が注目されている²⁻⁷⁾。金属磁性体中での横型磁気熱電効果の異常ネルンスト効果 (Anomalous Nernst Effect: ANE) は、磁化 M と温度勾配 ∇T にもとも垂直な方向に電界 E_{ANE} が生じる現象として知られ、次の式で表される⁷⁻¹⁰⁾。

$$E_{ANE} \propto M \times \nabla T \quad (1)$$

また、 Mn_3Sn などの反強磁性体において、特徴的な電子構造に起因する上式では表現できない異常ネルンスト効果も近年報告されており^{2), 4), 11-14)}、金属磁性体における異常ネルンスト効果について体系的な検討が進められている²⁾⁻²⁰⁾。その中で、磁化方向に依存する E_{ANE} は i 方向の温度勾配 $\nabla_i T$ に比例すると考え、異常ネルンスト係数 S_{ANE} を用いて(2)式で表され、 S_{ANE} の起源については(3)式を用いて検討される。

$$E_{ANE} = S_{ANE} \nabla_i T \quad (2)$$

$$S_{ANE} = \rho_{xx} \alpha_{xy}^A - \rho_{AHE} \alpha_{xx} = S_I + S_{II} \quad (3)$$

ρ_{xx} , ρ_{AHE} はそれぞれ電気抵抗率、異常ホール抵抗率であり、 α_{xx} , α_{xy}^A はそれぞれ熱電気伝導度のテンソルの対角成分と非対角成分である。(3)式右辺第二項 S_{II} は、温度勾配 (x 方向) と同方向に生じた電流の異常ホール効果に起因する横電圧への寄与を表す。対して、(3)式右辺第一項 S_I は温度勾配 (x 方向) がその直交方向 (y 方向) の電界に直接変換される寄与を表す。この(3)式の各項の寄与の観点から近年、磁化の比較的大きな金属強磁性体や正味の磁化が非常に小さな反強磁性体に対し、異常ネルンスト効果の研究が進められている^{6), 9)-16)}。一方、正味の磁化 M_{net} を合金組成比により変調可能で、 M_{net} が消失する磁化補償現象も生じ得る磁性体としてフェリ磁性合金薄膜があり、異常ネルンスト効果と磁化の相関についても検討が始められている¹⁸⁾。そこで、我々は副格子磁化が互いに反平行結合すると考えられる重希土類 (heavy Rare Earth: hRE) - 遷移金属 (Transition Metal: TM) GdFe フェリ磁性合金薄膜に着目した。本研究は、アモルファス GdFe フェリ磁性合金薄膜において(3)式で表される S_{ANE} と ρ_{AHE} の相関検討を目的とし、 S_{ANE} , ρ_{AHE} 、ゼーベック係数 S_{SE} , ρ_{xx} の GdFe 合金組成比依存性につき評価を行った。

2. 実験方法

2.1 GdFe フェリ磁性合金薄膜試料の作製および磁気特性評価

SiN(60 nm)/Gd_xFe_{100-x}(20 nm)/SiN(5 nm)/glass sub. ($x = 17, 20, 25, 30, 40, 50, 60$ at. %) をマグネトロンスパッタ法により

Corresponding author: Y. Kobayashi
(e-mail: csyu21012@g.nihon-u.ac.jp).

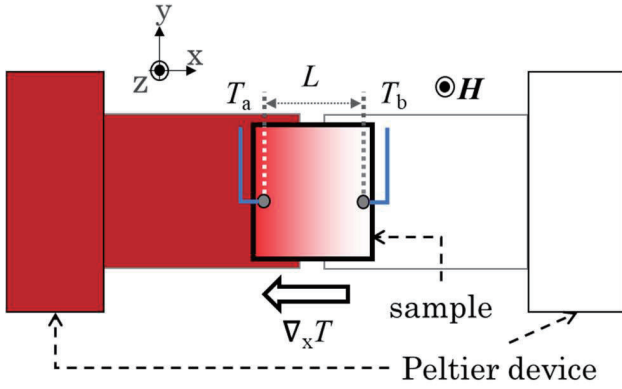


Fig. 1 Schematic illustration of temperature application device. Red (white) colored part means hotter (colder) area, and color gradation means temperature gradient.

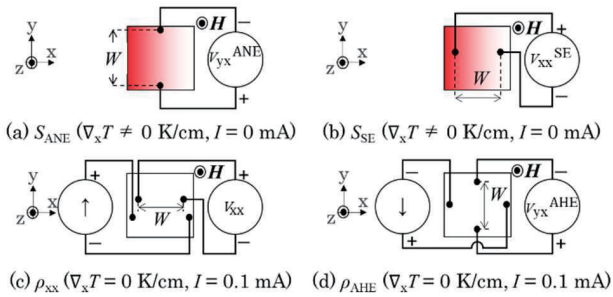


Fig. 2 Schematic illustrations of measurement set-up for (a) anomalous Nernst effect V_{yx}^{ANE} , (b) Seebeck effect V_{xx}^{SE} , (c) longitudinal voltage V_{xx} , and (d) anomalous Hall effect V_{yx}^{AHE} of Gd_xFe_{100-x} alloy thin films.

