回転によるホール素子の補正

山形大学理工学研究科Ｍ１
伊藤 祐輔

2000 年５月２１日

1　概要

今回は AIDA の実験グループで使用された Magnet(BENKEI) の磁場測定で得られたデータを解析する。そこでまずはホール素子の calibration を目的とする。具体的にはホール素子と取り付け軸の *angular misalignment*、およびホール効果 (normal , planar) を得られた電圧から変換する為に必要な 2 つのホール係数、そして係数それぞれの温度依存性を求める。ホール素子とは、ホール効果により生じる電圧を測定するものである。まずはこのホール素子のデータをメインデータとして、それのホール係数の解析を進めていく。

2　ホール素子の原理とその特性

2.1　ホール素子とは

ホール素子とはホール効果を用いてある点における磁場の大きさを測定する素子の事である。その形状は様々であるが、今回は板状の素子を用いた。ホール効果については以下で詳しく述べる。

2.2　ホール効果の原理とその二次の効果

ある板状の導体がある時の事を考えてみる。
この中を電子が安定して一様に流れている状態、つまり定常電流が流れ

ている状態を考える。この導体にある大きさの磁場がかかってくるとすると、この電子は速度を持って運動している為に常にローレンツ力を受けて運動を続ける事になる。
ここで、ローレンツ力とは電荷 q を持った粒子がある速度 $\mathbf{v}$ で運動していた時に、それに対して一定の大きさの磁場 B がかけると荷電体が受ける力の事を言うのである。この力の大きさは

$$\mathbf{F} = q\ \mathbf{v} \times \mathbf{B}$$

で表される。この $\mathbf{F}$ が $\mathbf{v}$ と $\mathbf{B}$ のベクトル積で表現される事からも分かるように、力 $\mathbf{F}$ の向きは $\mathbf{v}$ と $\mathbf{B}$ のどちらにも常に直行するのである。
電荷は導体中を流れているので $\mathbf{v}$ は導体に平行な向きを持っている。次に B の向きを導体面に対して垂直であると仮定してみると、ローレンツ力 $\mathbf{F}$ は導体平面内にあり、かつ $\mathbf{v}$ とも垂直な向きを向いているといえる。なので、今その状態を仮定すると電荷担体は電流の流れに対してそれが横に逸れる方向に力を受ける事になり、電荷が素子平面上のある一方に偏って局在するような状況が生じてしまう。つまり、導体の端と端との間には電位差が生じるのである。

このように、電流が流れている素子面上に磁場がかかる事により、電位差が生じる効果をホール効果と呼ぶ。
この効果を用いて磁場の大きさを図ろうと設計されたのがホール素子と呼ばれる素子である。ただし、一般にはこの他にもこのホール効果の二次の効果として知られるプレナーホール効果 (planar hall effect) と呼ばれる効果も働く為に、より複雑な考察が必要となる[1]
以上の二つの効果により、実際に素子に生じる電位差は次のようになる。

$$V = RB_nI - P{B_t}^2 I \sin 2\psi + V_0 \tag{1}$$

B_n:磁場の素子平面に垂直な方向 (**n**ormal conmponet) の大きさ
B_t:磁場の素子平面方向 (**t**angential component) の大きさ
R:ホール係数　, I:電流の大きさ , P:プレナーホール係数
ψ:I と $\mathbf{B}_t$ の為す角度　, V_0:residual voltage

[1]**F.Schoff,CERN ISR-MA 174–48**

3　解析するデータとその方法

3.1　データのフォーマット

解析方法について述べる前に、データ自身の形式などについてふれておく。
今回解析したデータはテキスト形式で保存されている。そしてそれらはスペース文字で７行に区切られており、以下のようなフォーマットになっている。

1 ; date　2 ; angle [degree]　3 ; V_x [mV]　4 ; V_y [mV]　5 ; V_z [mV]

6 ; Hall current [0.1A]　7 ; temprature [mV]

