

実験レポート

2024 年度

電気電子情報工学実験Ⅱ,Ⅲ(a)

学籍番号 22220038

氏名 浅井満帆

実験番号 2.3

実験題目 磁気センサー

実験班 A

共同実験者 阿井隆人 阿曾隼哉

実験日 5月7、14、21、28日

提出締切日 6月4日

提出日 6月17日

チェック欄			点数
合 ・ 否 月 日	合 ・ 否 月 日	合 ・ 否 月 日	

1. 目的

ホールセンサー、異方性磁気抵抗 (Anisotropic Magneto-Resistance: AMR) センサー、トンネル磁気抵抗 (Tunnel Magneto-Resistance: TMR) センサーに磁場を印加し、ホール電圧や抵抗値の磁場依存性を測定することで磁場感度を評価・比較することである。

2. 序論と基礎

身の回りには様々な磁気現象が関わっている。たとえばモーターや発電機には永久磁石が必要不可欠であり、変圧器には透磁率の高い磁性材料が使われている。また、ハードディスク、磁気カード、磁気抵抗ランダムアクセスメモリでは磁性体の磁化方向が情報として利用されている。

この実験ではこれらの磁気現象の検出に不可欠となる磁気センサーについて実験した。

・磁気的基础

物質中の磁束密度 \mathbf{B} や磁場 \mathbf{H} は以下の関係で表される。

$$\mathbf{B} = \mu_0(\mathbf{H} + \mathbf{M}) \cdots (1)$$

ここで、 \mathbf{M} を磁化と呼ぶ。磁化は物質の磁気的な性質を表す物理量であり、真空中では0となる。以降では、磁化がどのような物理量であるかを説明する。

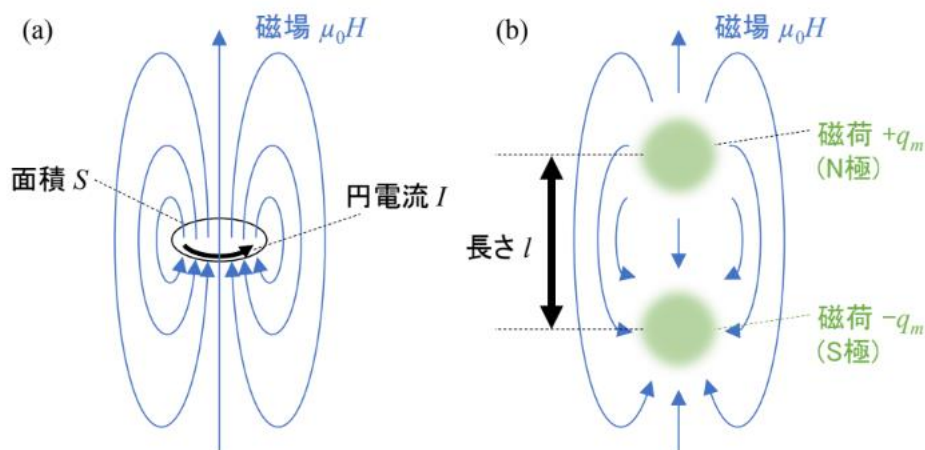


図 1: (a) 円電流によって生じる磁場の分布。(b) 長さ l 離れた正負の磁荷 $\pm q_m$ により発生する磁場分布。

面積 S の単一円形コイルに電流が流れると、それによって周囲に磁場が発生する(図 1)。すると、円電流の上側から磁力線が湧き出し、下側に吸い込まれる。この時、コイルから十分離れた場所の磁場分布は距離 l だけ隔てて正の磁荷 $+q_m$ (N 極) と負の磁荷

$-q_m$ (S 極) のペアで構成される磁石が発する磁場分布と一致する。このような磁石の強さを表す物理量として磁気モーメント m があり、以下の式で表される。

$$m = IS = q_m l \cdots (2)$$

長さ l や磁荷 q_m が増大すればそれに伴い磁気モーメントも増大するので、磁気モーメントは磁石の大きさや数に比例する物理量である(示量性変数と呼ぶ)。一方、物質の特性を理解するには大きさや数によらず物質で決まる物理量が重要である(示強性変数と呼ぶ)。そこで、磁気モーメントを体積 V で割った密度を考える。

$$M = \frac{m}{V} (3)$$

この M を磁化と呼ぶ。磁場が小さい範囲では磁化は外部磁場 H に比例するため、磁気感受率 χ を用いて以下のように記述される。

$$M = \chi H \cdots (4)$$

Fe, Ni, Co のような磁石(強磁性体と呼ぶ)は小さな磁場で大きな磁化を生じるため、磁気感受率が高い。このような強磁性体の磁化は電子のスピンが起源となっている。電子は荷電粒子であるため、角運動量(スピン)を持つと図 1 に示すように円電流が流れているとみなせる。これが電子の磁気モーメントとなり、強磁性体では多くの電子スピンの同じ方向に揃いやすいため大きな磁化を持つ。

・ホールセンサー

ここではホールセンサーの動作原理であるホール効果について説明する。 x 方向に電流が流れている状態で、電流と垂直な方向(z 方向)に磁場を印加すると、 y 方向に起電力が生じる。この現象をホール効果と呼び、エドウィン・ホールによって発見された。この起電力は運動する電荷が磁場によって一方向の力(ローレンツ力)を受けて、固体の面に集まることによって生じる(図 2)。このとき、電荷による電場が生じる力とローレンツ力がつり合う。物質中のキャリア(電子や正孔)が電磁場から受ける力は以下のように表される。

$$m \frac{dv}{dt} = q(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}) \cdots (5)$$

ここで、電荷を q , 質量を m , 速度を \mathbf{v} , キャリアに作用する電場と磁束密度をそれぞれ \mathbf{E} と

B とした。(なお、通常の電気伝導の議論では緩和時間を考慮するが、ホール電圧は緩和時間の影響を受けないためここでは議論しない。)定常状態では $\frac{dv}{dt} = 0$ となるので、電場の y 成分(ホール電場)は以下のようになる。

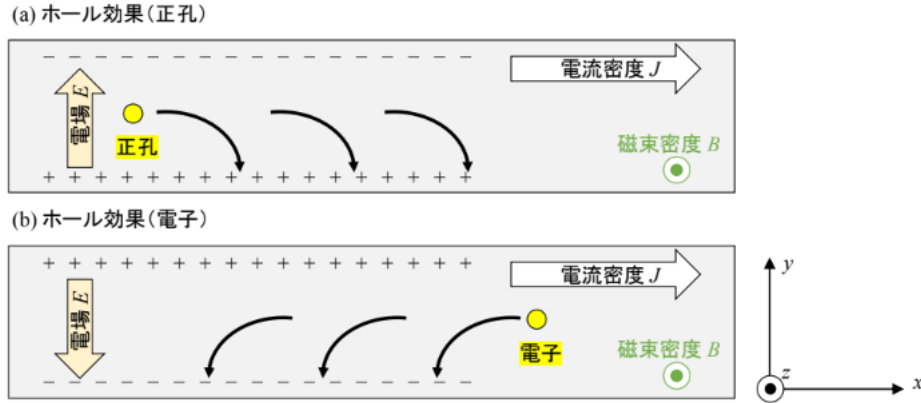


図 2: 磁束密度に対して垂直な方向に電流を流したときの (a) 正孔および (b) 電子が作るホール電場。

$$E_y = v_x B_z \cdot \cdot \cdot (6)$$

ここで、添え字はそれぞれの方向成分を表す。速度 \boldsymbol{v} と電流密度 \boldsymbol{J} は単位時間に単位面積を通過する電気量であるため、 $\boldsymbol{J} = nq\boldsymbol{v}$ の関係がある。したがって、ホール電場は以下のようになる。

$$E_y = \frac{J_x B_z}{nq} = R_H J_x B_z \quad \left(R_H \equiv \frac{1}{nq} \right) \cdot \cdot \cdot (7)$$

ここで、 R_H はホール係数である。ホール係数は電子では $R_H < 0$ 、正孔では $R_H > 0$ である。抵抗率 ρ を用いて表される微分系のオームの法則 $E_x = \rho J_x$ と式(7)をまとめると、電場と電流の関係は以下のように記述される。

$$\begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \rho & -R_H B_z \\ R_H B_z & \rho \end{pmatrix} \begin{pmatrix} J_x \\ J_y \end{pmatrix} \cdot \cdot \cdot (8)$$