作製した。試料薄膜の磁気特性を超伝導量子干渉素子式試料振動型磁力計 (Super Quantum Interference Devices – Vibrating Sample Magnetometer: SQUID-VSM) を用いて測定した。

2.2 電流磁気現象に関わる物理定数の測定方法

Fig. 1 に試料への温度勾配印加機構を示す。試料両端基板下に設置したペルチェ素子により、膜面内 x 方向に温度勾配 $\nabla_x T$ を印加した。熱電対端子間距離を L とし、接触型熱電対を用いて試料両端温度 (T_a , T_b) を測定した。Fig. 2 に以下の各測定における直流電流源および電圧計の接続方法を示す。各測定において膜面垂直 z 方向に外部磁界 H を印加した。(a) 異常ネルンスト係数 $S_{ANE} : \nabla_x T$ を $-20, 0, 20$ K/cm とし、膜面内 y 方向の電圧 V_{yx}^{ANE} の外部磁界依存性を測定した。(b) ゼーベック係数 $S_{SE} : \nabla_x T$ を $-20, 0, 20$ K/cm とし、膜面内 x 方向の電圧 V_{xx}^{SE} の外部磁界依存性を測定した。(c) 電気抵抗率 $\rho_{xx} : \nabla_x T$ を 0 K/cm とし、 x 方向に $I=0.1$ mA を印加して、膜面内 x 方向の縦電圧 V_{xx} の外部磁界依存性を測定した。(d) 異常ホール抵抗率 $\rho_{AHE} : \nabla_x T$ を 0 K/cm とし、 x 方向に $I=0.1$ mA を印加して膜面内 y 方向の電圧 V_{yx}^{AHE} の外部磁界依存性を測定した。全ての測定は電極間距離を W 、試料温度 $T_b = 310$ K として測定を行った。ここで、アモルファス GdFe フェリ磁性合金薄膜では、各元素に由来すると考えられる副格子磁化の温度依存性の違いから元素比を変えるとその磁化特性が変わると考えられており、特に磁化補償温度近傍の試料温度で正味の磁化 M_{net} が急峻に変化

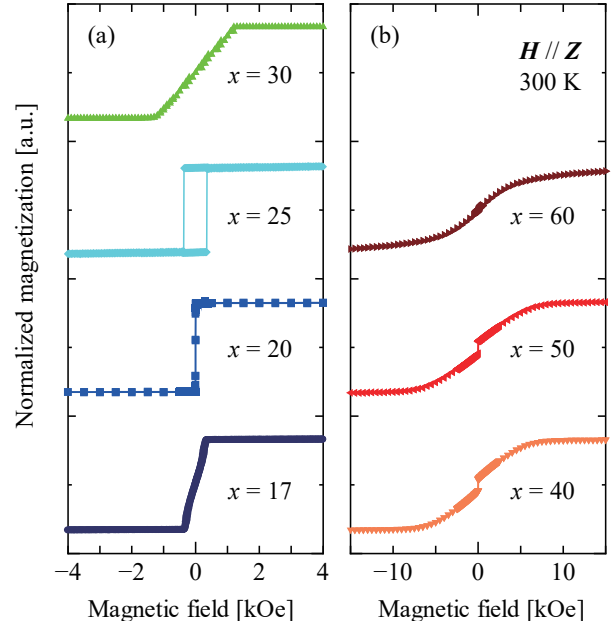


Fig. 3 Magnetic field dependence of normalized magnetization of Gd_xFe_{100-x} ((a) $17 < x < 30$ at. % and (b) $40 < x < 60$ at. %) alloy thin films at 300 K.

Table 1 Coercivity H_c and saturation magnetic field H_s of Gd_xFe_{100-x} (20 nm) alloy thin films.

Gd composition ratio x [at. %]	H_c, H_s [kOe]
17	$H_s = 0.3$
20	$H_c < 0.1$
25	$H_c = 0.4$
30	$H_s = 1.2$
40	$H_s = 6.0$
50	$H_s = 6.6$
60	$H_s = 8.7$

する。そのため、アモルファス GdFe フェリ磁性合金薄膜に温度勾配を与えた際、試料内の温度勾配に応じた M_{net} の変化も生じることが推測される。ただし、本研究では試料両端の温度差 $\Delta T = T_a - T_b$ は最大 5 K 程度であり、本連続薄膜における磁化は試料内で概ね一様であると仮定して検討を行った。

3. 実験結果

本章では、試料薄膜の磁化特性測定結果 (Fig. 3 および Fig. 4)、温度勾配印加時の横電圧 V_{yx}^{ANE} および縦電圧 V_{xx}^{SE} の外部磁界依存性 (Fig. 5)、直流電流印加時の縦電圧 V_{xx} および横電圧 V_{yx}^{AHE} の外部磁界依存性 (Fig. 6) について述べる。また、 V_{yx}^{ANE} , V_{xx}^{SE} , V_{xx} および V_{yx}^{AHE} の測定結果より求めた異常ネルンスト係数 S_{ANE} 、ゼーベック係数 S_{SE} 、電気抵抗率 ρ_{xx} 、および異常ホール抵抗率 ρ_{AHE} の GdFe 合金組成比依存性を Fig. 7 に示す。なお、熱電対を用い