１行目はデータを取った日付、２行目は回転角度、３行目～５行目は各素子に生じた電圧の大きさ、６行目は電流値、７行目は温度を電圧で測定した値である。
さらにこれらのデータは回転軸が異なる二つの種類に分類できる。一つは回転軸をＹ方向の磁場を測定する為に置かれた素子に取り付けたものである。この場合は Y, Z の各方向がホール効果が大きく見える方向になる。これが Y∗.dat である。そしてもう一つは回転軸を Z∗.dat であり、回転軸はＺ方向の磁場を測定する為に置かれた素子に取り付けられている。この場合はホール効果が大きく見える方向は Y∗.dat とは異なり、X, Y 方向がその方向になる。一つ注意すべき点はホール効果が大きく見える方向と大きく見えない (言い換えればプレナーホール効果が見えやすい) 方向では ψ は異なる変化を見せるという事であるが、それはまたフィッテングのところで詳しく述べる。

3.2　軸と素子の *angular misalignment*

3.2.1　*angular misalignment* と補正方法

ホール素子の位置を変える為に、素子は軸に取り付けられている。それは理想的には素子平面に対して完全に水平にもしくは垂直に取り付けられているべきである。そうでなければそれぞれ B_n,B_t が B_x,B_y,B_z の

個々に純粋に対応出来ないからである。もし取り付けが完全であるならば B_n,B_t には B_x,B_y,B_z の大きさが一対一で対応するのである。

しかしながら実際には取り付けには必ずといっていいほど軸のずれが生じる。言い換えれば軸と素子平面は完全に平行、もしくは垂直にはならないのである。これが生じる理由としては、取り付け精度の問題や取り付け方の問題などさまざまであるが、とにかくこのようなずれは必ず生じてしまうのである。また一般的な場合としてこのようにずれが生じる場合を考えておけば、取り付けのずれが無い場合はずれが 0 であるという極限で与えられるので、このような考察は有用である。

この取り付けられた時に生じるずれの事を" *angular misalignment*" と呼ぶ。これにより、ホール素子面に対して B を垂直に入れる事は難しくなり、ホール素子は normal 及び planar、2 つの効果を同時に観測してしまう事になるのである。そこで、この *angular misalignment*(以下 $\Delta\theta$) を実際に求めてやる必要が当然出てくる。そうでないと、実際の磁束密度の値はどの程度なのか評価してやる事が出来ないのである。

そこで、それを求める方法として今回はホール素子を回転させると言う方法をとる。回転軸は取り付け軸となる。素子を回転させるとその回転の角度によって B_n と B_t はそれらの大きさを持った各方向のベクトルの合成結果が B となるように互いに相関をもって値を変動させる。その回転に対する Hall voltage を観測することにより、$\Delta\theta$ を求める。それにはまず、回転軸に水平もしくは垂直に付けられているはずの素子に対する磁場の強さ(磁束密度)である B_n と B_t が原理的にどのように変化するのかを知らなければいけない。よって、まずは B_n と B_t の大きさがどのようにして求められるのかを考える。が、その前にこの *angular misalignment* について少し確認する。まず、*angular misalignment* は軸と素子との傾きであるという事。そしてそれは X,Y,Z 方向すべてに共通であるという事である。つまり、もし素子同士も直角ではなく多少のずれを生じていると考えると、全ての方向の *angular misalignment* を考えないといけない事になる。しかしこのずれは *angular misalignment* に比べると小さいものであり、ここではそこまでは考えずに全ての素子が互いに直交する事を前提として考える。

3.2.2 回転によるホール電圧の変化への考察

ホール素子を回転させた場合の B_n と B_t の変化についての考察する。
$\mathbf{n}$ を素子平面の法線ベクトル (大きさ 1)、$\mathbf{t}$ を素子平面の平面ベクトル (大きさは不定) とする。回転軸は Z 軸とする (上図参照)