もしくは

$$\boldsymbol{E} = \tilde{\rho} \boldsymbol{J} \cdot \cdot \cdot (9)$$

ここで、 $\bar{\rho}$ は電気抵抗率テンソルである。

また、ホール効果の特徴づけるもう一つの物理量をホール角 θ と呼ぶ。ホール角は x 方向の電場 E_x と y 方向の電場 E_y の比の逆正接であるため、以下のように表される。

$$\tan \theta = \frac{E_y}{E_x} = \frac{\sigma B_z}{nq} \cdots (10)$$

ここで、 $\sigma = \frac{1}{\rho}$ は電気伝導率である。式(7)や式(10)からわかるように、ホール電場は磁束密度の面に垂直な成分に比例する。また、キャリア密度に逆比例するため、半導体の様なキャリアの少ない材料で大きな効果が得られる。さらに、キャリアの電荷符号にも依存するため、キャリアが電子の場合と正孔の場合で発生するホール電圧の符号が変わる(図 2)。ホール電場が決まればホールセンサーの導線幅 w を用いることでホール電圧 V_H が決まる。

$$V_H = E_y w = w R_H J_x B_z \cdots (11)$$

式 (11) からわかるように、素子の特徴である w や R_H は変わらないので、外部から印加する電流(もしくは電圧)を一定に保つと磁束密度の面に垂直な成分とホール電圧が一对に対応する。このことを利用すると、磁場のセンサーとして用いることができる。このように、ホール効果を利用した磁場センサーをホールセンサーと呼ぶ。ホールセンサーは現在までに様々な用途で使われている。

・異方性磁気抵抗センサー

ここでは、異方性磁気抵抗 (Anisotropic Magneto-Resistance: AMR) センサーの原理である AMR 効果について説明する。AMR 効果はウィリアム・トムソン(=ケルビン卿)により発見された現象である。

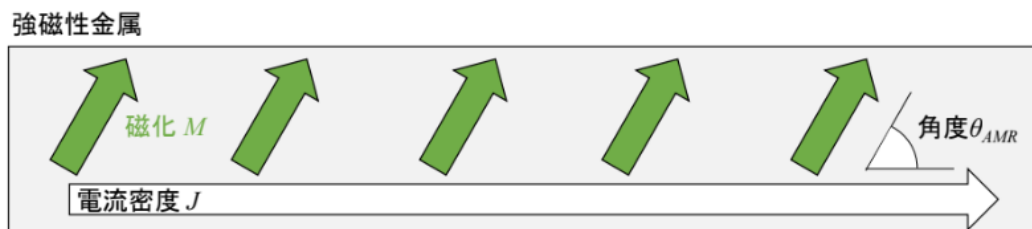


図 3: 強磁性金属中に電流を流したときの様子。磁化と電流密度のなす角は θ_{AMR} である。

次に、強磁性体に電流を流すことを考える(図 3)。電子が強磁性体中を伝搬するとき、

散乱確率が強磁性体の磁化の方向に依存して変化する。これにより、強磁性体の抵抗値が磁化の方向によって変化する。この現象を異方性磁気抵抗(AMR)効果と呼ぶ。「異方性」とは、「方向によって異なる」ことを意味する言葉である。AMR 効果では、電流と磁化が平行な時の抵抗率 ρ_{\parallel} と垂直な時の抵抗率 ρ_{\perp} が異なる。そのため、微分系のオームの法則は以下ようになる。

$$E = \rho_{\perp} J + (\rho_{\parallel} - \rho_{\perp}) J \cos^2 \theta_{AMR} \cdots (12)$$

ここで、 θ_{AMR} は電流密度と磁化のなす角である。外部磁場を強磁性体に印加すると、磁化は外部磁場の方向に揃おうとする。したがって、式(12)より、電流密度と外部磁場が平行な時は $\theta_{AMR} = 0$ なので抵抗率は ρ_{\parallel} 、垂直な場合は $\theta_{AMR} = \pi/2$ なので抵抗率は ρ_{\perp} となる。磁場を印加していない場合は磁化が様々な方向を向いているので、全ての角度 $\theta_{AMR} = 0 \sim 2\pi$ にわたって $\cos^2 \theta_{AMR}$ を平均すると $1/2$ となり、抵抗率は $(\rho_{\parallel} - \rho_{\perp})/2$ という平行と垂直な場合の中間の抵抗率となる。

この AMR 効果を利用した磁気センサーを AMR センサーと呼ぶ。強磁性体の磁化方向は外部磁場の方向に向くので、素子の抵抗変化を検出すれば印加されている磁場やその方向が分かる。

・トンネル磁気抵抗センサー

ここではトンネル磁気抵抗センサーの原理であるトンネル磁気抵抗効果について議論する。図 4 は素子の概念図であり、強磁性金属|非磁性体|強磁性金属というナノメートルサイズの三層構造で構成される。非磁性体とは強磁性体でない物質を意味する。図 4(a) に示すように上下の磁化方向が両方とも右を向いている場合、上の強磁性金属における伝導電子の磁気モーメントも右を向いている。この電子が下の強磁性金属に伝搬するとき、下の磁化も右を向いているため容易に伝搬できる。一方、図 4(b) に示すように下の磁化のみ左を向いている場合、右向きの磁気モーメントを持つ伝導電子は下の強磁性金属に伝搬しにくくなる。そのため、上下 2 つの強磁性体の磁化が平行な場合と反平行な場合で抵抗値が変化する。この現象を「巨大磁気抵抗効果」といい、アルベール・フェールとペーター・グリュンベルクによって発見された。特に、非磁性層を非磁性「絶縁体」にすると抵抗値の変化が飛躍的に増大する。この現象を「トンネル磁気抵抗効果 (Tunnel Magneto-Resistance: TMR) 効果」と呼ぶ。この現象は、絶縁体層を伝導電子がトンネル効果により伝搬することからこのような名前で呼ばれている。また、図 4 の素子を磁気トンネル接合と呼ぶ。磁気トンネル接合では、上の強磁性層の様に磁化が動かない層を磁化固定層、下の強磁性層の様に磁化が動ける層を磁化自由層と呼ぶ。

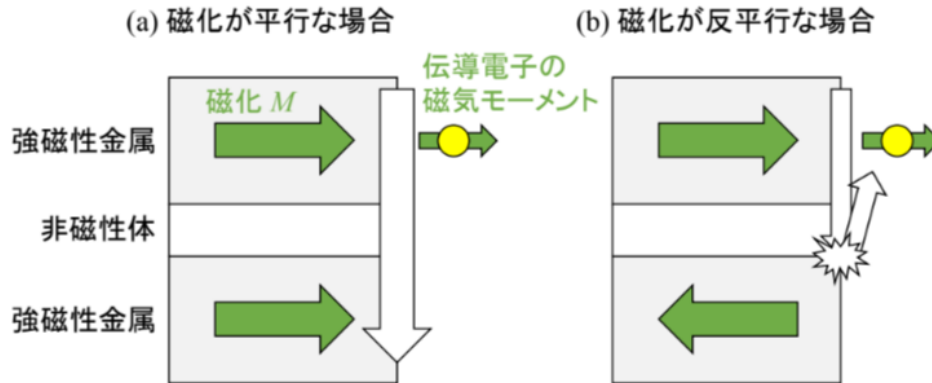


図 4: 磁気トンネル接合の概念図。(a) 上下の磁化が平行の場合は伝導電子が流れやすい。(b) 上下の磁化が反平行の場合は伝導電子が流れにくい。

ここでは、磁化固定層の磁化が $+x$ 方向に向いているとする。この時、磁化自由層の磁化の x 成分を M_x とすると、磁気トンネル接合の電気伝導度 G は以下のように表される。

$$G = G_0 \left(1 + \frac{M_z}{M} g \right) \cdot \cdot \cdot (13)$$

ここで、 $G_0 = (G_P + G_{AP})/2$ 、 $g = (G_P - G_{AP})/(G_P + G_{AP})$ であり、 G_P と G_{AP} はそれぞれ平行時と反平行時の電気伝導度である。実際に、式(13)に磁化の x 成分を代入すると、平行状態では $M_x = +M$ となるので $G = G_P$ となり、反平行状態では $M_x = -M$ となるので $G = G_{AP}$ となる。なお、磁化自由層と磁化固定層のなす角を θ_{TMR} とすると、 $M_x = M \cos \theta_{TMR}$ と書ける。

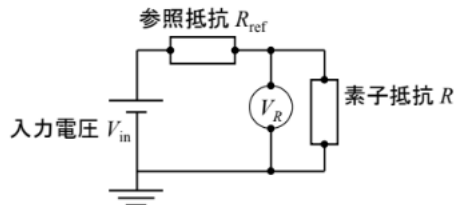
この TMR 効果を利用した磁気センサーを TMR センサーと呼ぶ。これも AMR センサーと同様に素子の抵抗変化(伝導度変化)を検出することで磁場を検出することができる。ただし、AMR センサーとは磁化方向と抵抗値の関係が異なることに注意が必要である。

3. 実験方法

課題 1.