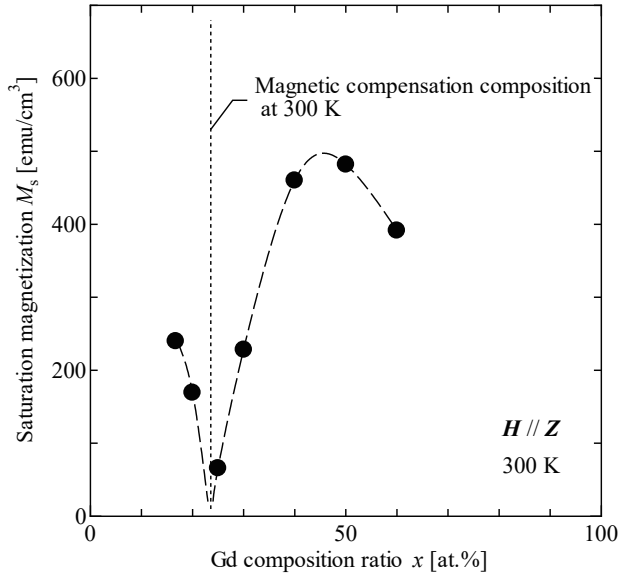


Fig. 4 Composition dependence of saturation magnetization M_s of Gd_xFe_{100-x} alloy thin films at 300 K. Solid line represents guide for eye.

た薄膜試料温度測定行為による試料温度の変化は、エラーバーの範囲であることを確認し測定を行った。

3.1 GdFe フェリ磁性合金薄膜試料の磁化特性評価

各試料薄膜の膜面垂直方向に外部磁界を掃引した際の 300 K における正味の磁化 M_{net} の外部磁界依存性を Fig. 3 に示す。Gd 組成 $x = 20, 25$ at. % で膜面垂直に、 $x = 17$ at. % および $x \geq 30$ at. % で膜面内に磁気異方性を有することを測定から確認した。ここで、垂直磁化膜 ($x = 20, 25$) の M_{net} の符号が変化する外部磁界を保磁力 H_c とした。また、面内磁化膜 ($x = 17, x \geq 30$) では、強磁性成分の最大値 M_s と各薄膜試料の外部磁界に対してなだらかに変化する磁界範囲 ($x = 17, 30$ at. % では $-0.5 < H < 0.5$ kOe, $x > 40$ at. % では $-6 < H < 6$ kOe) における磁化曲線の一次近似線の外挿との交点を飽和磁界 H_s とした。各試料薄膜の H_c, H_s を Table 1 に示す。

次に M_{net} の最大値 M_s の組成依存性を Fig. 4 に示す。Gd 組成 $x \leq 25$ at. % および $x \geq 50$ at. % では、 M_s は x の増加に伴い減少し、 $25 \leq x \leq 50$ at. % では、 M_s は x の増加に伴い増加した。GdFe フェリ磁性合金の Fe 由来の磁化と Gd 由来の磁化の大きさが等しい組成では、磁化補償が生じ正味の磁化 M_{net} が消失する。本試料群では $x = 25$ at. % で M_s が最小となることから $x = 25$ at. % 近傍に磁化補償組成が存在する。

3.2 異常ネルンスト係数 S_{ANE} の組成依存性

上記 2.2(a) で示した測定手法でアモルファス GdFe フェリ磁性合金薄膜の異常ネルンスト効果を測定した。z 方向に ± 6 kOe の範囲で外部磁界を印加し、温度勾配 $\nabla_x T = +20$ K/cm としたときの横電圧 V_{yx}^{ANE} の外部磁界依存性を Fig. 5 (a) に示す。正味の磁化 M_{net} のヒステリシス特性を反映した V_{yx}^{ANE} の外部磁界依存性が測定された。面内磁化膜 ($x = 17, x \geq 30$) では外部磁界に対して V_{yx}^{ANE} が単調に変化する領域が確認でき、垂直磁化膜 ($x = 20, 25$) では V_{yx}^{ANE} の遷移過程を含まない急峻な変化が顕わとなった。

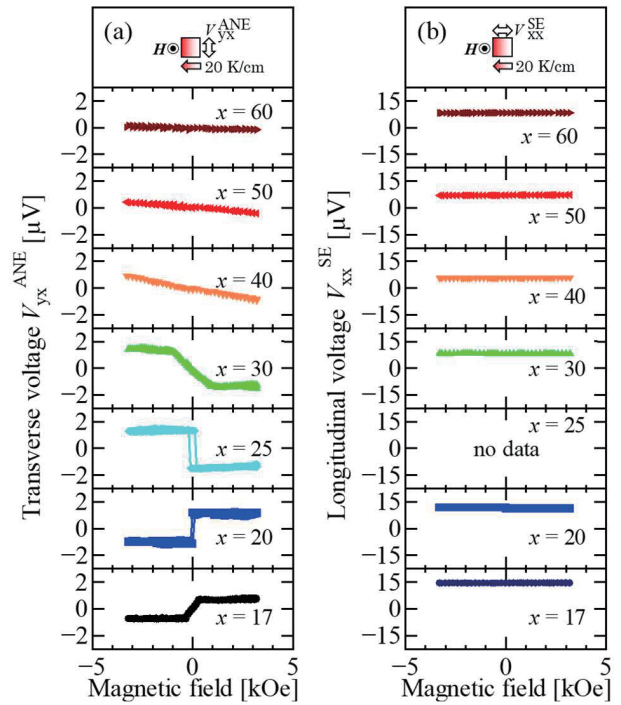


Fig. 5 Magnetic field dependence of (a) transverse voltage V_{yx}^{ANE} and (b) longitudinal voltage V_{xx}^{SE} of Gd_xFe_{100-x} alloy thin films at $\nabla_x T = +20$ K/cm, where the width W of the electrodes is 0.3 cm.