まずは $\mathbf{n}$ を求める。回転しても変わらない $\mathbf{n}$ の成分とは Z 方向の成分である $\mathbf{n}_z$ である。その大きさは

$$\mathbf{n}_z = n\ \cos\phi\ \mathbf{k}$$

である。ここで n は $\mathbf{n}$ の大きさの事であり、また i, j, k は X,Y,Z 各方向の単位ベクトルである。ここで $\mathbf{n}$ の残りの部分、つまり $\mathbf{n}_x$,$\mathbf{n}_y$ はすぐに求める事が出来て

$$|\mathbf{n}_{xy}| = n|\sin\phi|$$

が $\mathbf{n}$ の XY 平面への射影なので、これを各方向に分解してやると

$$\mathbf{n}_x = n\sin\phi\cos\theta\,\mathbf{i}$$
$$\mathbf{n}_y = n\sin\phi\sin\theta\,\mathbf{j}$$

となる。そして最初に書いたとおり $\mathbf{n}$ の大きさは 1 なので $\mathbf{n}$ が求まり、

$$\mathbf{n} = \sin\phi\cos\theta\,\mathbf{i} + \sin\phi\sin\theta\,\mathbf{j} + \cos\phi\,\mathbf{k} \tag{2}$$

と言うように導く事が出来る。
次にこれを用いて t を導出する。
まず t は B の平面成分であり、それを式で表すと

$$\mathbf{B} = \alpha\mathbf{n} + \mathbf{t} \tag{3}$$

である。ここで α は B_n の大きさである。さらに $\mathbf{n}$ と $\mathbf{t}$ にはもう一つの関係式があり、それは互いに必ず直交すると言う事である。それを式として表すと

$$\mathbf{n}\cdot\mathbf{t}=0 \tag{4}$$

この (??),(??) の二つの式より、t を導き出せる。
まず (??) を使う。がその前に t を

$$\mathbf{t}=t_x\mathbf{i}+t_y\mathbf{j}+t_z\mathbf{k}$$

と置いておく。すると

$$\alpha(\sin\phi\cos\theta\mathbf{i}+\sin\phi\sin\theta\mathbf{j}+\cos\phi\mathbf{k})+(t_x\mathbf{i}+t_y\mathbf{j}+t_z\mathbf{k})=B\mathbf{i}$$

$$\therefore\ t_x=B-\alpha\sin\phi\,\cos\theta\ ,\ t_y=-\alpha\sin\phi\,\sin\theta\ ,\ t_z=-\alpha\cos\phi \tag{5}$$

次に (??) を計算する。

$$\begin{aligned}\mathbf{n}\cdot\mathbf{t}&=n_x\cdot t_x+n_y\cdot t_y+n_z\cdot t_z\\&=\sin\phi\,\cos\theta(B-\alpha\sin\phi\,\cos\theta)+\sin\phi\,\sin\theta(-\sin\phi\,\sin\theta)+\cos\phi(-\cos\phi)\\&=B\sin\phi\,\cos\theta-\alpha\mathrm{sin}^2\phi\mathrm{cos}^2\theta-\alpha\mathrm{sin}^2\phi\sin^2\theta-\alpha\mathrm{cos}^2\phi\\&=B\sin\phi\,\cos\theta-\alpha(\mathrm{sin}^2\phi\mathrm{cos}^2\theta-\mathrm{sin}^2\phi\sin^2\theta-\mathrm{cos}^2\phi)\\&=B\sin\phi\,\cos\theta-\alpha=0\end{aligned}$$

$$\therefore\quad \alpha=B\,\sin\phi\,\cos\theta \tag{6}$$

これより t を求める事ができ、

$$\frac{1}{\alpha}\mathbf{t}=\left((\frac{1}{\sin\phi\,\cos\theta})-\sin\phi\,\cos\theta\right)\mathbf{i}-\sin\phi\,\sin\sin\theta\,\mathbf{j}-\cos\phi\,\mathbf{k} \tag{7}$$

となる。よってこれをまとめて書くと

$$\mathbf{n}=\mathrm{sin}\phi\,\mathrm{cos}\theta\,\mathbf{i}+\mathrm{sin}\phi\,\mathrm{sin}\theta\,\mathbf{j}+\mathrm{cos}\phi\,\mathbf{k}$$

$$\frac{1}{\alpha}\mathbf{t} = \left((\frac{1}{\sin\phi\,\cos\theta}) - \sin\phi\,\cos\theta \right)\mathbf{i} - \sin\phi\,\sin\sin\theta\,\mathbf{j} - \cos\phi\,\mathbf{k}$$