素子の抵抗を測定することを考える。図 5(a) に素子の測定に用いる回路を示す。この回路における素子抵抗 R を入力電圧 V_{in} 、測定電圧 V_R 、参照抵抗 R_{ref} を用いて表した。

(a)抵抗測定回路



(b)ホール電圧測定回路

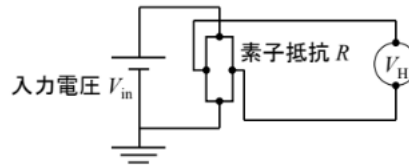


図 5 : (a)抵抗測定回路 (b)ホール測定回路

課題 2.

抵抗測定する回路について考える。回路の部品には図 6 のような部品を用いる。図 6(a)は同軸ケーブルと呼び、中心導線と外側導線に分かれている。通常は中心導線を陽極、外側導線を陰極として用いる。回路の分岐には分岐素子を用いる(図 6(b))。分岐素子も中心導線と外側導線に分かれている。素子へ接続する際は同軸ケーブルをバナナ端子と呼ばれる端子に変換する(図 6(c))。この素子は赤が陽極、黒が陰極となっている。バナナ端子の反対側の端子を素子に接続する(図 6(d))。

図 7 は図 5(a) の回路を図 6 に示すケーブルや素子を使って表した実体図である。左側に示す装置は電圧入出力に用いる装置で、同軸ケーブルを用いて接続するため、陽極と陰極が平行に接続される。同様に、ホール測定の回路(図 5(b))も実体図を描くことができる。図 7 を参考に、ホール測定に必要な回路を図 8 に書き足した。ただし、図 8 に示すホール素子の上側と下側を電流入力の陽極と陰極、素子の左側と右側をホール端子の陽極と陰極とし、ホール端子の陽極と陰極をそれぞれ電圧計 V_A と V_B の中心線に接続すること。



図 6: (a) 同軸ケーブル (b) 分岐素子 (c) 同軸ケーブル-バナナ端子変換素子 (d) バナナ端子-ソケット

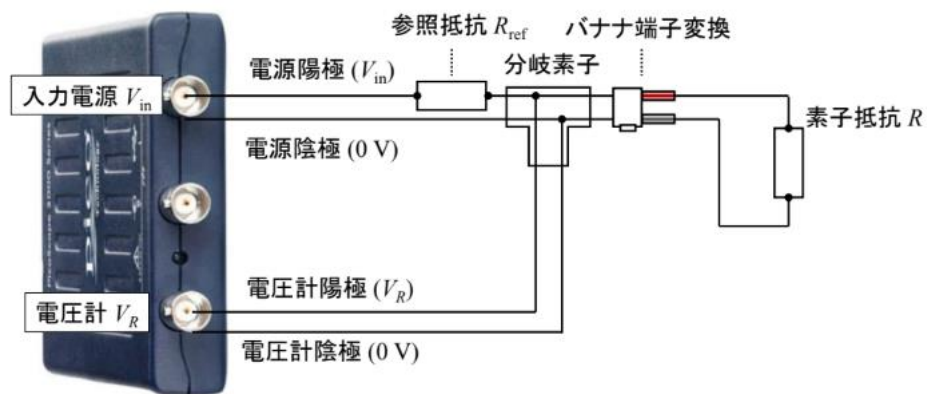


図 8: ホール測定の実体図

課題 3.

式(12)を電圧と電流の式に直すと、素子の抵抗 R は $R = R_0(1 + c_{AMR}\cos^2\theta_{AMR})$ となる。
抵抗値 R_0 を 1 k Ω 、定数 c_{AMR} の大きさを 0.01 として、横軸 θ_{AMR} ($^\circ$)、縦軸抵抗値 R (k Ω)

としたグラフを作成した。

課題 4.

式 (13) を電圧と電流の式に直すと、素子の抵抗 R は $R = R_0(1 + g\cos\theta_{TMR})^{-1}$ となる。 θ_{TMR} は磁化固定層と磁化自由層の磁化の相対角である。抵抗値 R_0 を $1\text{ k}\Omega$ 、定数 g の大きさを 0.1 として、横軸 θ_{TMR} ($^\circ$)、縦軸抵抗値 $R(\text{k}\Omega)$ としたグラフを作成せよ。

注意事項：素子は非常に小さい電極と細いワイヤーが接続されている。直接触れたり、落下などで大きな衝撃を与えたりすると簡単に断線して実験が大幅に遅くなるため注意すること。

課題 5.

高透磁率材料である $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ (パーマロイと呼ぶ) にワイヤーが巻かれたコイルがある。コイルは配線を 4 重にしてあり、合計 300 巻き以上である。コイルは次第に緩んでしまうので、絶縁性テープであるカプトンテープで固定しながら巻かれている。コイル導線の両端はバナナ端子に接続されており、これを電源に接続する。ここで、陽極は赤、陰極は黒の端子である。電流が陽極から陰極に流れるときに磁場が鉛直上向きに印加されるように端子を接続すること。出来上がったものは写真で撮り、レポートに含めた。

課題 6.

課題 2 で検討したホール電圧の測定回路を作製せよ。素子への接続は、図 9(a) に示す赤と黒の箇所に陽極と陰極の端子を接続する。なお、 V_{H+} や V_{H-} はホール電圧測定端子、 V_{in+} や V_{in-} は入力端子である。出来上がったものは写真で撮り、レポートに含めた。

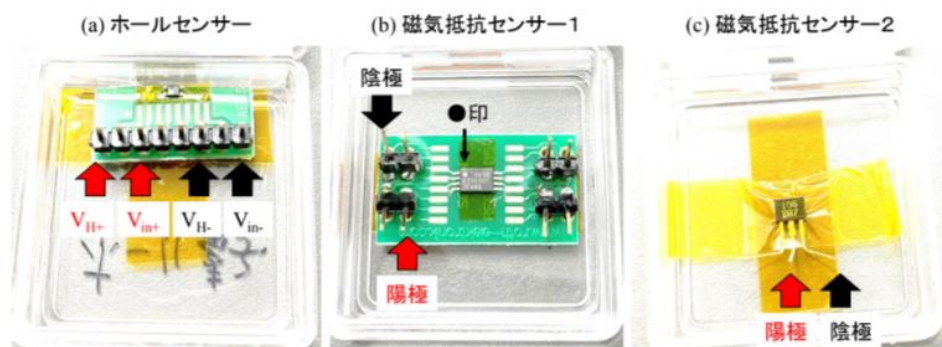


図 9: (a) ホールセンサー (b) 磁気抵抗センサー1 (c) 磁気抵抗センサー2

課題 7.

二枚重ねの永久磁石を水平な机の上に直接置き、N 極と S 極の表面にホールセンサーを近づけて、ホール電圧を測定せよ。ホールセンサーの面に垂直な方向に磁場がかかるようにすること。電圧計の設定は、測定レンジを 1 V、出力電圧を 1 V(直流)とすること。測定は(時間のレンジを 100 ms/div とすること)1 秒間行い、データを csv ファイルで出力する。得られたデータの平均と標準偏差を評価し、それらを

ホール電圧 (N)=平均 ± 標準偏差

ホール電圧 (S)=平均 ± 標準偏差

という形で実験ノートに書いた。単位も忘れず付けた。

課題 8.

式 (11) からわかるように、ホール電圧は磁束密度に比例する。永久磁石表面の磁束密度の大きさが 90 mT とする。このとき、測定される磁束密度 B_z とホール電圧 V_H の関係を示した。

$$B_z = c_1 V_H + c_2 \cdots (14)$$

ここで、 c_1 と c_2 は定数である。永久磁石表面の磁束密度 $B_z = \pm 90 \text{ mT}$ であり、それに対応するホール電圧 V_{H+} と V_{H-} は測定されている。これらから c_1 と c_2 を求めれば、磁束密度とホール電圧の関係がわかった。

課題 9.