また、 $x \leq 40$ at. % では外部磁界に依らず V_{yx}^{ANE} が一定となる領域が顕わとなった。以上から、温度勾配と直交する磁化成分に起因する横電圧 V_{yx}^{ANE} が測定されたと考えられる。ここで、温度勾配 $\nabla_x T$ を与えた時の異常ネルンスト電圧 V_{ANE} を次式で定義する。

$$V_{ANE}(\nabla_x T) \equiv \frac{V_{yx}^{ANE}(\nabla_x T, +H_s') - V_{yx}^{ANE}(\nabla_x T, -H_s')}{2} \quad (4)$$

M_{net} が z 方向に飽和する磁界を H_s' とする。Fig. 3 より $x \leq 40$ at. % は外部磁界 $H = 3$ kOe において M_{net} が z 方向に平行であり、外部磁界に対する変化も十分小さい。従って、 $x \leq 40$ at. % では $H_s' = \pm 3$ kOe における横電圧 V_{yx}^{ANE} を用いて異常ネルンスト電圧 V_{ANE} を求めた。一方、 $x \geq 40$ at. % では各試料薄膜の飽和磁界 $H_s = H_s'$ における V_{ANE} を横電圧 V_{yx}^{ANE} の一次近似線から求めた。試料に与える $\nabla_x T$ を変化させて V_{ANE} を求めると、いずれの試料においても V_{ANE} は $\nabla_x T$ に比例することが分かった。これらのことから、アモルファス GdFe フェリ磁性合金薄膜において(1)式で表される温度勾配に起因し膜面垂直磁化に応じた横電界 E_{yx}^{ANE} が生じたと考えられる。

さらに、異常ネルンスト係数 S_{ANE} を次式で定義する。

$$S_{ANE} \equiv \frac{V_{ANE}(\nabla_x T)}{\nabla_x T \cdot W} \quad (5)$$

ここで W は電極間距離であり、本報告では $W = 0.3$ cm である。異常ネルンスト電圧 V_{ANE} の温度勾配依存性から各試料薄膜における S_{ANE} を求めた。 S_{ANE} の組成依存性を Fig. 7

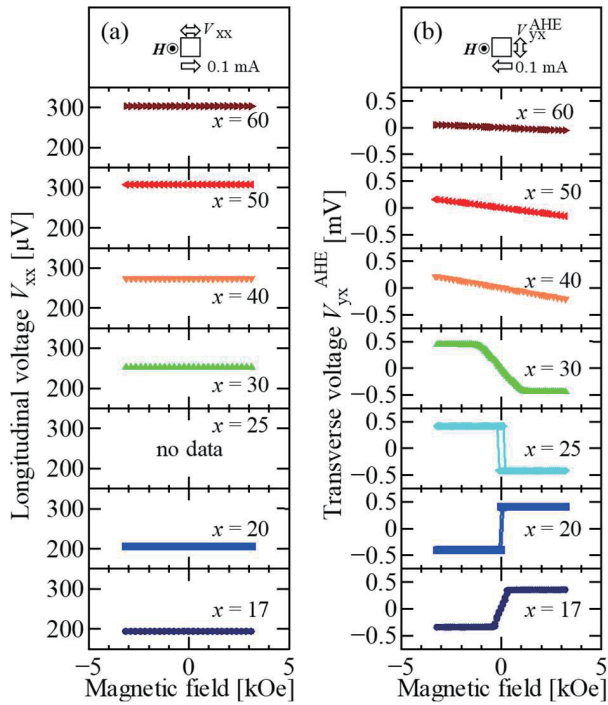


Fig. 6 Magnetic field dependence of (a) longitudinal voltage V_{xx} and (b) transverse voltage V_{yx}^{AHE} of Gd_xFe_{100-x} alloy thin films at $I = +0.1$ mA, where the width W of the electrodes is 0.3 cm.

(a)に示す. 室温における磁化補償組成 ($x \approx 25$ at.%) に比べ遷移金属の組成比が大きい試料 ($x < 25$ at.%) と希土類金属の組成比が大きい試料 ($x \geq 25$ at.%) で S_{ANE} の符号が反転した. この結果は hRE-TM 合金フェリ磁性体である TbFeCo 薄膜の異常ネルンスト係数が磁化補償組成を境に符号反転するという先行研究¹⁸⁾と同様の結果である. したがって, 本研究で用いたアモルファス GdFe フェリ磁性合金薄膜においても, Ando らの先行研究¹⁸⁾と同様に, 磁化補償組成を境に正味の磁化 M_{net} における優勢副格子磁化が変化し, Fe および Gd の副格子磁化と外部磁界の平行・反平行の関係が反転すると考えられる. すなわち, 本研究で得られた異常ネルンスト係数 S_{ANE} の符号反転は基準温度 310 K での優勢副格子磁化の違いから外部磁界と Fe と Gd の副格子磁化の向きが外部磁界方向に対してそれぞれ互いに反転したためであると考えられる.