と書ける。よってこれらを $\mathbf{B}$ の各方向への成分、つまり $\mathbf{B}_n$ と $\mathbf{B}_t$ に書き換えてやると

$$\mathbf{B}_n = B\ \sin\phi\,\cos\theta(\sin\phi\cos\theta\,\mathbf{i} + \sin\phi\sin\theta\,\mathbf{j} + \cos\phi\,\mathbf{k}) \tag{8}$$

$$\mathbf{B}_t = B\ \sin\phi\,\cos\theta\{\left((\frac{1}{\sin\phi\,\cos\theta}) - \sin\phi\,\cos\theta \right)\mathbf{i} - \sin\phi\,\sin\sin\theta\,\mathbf{j} - \cos\phi\,\mathbf{k}\} \tag{9}$$

であり、各ベクトルの大きさは

$$|\mathbf{B}_n| = B\,\sin\phi\,\cos\theta = B_n \tag{10}$$

$$|\mathbf{B}_t| = B\,\sqrt{1 - \sin^2\phi\cos^2\theta} = B_t \tag{11}$$

である。これを (??) 式に代入する事により、ホール電圧が素子の回転に対してどのような変化をするかと言う事を知る事が出来るのである。つまり、今の場合は回転軸と素子平面が垂直な場合への考察であるのだがこの場合のホール電圧は

$$V = R\,B\,\sin\phi\,\cos\theta\,I - P\,B^2\,(1 - \sin\phi\,\cos\theta)\,I\,\sin 2\psi + V_0 \tag{12}$$

と言う式に従うような変化をするのである。

また、この ϕ は取り付け軸とのずれであるのだが、それを $(\frac{\pi}{2} + \phi)$ として扱えば、回転軸と素子平面が水平な場合への考察へも適応する事が出来ると言える。また回転角に対しては、最初にどの位置から回転を始めるのかは全くの不定であるのでこの $\sin\theta$ と $\cos\theta$ は区別をつける事が出来ない。つまり結局意味があるのは、各項の中にある θ に関する三角関数同士を今あるこの相関を変えずに変化させると言う事である。その位相はフィッティングのパラメータに含ませるものとして考え、ここでは $\sin$、$\cos$ のどちらかであるという事を言及しておく。

3.2.3　ψ の考察

次に ψ について考えてみる。最初に述べているように ψ とは $\mathbf{B}_t$ と $\mathbf{I}$ の為す角度の事である。これを計算するのだが、まずは $\mathbf{I}$ を求めてみる。

その前にこの ψ の影響の及ぼし方に着目してみる。すると ψ は $\sin$ の２倍角で効いている事は (??) 式より明らかである。初期位相にもよるが全体としては、$\sin\psi$ の半分の周期で変動する事が式より分かる。この事は、電流がどちらからどちらへ流れているという事を考えてもそのどちらかであるという事を特定する事は出来ないという事を意味している。[2]

ホール素子に流れる電流 $\mathbf{I}$ は素子平面内を流れている。なので回転により $\mathbf{n}$ と同じ回転を行なう。そしてそれは常にある一定の大きさを持っているとする。その大きさを　$|\mathbf{I}|=I$ とすると $\mathbf{I}$ は以下のように求める事が出来る。まず、電流の方向は任意でいいとして X 方向を仮定する。そして初期の向きを XY 平面内に設定する。すると

$$\mathbf{I}(\theta = 0) \ = \ I\left(\cos\phi\mathbf{i} + \sin\phi\mathbf{j}\right)$$

ここで $misalignment$ などは回転の際の考察での状況と同じであるとする。そして回転角を適当に決めてやると $\mathbf{I}$ は

$$\mathbf{I} = I\left\{\cos\phi\cos\theta\mathbf{i} + \sin\phi\cos\theta\mathbf{j} + \sin\theta\mathbf{k}\right\} \tag{13}$$