ここでは電磁石から発生する鉛直磁場を測定する。磁場がホールセンサーの面を垂直に貫くように素子を配置し、電磁石から発生する磁場を測定せよ。ここで、問 8 を利用して、測定したホール電圧から磁束密度を計算すること。ホールセンサーは動かさないように両面テープで固定すること。印加する電流は-3A から+3A まで 1A ずつ変える(必ずこの順番で測定すること)。符号を変えるときは一度電流値を 0 にしてからバナナ端子を入れ替える。測定データは前回同様 1 秒間測定した。この結果を、縦軸鉛直磁場、横軸電流としてグラフに示した。これを直線で最小二乗フィッティングし、電流と磁場の関係を式で示した。フィッティングに用いた関数はどのような式か説明した。

課題 10.

次に、同様の方法で電磁石の面内磁場を測定せよ。面内磁場を測定するときはサンプルを立てて両面テープで固定すること。その結果を、縦軸面内磁場、横軸電流として

グラフに示した。

これを直線で最小二乗フィッティングし、電流と磁場の関係を式で示した。

課題 11.

課題 2 で検討した抵抗測定回路を作製した。素子への接続は、図 9(b) および 9(c) に示す赤と黒の箇所に陽極と陰極の端子を接続する。出来上がったものを写真で撮り、レポートに含めた。

課題 12.

電磁石の円周の端に磁気抵抗センサーを固定し、抵抗の面内磁場依存性を測定せよ。得られた結果から、縦軸抵抗値、横軸磁場としてグラフに示した。磁場はサンプルの面内にかかるようにすること。印加する電流は-3A から+3A まで 1A ずつ変えること。課題 1 の結果を用いて測定電圧から抵抗値を計算し、課題 9 と課題 10 の結果を用いてコイルに流す電流値から鉛直方向と面内方向の磁場を計算した。測定データは前回同様 1 秒間測定した。

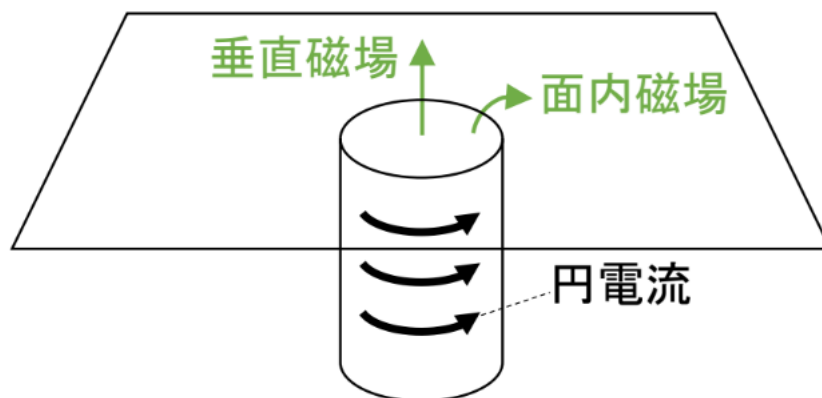


図 10: 電磁石の上に発生する垂直磁場と面内磁場の概念図

課題 13.

次に、抵抗の面内磁場角度依存性を測定する。電磁石に電流 3 A を印加し、素子に印加する磁場を 45° ずつ変える。素子の角度を変えずに素子の位置を円周に沿わせて配置する(図 11)。測定は各条件で 1 秒間測定し、横軸を磁場角度、縦軸を抵抗値としたグラフを作成した。

課題 14.

課題 3 と課題 4 を参照することで、今回測定に用いた磁気抵抗センサー1 と 2 が AMR センサーか TMR センサーかを判別した。理由も書いた。

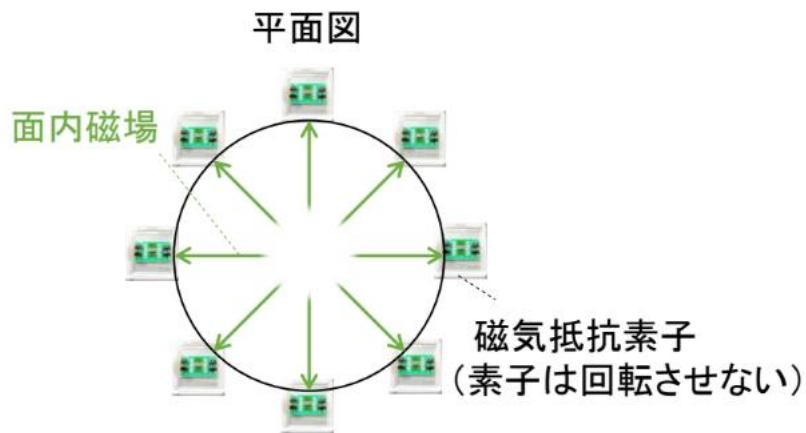


図 11: 電磁石の平面図。電磁石の円周の端に沿って磁気抵抗センサーを配置する。この時、素子は回転させない。

課題 15.

磁場による信号変化量がノイズ(標準偏差)より小さくなると、信号がノイズに埋もれてしまい測定できなくなる。測定できる最小の磁場をホールセンサー・AMR センサー・TMR センサーでそれぞれ評価した。これらの結果から、微小な磁場を検出するためにはどのセンサーが適しているか説明した。

課題 16.

ホール電圧の符号から半導体のキャリアが電子か正孔かを理由とともに説明した。

課題 17.

AMR 効果は伝導電子が局在している電子のスピンと相互作用することで生じる。この相互作用の名称を答え、相互作用エネルギーを軌道角運動量 L とスピン角運動量 S を用いて表した。

課題 18.

磁気トンネル接合では絶縁体層に MgO 、強磁性層に Fe を使うことで大きな磁気抵抗変化を得ることができる。その理由を述べた。

課題 19.

ホールセンサー・AMR センサー・TMR センサーのいずれかについて、その応用例を調べて説明した。製品の中でどのように磁場を検知しているかわかるように図を用い

て説明した。

4. 実験結果と考察

課題 1.

$$V_{in} = IR_{ref} + IR$$

$$I = \frac{V_{in}}{R_{ref} + R}$$

$$I = \frac{V_R}{R}$$

$$\frac{V_R}{R} = \frac{V_{in}}{R_{ref} + R}$$

$$R = \frac{V_R R_{ref}}{V_{in} - V_R}$$

課題 2.

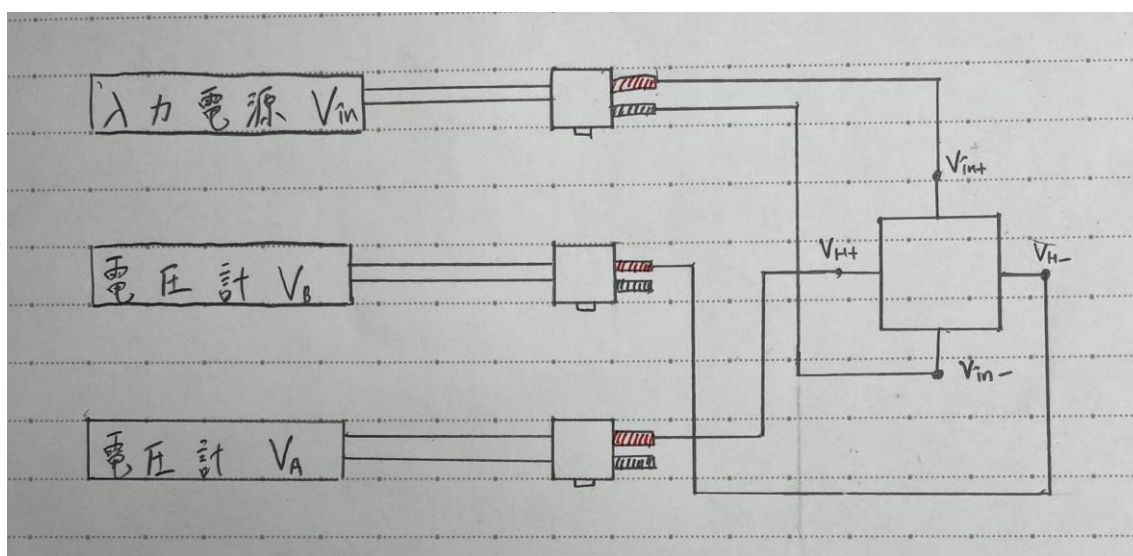


図 12 : 課題 2 解答

課題 3.