次に, 異常ネルンスト係数の絶対値 $|S_{ANE}|$ の組成に対する変化に着目する. Gd 組成 $x \leq 40$ at. % で x の増加に伴い $|S_{ANE}|$ は増加し, $40 \leq x \leq 60$ at. % では x の増加に伴い $|S_{ANE}|$ が減少した. この結果と Fig. 4 を比べると, 本研究で用いたアモルファス GdFe フェリ磁性合金薄膜において, $|S_{ANE}|$ と M_{net} の組成に対する変化傾向が対応しないことがわかった.

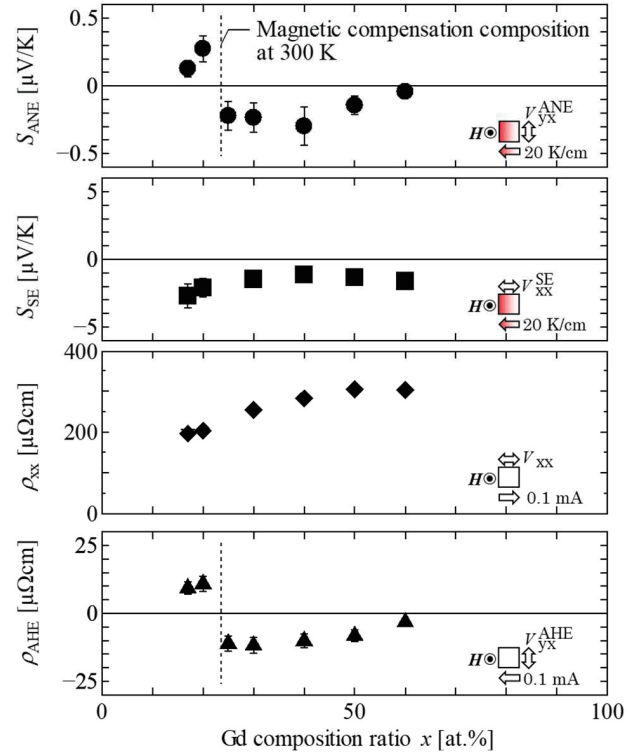


Fig. 7 Composition dependence of (a) anomalous Nernst coefficient S_{ANE} , (b) Seebeck coefficient S_{SE} , (c) resistivity ρ_{xx} , and (d) anomalous Hall resistivity ρ_{AHE} of Gd_xFe_{100-x} alloy thin films. Error bars are mainly derived from the accuracy of distance measurement.

3.3 ゼーベック係数 S_{SE} および電気抵抗率 ρ_{xx} の組成依存性

本節では温度勾配に起因する縦(ゼーベック)電圧 V_{xx}^{SE} と直流電流に起因する縦電圧 V_{xx} の測定結果につき検討する. ただし, 試料破損につき, Gd 組成 $x = 25$ at. % の試料薄膜における V_{xx}^{SE} と V_{xx} の測定結果は無記載とする. 上記 2.2 (b) で示した実験方法に従い, z 方向に ± 6 kOe の範囲で外部磁界を印加し, 温度勾配 $\nabla_x T = +20$ K/cm としたときの縦(ゼーベック)電圧 V_{xx}^{SE} の外部磁界依存性を Fig. 5 (b) に示す. いずれの試料においても, 磁界方向に依らず V_{xx}^{SE} の符号は変わらず, 外部磁界による V_{xx}^{SE} の変化率は 6 % 未満であった. 一方, Gd 組成 $x = 17$ at. % と $x = 40$ at. % の異なる組成の試料薄膜での V_{xx}^{SE} の変化率は 59 % である. 従って, Gd 組成 x による V_{xx}^{SE} の変化率に比べ外部磁界による V_{xx}^{SE} の変化は十分小さい. V_{xx}^{SE} の温度勾配依存性から各試料薄膜におけるゼーベック係数 S_{SE} を次式を用いて求めた.

$$S_{SE} = - \frac{V_{xx}^{SE}(\nabla_x T) - V_{xx}^{SE}(-\nabla_x T)}{2\nabla_x T \cdot W} \quad (6)$$

S_{SE} の組成依存性を Fig. 7 (b) に示す. 組成に依らず $S_{SE} < 0$ であることから, 温度勾配により生じる電流のキャリアは伝導電子であると考えられる.