となる。よって前に求めてある (??) 式,

$$\mathbf{B}_t = B\ \sin\phi\ \cos\theta\{\left((\frac{1}{\sin\phi\ \cos\theta}) - \sin\phi\ \cos\theta \right)\mathbf{i} - \sin\phi\ \sin\sin\theta\,\mathbf{j} - \cos\phi\,\mathbf{k}\}$$

を使って $\sin 2\psi$ を計算する。つもりであったが、この計算は結構複雑になるので $\sin 2\psi$ と位相差しか違わなく、また多少計算のしやすい $\cos 2\psi$

[2] 何故なら ψ に対して $\sin$ の値が二倍の周期で変化する為である。仮に $\psi = \frac{\pi}{6}$ だとしたら $\sin$ 2 ψ の値は $\frac{\sqrt{3}}{2}$ となり、$\psi = \frac{\pi}{6} + n\pi \quad (n = 1, 2, \cdots\cdots)$ で同じ値を取ってしまい、ある方向に対してその向きがどちらであるのかを判断することは出来ない。さらにその絶対値も位相差で吸収されて見えなくなるのでその方向であるのかさえも、決めようが無い為である。

を求める事にする。こうして計算しても、フィッティングをかける時にはすべてを位相差のパラメータが吸収してくれるので、これは間違った考察ではないと言える。

細かい計算を書くと大変なので結果だけを書く。

１． 軸と素子平面が垂直に取り付けられている場合の $\cos 2\psi(\mathrm{case\,1})$

$$\cos 2\psi \;\cong\; \cos 2\left(\theta + const\right)$$

２． 軸と素子平面が水平に取り付けられている場合の $\cos 2\psi(\mathrm{case\,2})$

これは値の関係上 $B^2\ \cos 2\psi$ を求めた。

$$B^2\ \cos 2\psi \;=\; B^2\left[\cos^2\theta\left(2\sin^2\phi\cos^2\theta + \cos^2\phi\right) - 1\right]$$

が計算より得られた結果である。

3.3　データへのフィッティング

3.3.1　パラメータ

フィッティングをかけるには、まず元の式とその中にある決めたい値をフィッティングのパラメータとして決めないといけない。まず、確認の為に元になる式 (??) をここにもう一度書く。

$$V = RB_nI - PB_t{}^2I\sin 2\psi + V_0$$

この式の中で常に値を変えていく変数として扱えるのは回転角 θ だけである。よってこれを変数として考える。

次にパラメータを振り分ける。まず、residual voltage V_0 は単独の項として存在しているので、一つの独立したパラメータにしても問題は無い。その次に第一項に着目する。これには

$$R_H\,;\text{ホール係数}\quad,\quad \phi\,;angular\,misalignment$$

と言う、二つの未知のものが含まれている。よって、これは相関を持たせないよう別々に扱う事にする。これにより第一項には二つのパラメータが振り分けられる。

最後に第二項について考えてみる。この中にも第一項と同様に二つの未知の値が含まれており

$$P_H\,;\text{プレナーホール係数}\quad,\quad \phi\,;angular\,misalignment$$

がそれにあたる。しかし ϕ は第一項と共通であるので新たに加えられるパラメータは一つだけである。しかし、ここでもう一つ、もしくは二つのパラメータを加えないといけない。それは θ に対する初期位相と ψ に対する初期位相である。これがないのであれば、それぞれに対して明確に初期の位置に対応する位相を与えなければいけないのである。それが無理である事は明かであるのでこれらの位相は必要不可欠であると言える。ただし、一つ必要な場合と二つ必要な場合と言う異なるケースが存在するのは軸と素子平面がどのような位置関係にあるのかに依存する。それは回転により $\mathbf{B}_t$ と $\mathbf{I}$ がどのように変化するのかを考察した時に述べたのでここでは述べないでおく。