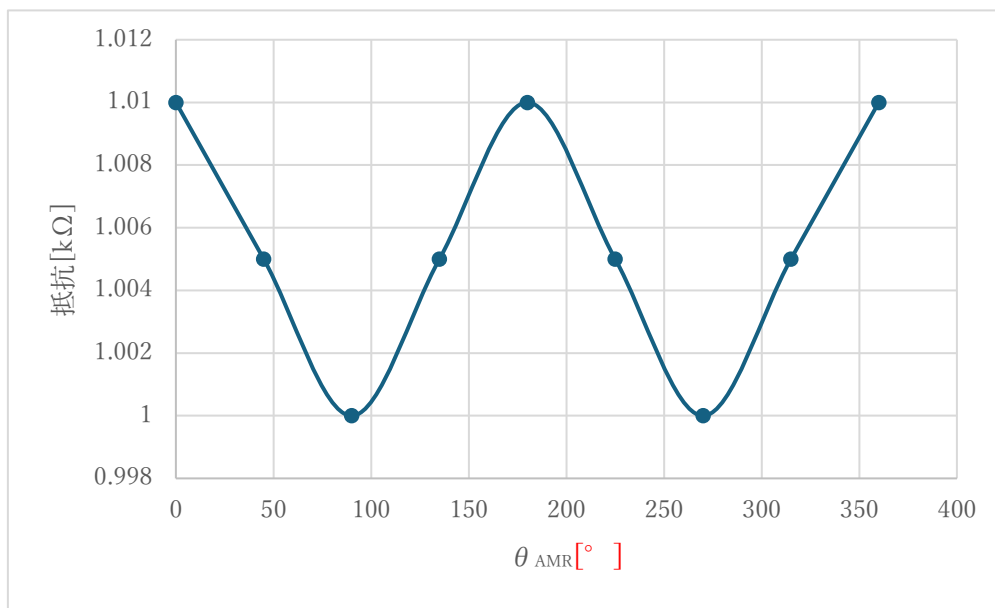


図 13 : θ_{AMR} と抵抗値 R の関係

課題 4.

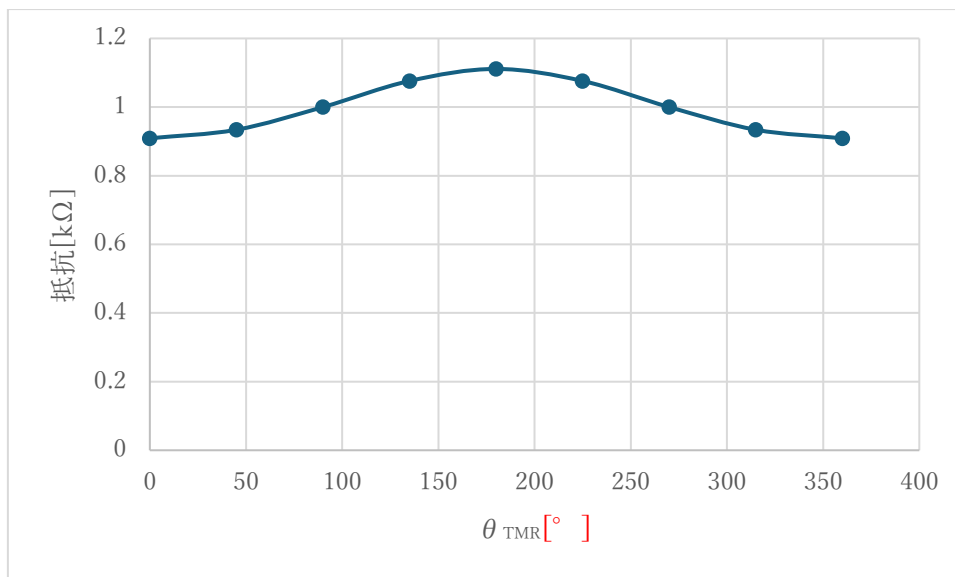


図 14 : θ_{TMR} と抵抗値 R の関係

課題 5.

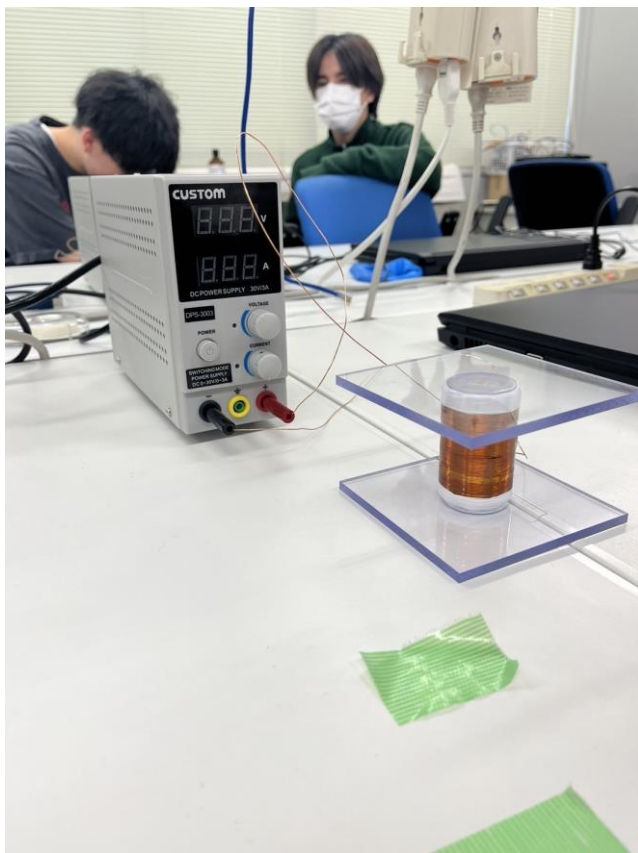


図 15 : 課題 5 画像

課題 6.

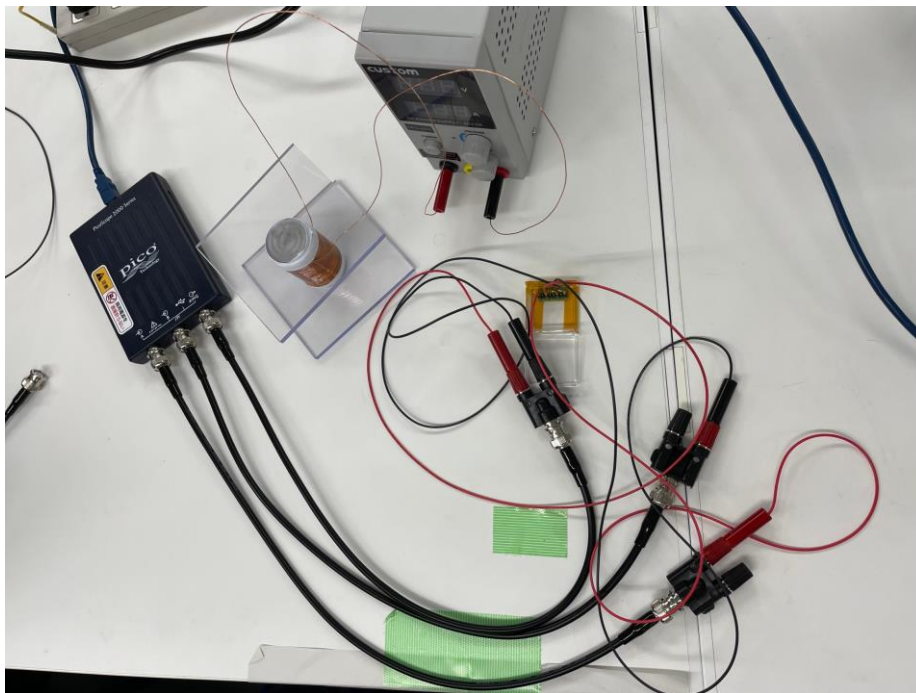


図 16 : 課題 6 画像

課題 7.