次に、ゼーベック係数の絶対値 $|S_{SE}|$ の組成に対する変化に着目すると、 $x \geq 50$ at. %では x の増加に伴い $|S_{SE}|$ は増加し、 $17 \leq x \leq 40$ at. %で x の増加に伴い $|S_{SE}|$ が減少した。

上記2.2(c)で示した実験方法に従い、 z 方向に ± 6 kOeの範囲で外部磁界を印加し、 $\nabla_x T = 0$ K/cm、印加電流 $I = +0.1$ mAとしたときの縦電圧 V_{xx} の外部磁界依存性をFig. 6 (a)に示す。いずれの試料においても外部磁界による V_{xx} の変化率は0.2%未満であった。一方、Gd組成 $x = 17$ at. %と $x = 50$ at. %の異なる組成の試料薄膜での V_{xx} の変化率は37%であった。従って、Gd組成 x による V_{xx} の変化率に比べ外部磁界による V_{xx} の変化は十分小さい。また、各試料薄膜における電気抵抗率 ρ_{xx} を次式を用いて求めた。

$$\rho_{xx} = \frac{V_{xx} S}{I W} \quad (7)$$

S は試料薄膜の断面積であり、本報告では $S = 0.8 \times 10^{-6}$ cm²である。 ρ_{xx} の組成依存性をFig. 7 (c)に示す。 ρ_{xx} はGd組成 x の増加に伴い単調に増加した。

3.4 異常ホール抵抗率 ρ_{AHE} の組成依存性

更に、本試料系における異常ホール効果を測定した。上記2.2(d)で示した実験方法に従い、 $\nabla_x T = 0$ K/cm、印加電流 $I = +0.1$ mAとしたときの横電圧 V_{yx}^{AHE} の外部磁界依存性をFig. 6 (b)に示す。各試料薄膜において磁化 M_{net} の外部磁界に対するヒステリシス特性を反映した V_{yx}^{AHE} の外部磁界依存性が測定された。ここで、異常ホール電圧 V_{AHE} を(8)式のように外部磁界を反転して測定した V_{yx}^{AHE} の差で定義し、(9)式を用いて V_{AHE} から異常ホール抵抗率 ρ_{AHE} を求めた。

$$V_{AHE}(I) \equiv \frac{V_{yx}^{AHE}(I, +H_s') - V_{yx}^{AHE}(I, -H_s')}{2} \quad (8)$$

$$\rho_{AHE} \equiv \frac{V_{AHE} \cdot S}{I \cdot W} \quad (9)$$

ρ_{AHE} の組成依存性をFig. 7 (d)に示す。室温における磁化補償組成($x \approx 25$ at. %)に比べ遷移金属の組成比が大きい試料($x < 25$ at. %)と希土類金属の組成比が大きい試料($x \geq 25$ at. %)で ρ_{AHE} の符号が反転した。次に、異常ホール抵抗率の絶対値 $|\rho_{AHE}|$ の組成に対する変化に着目する。Gd組成 $x \leq 20$ at. %では、 x の増加に伴い $|\rho_{AHE}|$ は増加し、 $30 \leq x \leq 60$ at. %において x の増加に伴い $|\rho_{AHE}|$ は減少した。

4. GdFeフェリ磁性合金薄膜における異常ネルンスト係数 S_{ANE} への異常ホール抵抗率 ρ_{AHE} の寄与

本節ではアモルファスフェリ磁性合金薄膜における異常ネルンスト係数 S_{ANE} への異常ホール抵抗率 ρ_{AHE} の寄与につき検討を行う。異常ホール効果と異常ネルンスト効果は、いずれも磁性体内を運動する電子の散乱方向が磁化方向に依存して偏極することに由来する。アモルファスGdFeフェリ磁性合金薄膜においても、温度勾配を印加した際の横電圧 V_{yx}^{ANE} と直流電流を印加した際の横電圧 V_{yx}^{AHE} はともに正味の磁化 M_{net} のヒステリシス特性を反

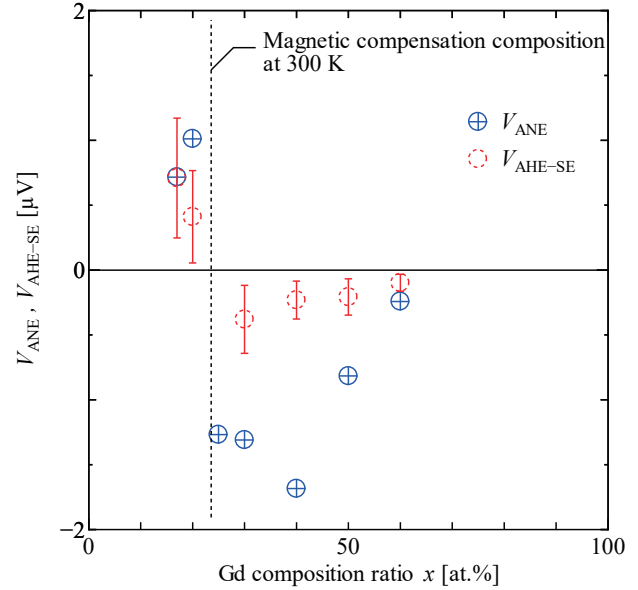


Fig. 8 Composition dependence of anomalous Nernst voltage V_{ANE} and Seebeck-driven anomalous Hall voltage V_{AHE-SE} of Gd_xFe_{100-x} alloy thin films.