グループ 1

ホール電圧 (N)=0.016 ± 0.005 [V]

ホール電圧 (S)=-0.001 ± 0.0048 [V]

グループ 2

ホール電圧 (N)=0.010 ± 0.004[V]

ホール電圧 (S)=-0.0097 ± 0.0046 [V]

Excel にて用いた関数

平均 : $\bar{X} = \frac{1}{n}(X_1 + X_2 + \dots + X_n)$

(n: データの数、 X_1, X_2, \dots, X_n : 各データの値、 \bar{X} : データの平均値)

標準偏差 : $S = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}$

(S: 標準偏差、n : データの数、 X_i : 各データの値、 \bar{X} : データの平均値)

課題 8.

グループ 1

$B_Z = +90[\text{mT}]$, $V_H = 0.016[\text{V}]$ のとき、

$$90 = 0.016 \times C_1 + C_2$$

$B_Z = -90[\text{mT}]$, $V_H = -0.001[\text{V}]$ のとき、

$$-90 = -0.001 \times C_1 + C_2$$

これらの式を連立方程式として解くと

$$C_1 = 10588.2353, C_2 = -79.4117647$$

したがって、

$$B_Z = 10588.2353V_H - 79.4117647[\text{mT}]$$

グループ 2

$B_Z = +90[\text{mT}]$, $V_H = 0.010[\text{V}]$ のとき、

$$90 = 0.010 \times C_1 + C_2$$

$B_Z = -90[\text{mT}]$, $V_H = -0.0097[\text{V}]$ のとき、

$$-90 = -0.0097 \times C_1 + C_2$$

これらの式を連立方程式として解くと

$$C_1 = 9137.05584, C_2 = -1.37055838$$

したがって、

$$B_Z = 9137.05584V_H - 1.37055838[\text{mT}]$$

課題 9.

グループ 1

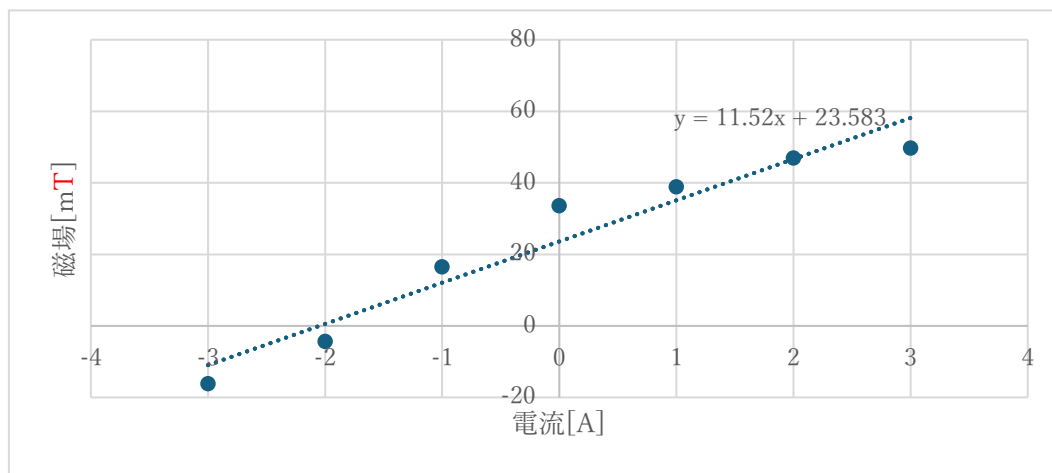


図 17: 電流と鉛直磁場の関係

電流と磁場の式

$$B = 11.52I + 23.583[\text{mT}]$$

各電流の 1 秒間測定したホール電圧の平均を課題 8 で求めた式の V_H に代入し、 B_z を求めた。

グループ 2

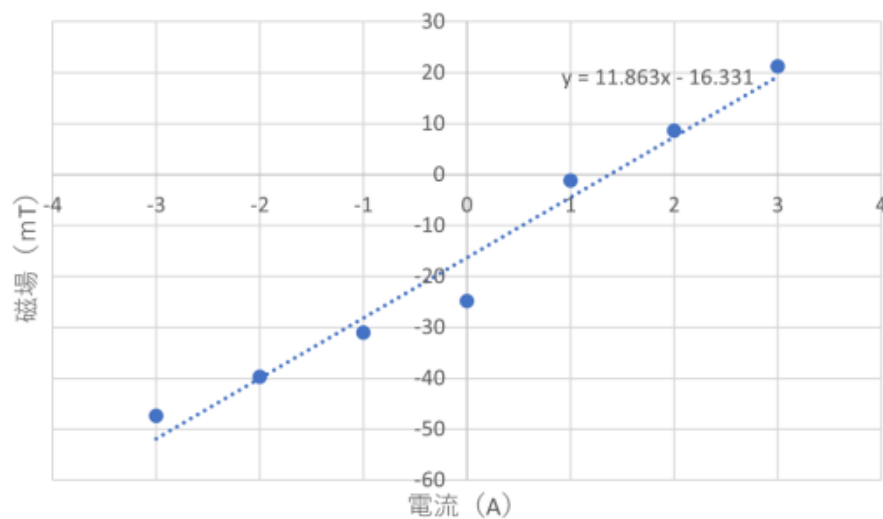


図 18 : 電流と鉛直磁場の関係

電流と磁場の式

$$B = 11.863I - 16.331[\text{mT}]$$

課題 10.

グループ 1

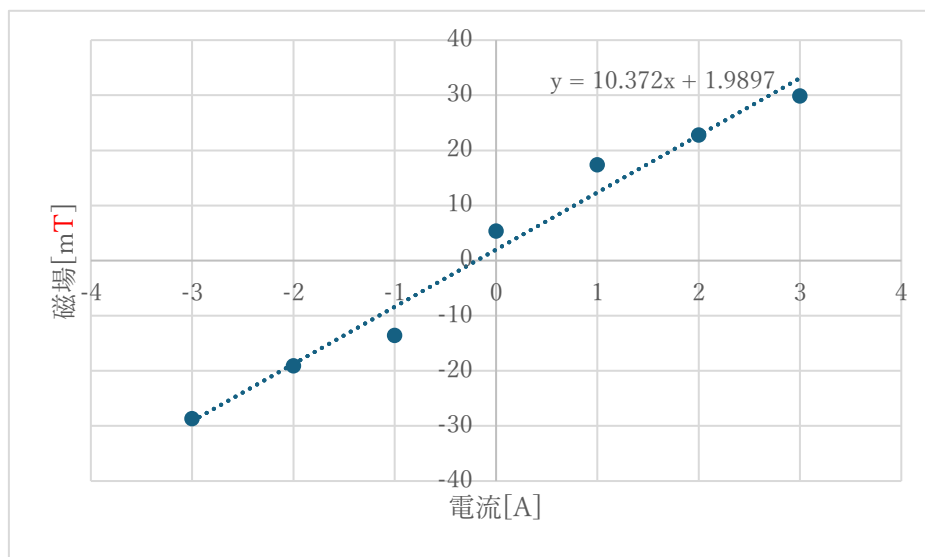


図 19: 電流と面内磁場の関係

電流と磁場の式

$$B = 10.372I + 1.9897 [\text{mT}]$$

グループ 2

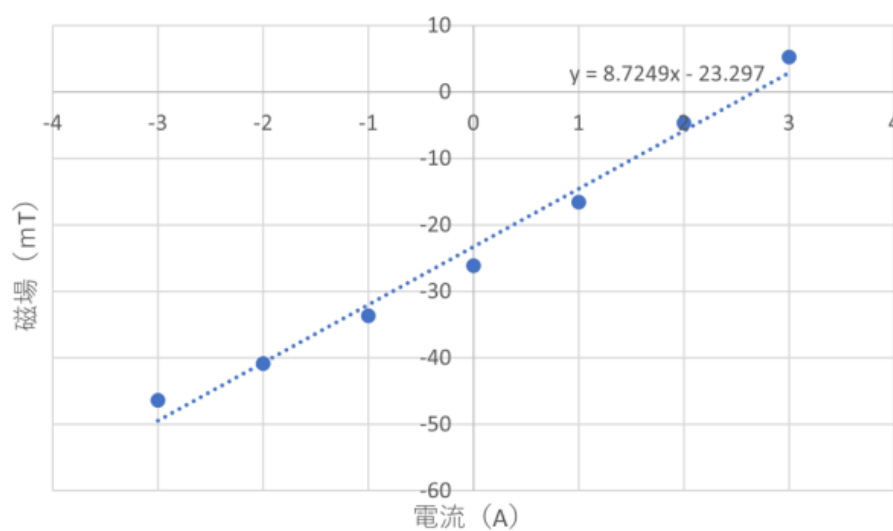


図 20: 電流と面内磁場の関係

電流と磁場の式

$$B = 8.7249I - 23.297 [\text{mT}]$$

課題 11.