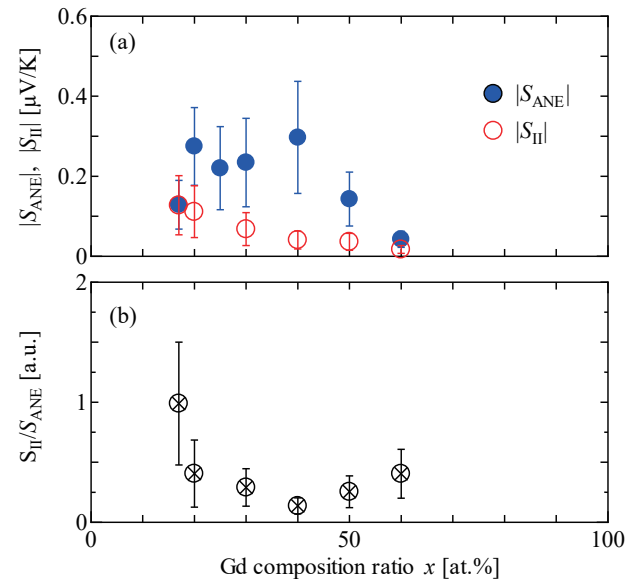


Fig. 9 Composition dependence of (a) absolute value of anomalous Nernst coefficient $|S_{ANE}|$, second term $|S_{II}|$, and (b) ratio of S_{ANE} and S_{II} (S_{II} / S_{ANE}) of Gd_xFe_{100-x} alloy thin films.

映した外部磁界依存性が測定された。また、 S_{ANE} と ρ_{AHE} の組成依存性において符号反転が同様に生じ、 $|S_{ANE}|$ と $|\rho_{AHE}|$ の組成に対する変化傾向が類似する。これらのことから本報告で用いたアモルファスGdFeフェリ磁性合金薄膜においても異常ホール効果と異常ネルンスト効果に相関があると考えられる。ここで、抵抗率 ρ_{xx} をもつ試料薄膜において温度勾配と同方向に流れる電流による異常ホール効果により異常ネルンスト電圧 V_{ANE} が生じる状況を仮定する。(6)式に従うと試料に温度勾配 $\nabla_x T$ を与えた時の $\nabla_x T$ と平行方向に生じるゼーベック電流 i_{xx}^{SE} は次式のように考えられる。

$$i_{xx}^{SE}(\nabla_x T) = -\alpha_{xx}\nabla_x T = -\frac{S_{SE}}{\rho_{xx}}\nabla_x T \quad (10)$$

(10)式と各試料薄膜のゼーベック係数 S_{SE} 、電気抵抗率 ρ_{xx} を用いると、それぞれの組成において i_{xx}^{SE} は80~250 mA/cm²と見積もられる。また、ゼーベック電流 i_{xx}^{SE} による異常ホール効果に起因して生じる電圧 V_{AHE-SE} は次式を用いて見積もられる。

$$V_{AHE-SE} = \rho_{AHE} i_{xx}^{SE} W \quad (11)$$

上記3.1で求めた異常ネルンスト電圧 V_{ANE} と V_{AHE-SE} の組成依存性をFig. 8に示す。いずれの試料においても、 $|V_{ANE}| \geq |V_{AHE-SE}|$ である。このことから、アモルファス GdFe フェリ磁性合金薄膜に温度勾配を与えた場合でも(3)式右辺第二項に起因する横電圧が生じると考えられる。

次に、アモルファス GdFe フェリ磁性合金薄膜における異常ネルンスト係数 S_{ANE} と(3)式右辺第二項 S_{II} の相関検討を行う。異常ホール抵抗率 ρ_{AHE} と、ゼーベック係数 S_{SE} 、電気抵抗率 ρ_{xx} を用いて次式より各組成における S_{II} を求めた。

$$S_{II} = -\rho_{AHE}\alpha_{xx} = -S_{SE}\frac{\rho_{AHE}}{\rho_{xx}} \quad (12)$$

$|S_{ANE}|$ と $|S_{II}|$ の組成依存性をFig. 9(a)に示す。 S_{ANE} および S_{II} はGd組成 $x \leq 20$ at. %ではともに正であり、 $30 \leq x \leq 60$ at. %ではともに負である。すなわち S_{ANE} と S_{II} は組成変化に伴い同様の符号反転を示す。ここで、 S_{II} と S_{ANE} の組成依存性を比較すると、Fig. 9(b)に示したように、いずれの試料においても S_{II}/S_{ANE} は13%以上であり、 S_{II} はいずれの組成比でも存在すると言える。このことから、アモルファス GdFe フェリ磁性合金薄膜の異常ネルンスト効果が(3)式に従う場合、 S_{ANE} に $S_{II} = -\rho_{AHE}\alpha_{xx}$ に起因する異常ネルンスト成分の寄与が含まれると考えられる。一方、同じく(3)式が成り立つ場合、 S_{II}/S_{ANE} が組成依存性を持つことから、組成変化する S_I の寄与もあり S_I が磁化方向に依存することが推測されるが、 α_{xy}^* の組成による変化等については継続検討が必要である。

5. まとめ

アモルファス GdFe フェリ磁性合金薄膜における異常ネルンスト効果への異常ホール効果の寄与を明らかにすることを目的とした。そのため、磁気特性および電流磁気現象に関わる物性定数の組成依存性につき評価・検討を行った。アモルファス Gd_xFe_{100-x} フェリ磁性合金薄膜において、温度勾配を印加した際の横電圧 V_{xx}^{ANE} および直流電流を印加した際の横電圧 V_{yx}^{AHE} は、正味の磁化 M_{net} のヒステリシス特性を反映した外部磁界依存性を示した。これらの結果から異常ネルンスト係数 S_{ANE} と異常ホール抵抗率 ρ_{AHE} を求めたところ、符号変化も含め S_{ANE} と ρ_{AHE} は同様の組成依存性を示した。このことからアモルファス GdFe フェリ磁性合金薄膜における異常ネルンスト効果と異常ホール効果に相関がみられた。

次に、ゼーベック電流による異常ホール効果に起因する異常ネルンスト成分 S_{II} の S_{ANE} への寄与について検討した。 S_{II} はゼーベック係数、電気抵抗率、および異常ホール抵抗率より見積もった。 S_{II} の組成依存性と S_{ANE} の組成依存性を比較すると、 S_{II} はいずれの組成比でも存在し、組成変化に伴い S_{ANE} と同様の符号変化を示した。また、Gd組成比が小さい組成で S_{II} が支配的であることがわかった。これらのことから、アモルファス GdFe フェリ磁性合金薄膜において、 ρ_{AHE} の存在により異常ネルンスト電圧が生じ得ることを示した。

謝辞 本研究の一部は、JSPS 科研費(21K04184)の助成により行った。

References

- 1) X. L. Shi, J. Zou, and Z. G. Chen: *Chem. Rev.*, **120**, 7399–7515 (2020).
- 2) M. Mizuguchi, and S. Nakatsuji: *Sci Technol Adv Mater.*, **20**, 1, 262–275 (2019).
- 3) Y. Sakuraba, K. Hasegawa, M. Mizuguchi, T. Kubota, S. Mizukami, T. Miyazaki, and K. Takanshi: *Appl. Phys. Express.*, **6**, 033003 (2013).
- 4) H. Narita, M. Ikhlas, M. Kimata, A. A. Nugroho, S. Nakatsuji, and Y. Otani: *Appl. Phys. Lett.*, **111**, 202404 (2017).
- 5) K. Uchida, and R. Iguchi: *J. Phys. Soc. Jpn.*, **90**, 122001 (2021).
- 6) W. Zhou, K. Yamamoto, A. Miura, R. Iguchi, Y. Miura, K. Uchida, and Y. Sakuraba: *Nat. Mater.*, **20**, 463–467 (2021).
- 7) A. W. Smith: *Phys. Rev.*, **33**, 295–306 (1911).
- 8) T. Miyasato, N. Abe, T. Fujii, A. Asamitsu, S. Onose, N. Nagaosa, and Y. Tokura: *Phys. Rev. Lett.*, **99**, 086602 (2007).
- 9) R. Ramos, M. H. Aguirre, A. Anadón, J. Blasco, I. Lucas, K. Uchida, P. A. Algarabel, L. Morellón, E. Saitoh, and M. R. Ibarra: *Phys. Rev. B*, **90**, 054422 (2014).
- 10) R. Ramos, P. Wongjom, R. Iguchi, A. Yagmur, Z. Qiu, S. Pinitsoontorn, K. Uchida, and E. Saitoh: *J. Magn. Magn. Mater.*, **447**, 134–138 (2018).
- 11) M. Ikhlas, T. Tomita, T. Koretsune, M. Suzuki, D. Nishio-Hamane, R. Arita, Y. Otani, and S. Nakatsuji: *Nat. Phys.*, **13**, 1085–1090 (2017).
- 12) S. N. Guin, K. Manna, J. Noky, S. J. Watzman, C. Fu, N. Kumar, W. Schnelle, C. Shekhar, Y. Sun, J. Gooth, and C. Felser: *NPG Asia Mater.*, **11**, 16 (2019).
- 13) T. Chen, T. Tomita, S. Minami, M. Fu, T. Koretsune, M. Kitatani, M. Ikhlas, D. Nishio-Hamane, R. Ishii, F. Ishii, R. Arita, and S. Nakatsuji: *Nat. Commun.*, **12**, 572 (2021).
- 14) J. Hu, Y. Zhang, X. Huo, N. Li, S. Liu, D. Yu, J. P. Ansermet, S. Granville, and H. Yu: *IEEE Magn. Lett.*, **13**, 4503605 (2022).
- 15) J. Weischenberg, J. Weischenberg, F. Freimuth, S. Blugel, and Y. Mokrousov: *Phys. Rev. B*, **87**, 060406 (2013).
- 16) K. Hasegawa, M. Mizuguchi, Y. Sakuraba, T. Kamada, T. Kojima, T. Kubota, S. Mizukami, T. Miyazaki, and K. Takanshi: *Appl. Phys. Lett.*, **106**, 252405 (2015).
- 17) K. Uchida, T. Kikkawa, T. Seki, T. Oyake, J. Shiomi, Z. Qiu, K. Takanshi, and E. Saitoh: *Phys. Rev. B*, **92**, 094414 (2015).
- 18) R. Ando, T. Komine, and Y. Hasegawa: *J. Elec. Mater.*, **45**, 7, 3570–3575 (2016).
- 19) T. C. Chuang, P. L. Su, P. H. Wu, and S. Y. Huang: *Phys. Rev. B*, **96**, 174406 (2017).
- 20) R. Ando, T. Komine: *AIP Adv.*, **8**, 056326 (2018).

2022年11月14日受理, 2023年3月1日採録