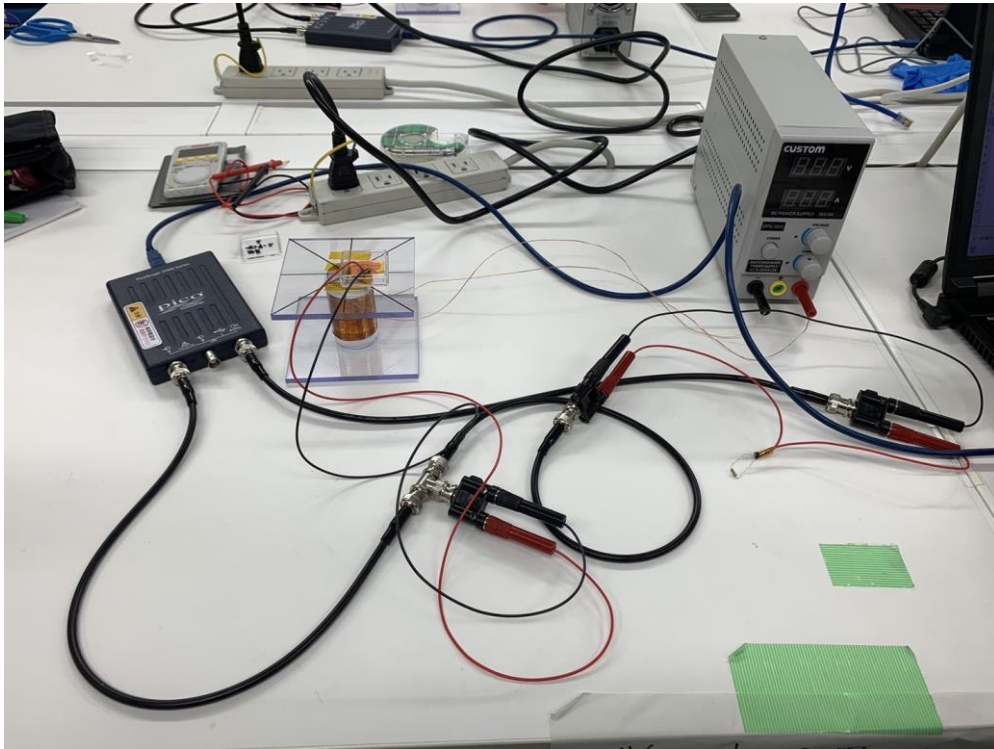


図 21:課題 11 画像

課題 12

グループ 1

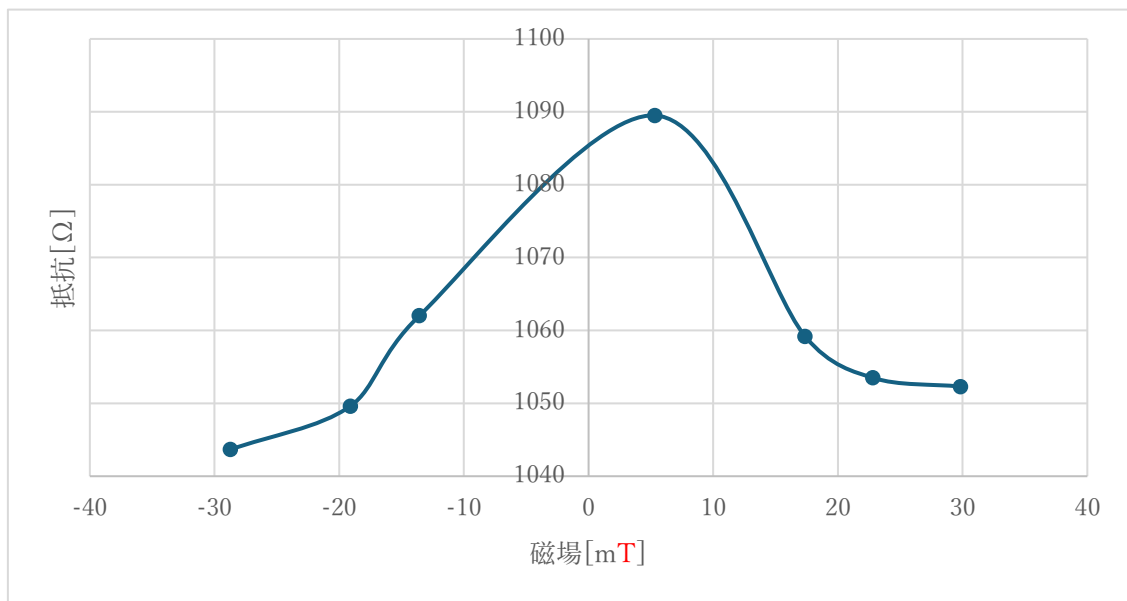


図 22: 抵抗と面内磁場の関係

グループ 2

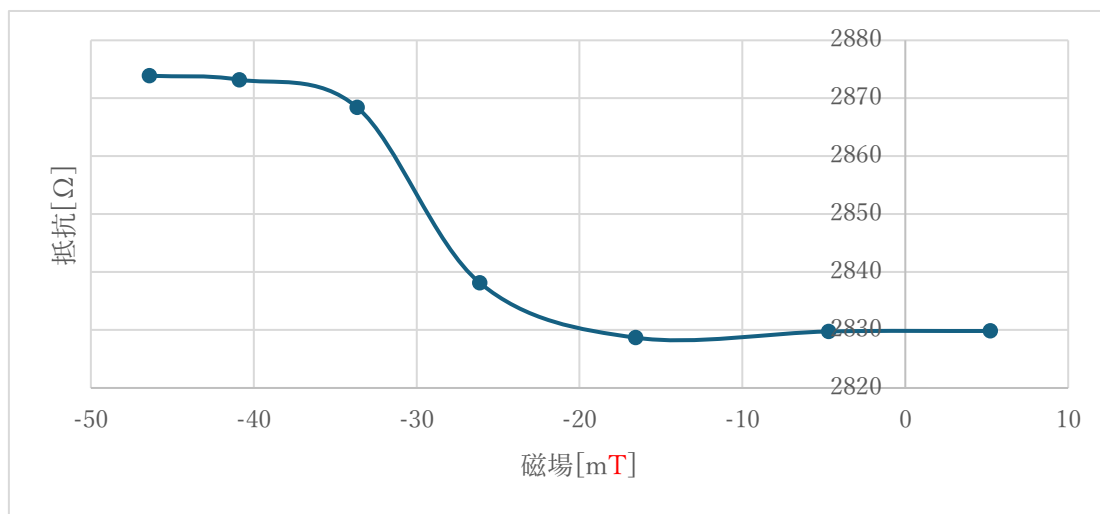


図 23: 抵抗と面内磁場の関係

課題 13.

グループ 1

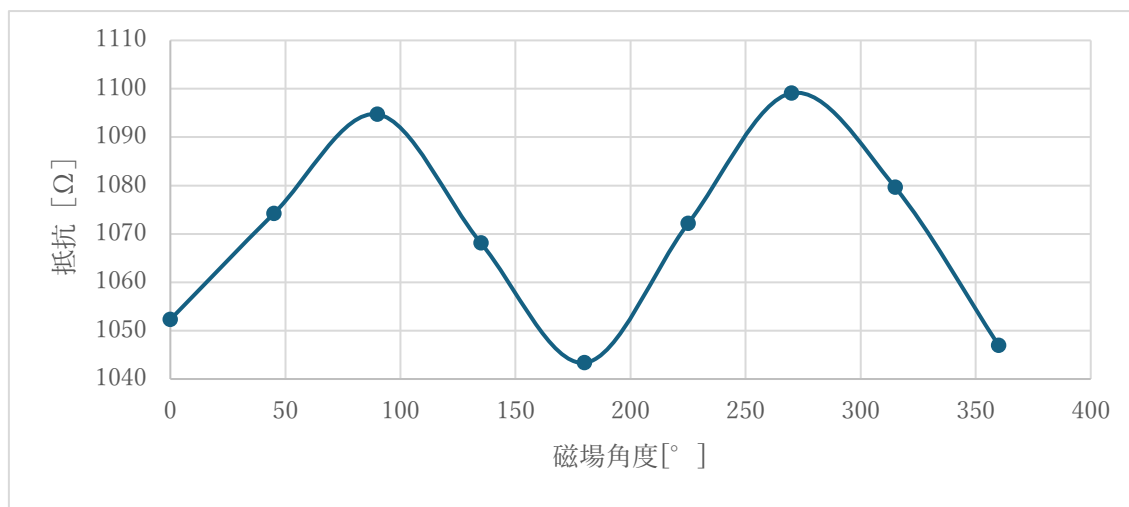


図 24: 抵抗と磁場角度の関係

グループ 2

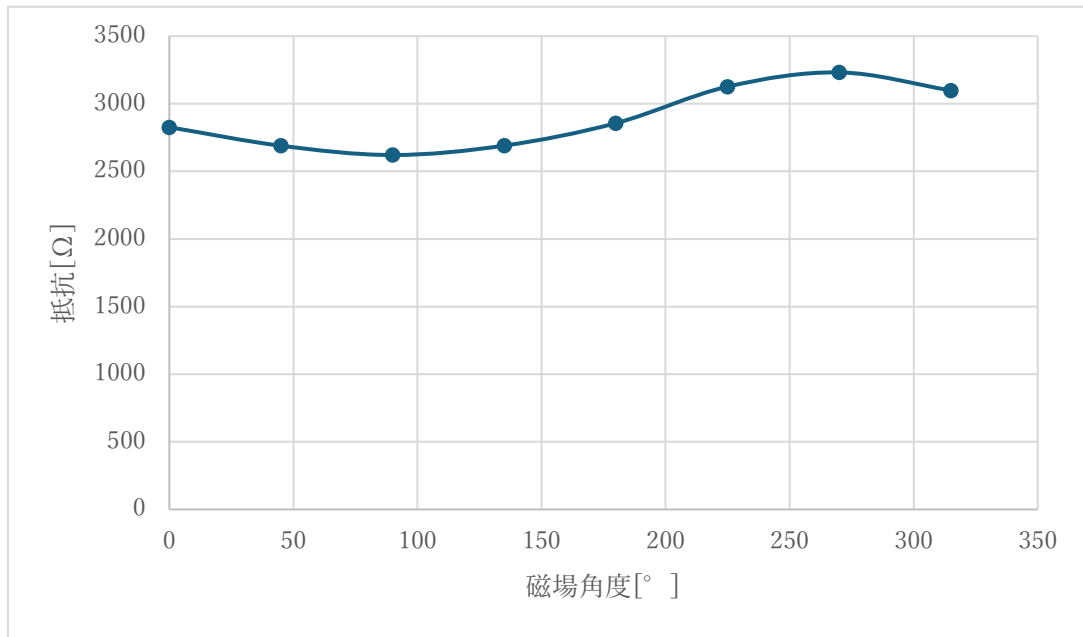


図 25: 抵抗と磁場角度の関係

課題 14.

課題 3 と課題 4 で作成したグラフと課題 1 3 のグループ 1 (磁気抵抗センサー 2)、グループ 2 (磁気抵抗センサー 1)の結果から、磁気抵抗センサー 1 は周期が 2π であり、課題 4 のグラフも周期が 2π 。よって、磁気抵抗センサー 1 は TMR センサーとわかる。磁気抵抗センサー 2 は周期が π であり、課題 3 のグラフも周期が π 。よって、磁気抵抗センサー 2 は AMR センサーとわかる。

課題 15.

課題 7 の結果からホールセンサーの標準偏差は 0.004 から 0.005 の間の値をとることが分かる。ホールセンサーの測定できる最小の磁場はホール電圧=0.004V、課題 8 より、

$$\begin{aligned} B &= 10588.2353 \times 0.004 - 79.4117647 \\ &= -37.0588235 \end{aligned}$$

よって、 -37.0588235 未満の値にはなることはないと考えられる。したがって、課題 12 の結果からホールセンサーは AMR センサー、TMR センサーより微小な磁場を検出するのに向いていないことが分かる。また、図 22、23 を比べるとグループ 2 で用いた TMR センサーの方がグループ 1 で用いた AMR センサーよりも小さい磁場を検出している。つまり、TMR センサーの方が微小な磁場を検出するのに適している。

課題 16.

ホール電圧が正のとき、式(11)より、ホール係数 R_H は $R_H > 0$ となる。ホール係数は電子では $R_H < 0$ 、正孔では $R_H > 0$ であるので、この半導体のキャリアは正孔である。

課題 17.

スピン軌道相互作用

$$\text{相互作用エネルギー} = \frac{a \times h}{2\pi} (\mathbf{L} \cdot \mathbf{S}) \quad [\text{J}]$$

(a: 定数 h: プランク定数)

課題 18.

大きく磁気抵抗変化を得る理由について、物理的および材料特性に基づいている。
MgO は優れた絶縁体であり、特にそのバンド構造が磁気トンネル接合の特性に重要である。MgO のバンドギャップが大きく、スピン依存トンネル効果を効率的に利用することができる。

また、鉄 (Fe) は体心立方構造 (BCC) を持つ金属であり、MgO は立方晶系の格子構造を持つ絶縁体であり、これらの結晶構造が互いに適合しやすい特性を持っているため、Fe と MgO の界面において良好な結晶整合性を保つことができる。これによって、界面の欠陥が少なくなり、電子のスピンが保たれやすくなる。

逆に、絶縁体層や強磁性層の材料を変更すると、スピン依存トンネル効果、バンドギャップ、結晶構造の整合性、スピントラッキング効果などが変化し、結果として磁気抵抗変化 (TMR 効果) が大きく異なる。最適な材料の組み合わせを選択することで、高い TMR 効果を得ることができる。

課題 19.

TMR センサによる角度センサ。センサの上で磁石を回転させると、その動きを計測し、非接触で回転体の角度を検出できる。角度センサとして 360° 検知が可能。角度センサは自動車、ゲームコントローラー、手術ロボットなどに使われている。

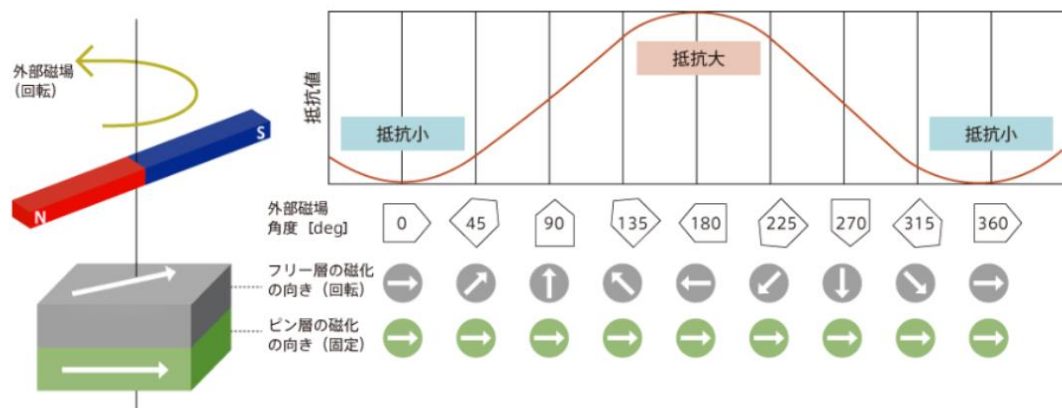


図 26：TMR センサによる角度センサの原理

参考文献、1，2 の資料を参考にした。

5. 結論

課題 9、10 の電磁石から発生する磁場を測定する結果から、図 14、16 を比較すると、鉛直磁場の方が大きくなることが分かった。また、図、式から電流と磁場には線形性が成り立つことを確認できた。

6. 改善点

課題 9、10 について電流と磁場の関係は線形性を持つことが確認できたが、理論値を考えると直線の式 $y = ax + b$ について $x = 0$ の時、 $b = 0$ になるはずである。しかし、図 14、16 を見ると、図 14 は 0 に近いが、図 16 は大きく外れている。これは面内磁場の測定の際に測定する素子の位置が不正確であったためと思われる。

7. 参考文献

1. [TMR アンゲル・センサ | TDK-Micronas GmbH](#)
2. [TMR センサ | 浜松光電 \(hkd.co.jp\)](#)