以上のようにパラメータを決めた上で実際に式を書いてみる。

3.3.2　フィッティングの式

パラメータをこのようにおいてフィッティングの式を書く。

$$Par(1)\,:\,R_H BI \quad,\ Par(2)\,:angular\,misalignment \quad,\ Par(3)\,:\theta\text{の初期位相}$$
$$Par(4):P_H B^2 I \quad,\ Par(5)\,:residual\,voltage \quad,\ Par(6)\,:\,\psi\text{の初期位相}$$

1．case 1 のフィッティングの式

$$\begin{aligned} y = & Par(1)\,\sin\left(Par(2)\right)\cos\left(x+Par(3)\right) \\ & + Par(4)\left[1-\left(\sin^2\left(Par\,(2)\right)\,\cos^2\left(x+Par\,(3)\right)\right)\right]\left(\sin(2\left(x+Par(6)\right))\right) \\ & + Par(5) \end{aligned} \tag{14}$$

2．case 2 のフィッティングの式

$$\begin{aligned} y = & Par(1)\,\cos\left(Par(2)\right)\cos\left(x+Par(3)\right) \\ & + Par(4)\,\left[\cos^2\left(x+Par(3)\right)\left(2\sin^2\left(Par(2)\right)\,\cos^2\left(x+Par(3)\right)+\cos^2\phi\right)-1\right] \\ & + Par(5) \end{aligned} \tag{15}$$

データは回転角とその時の電圧、と言うようにプロットしてやり、それに対してフィッティングをかけてやる事により全てのパラメータを決めてやる事が出来る。どちらの関数を使うかは、電圧値の大きさを見れば一目瞭然であるので、一度閲覧した上で決める。$Y*.dat$ は ∼1mV の時が case 1 であり、50∼60mV の時は case 2 である。同様に $Z*.dat$ は 4∼5mV の時が case 1 であり、50 ∼ 60mV の時が case 2 に相当する。

しかし例外もある。それは $Z*.dat$ の一部のデータについてである。Z505c.dat,Z505d.dat,Z570d.dat,Z570e.dat,Z625d.dat,Z625e.dat の 6 個の

データがそれにあたる。これらは再び素子を取り付け直して測定をしたデータである。ただ、解析の結果は他のデータと遜色が無かった為、同様の取り扱いをする事とした。

これにより得られるのはホール係数、プレナーホール係数、$residual\,voltage$ であるが、これらを全て利用することは出来ない。理由としては、まずフィッティングの式が異なるためである。case 1 ではプレナーホール効果を見る事が出来るが、case 2 ではまず無理である。逆を言えば、case 2 はプレナーホール係数がほとんど無視できるような状態なのでホール係数をしっかりと評価してくれる。つまり、出てきた値をある程度選別してやらないといけない、と言う事は明かである。その事について考えてみる。

case 1 の式から得られた Par(1) は過大評価される。なぜなら Par(1) の方が先に決定されるからである。つまり値の決め方としては、まず全体として大きく Par(1) を決めてしまい、それから微調整として他のパラメータを決めていくので Par(1) が大きく評価されてしまう事は必然的であると言える。よって case 1 の式から得られたホール係数は使わない事にして、Par(2) と Par(4) のみを使用する事にする。

同様にして case 2 の式から得られるのは Par(1) のみである。Par(2) は過小評価されるのでこちらは使わない事にする。その理由は上の場合と同じである。

実際のデータへの対応を考える。
$Y*.dat$ は X 方向の電圧が小さく見える。つまり X 方向に case 1 の式を適応すべきであり、他の方向については case 2 の式を与えればよい。$Y*.dat$ は Z 方向の電圧が小さく見えている。よって Z 方向に case 1 の式を適応し、他の方向へは case 2 の式を与える。

3.4　ホール係数の温度依存性

3.4.1　係数の温度依存性に関する大まかな原理

上でも書いたが、データをフィッティングすることにより

- ホール係数 R_H
- プレナーホール係数 P_H
- *residual voltage* V_0

の計 3 つの値を決めることが出来る。ここでこれらには全て温度依存性と言うものが必ず存在する。それについて考えてみる。

ここでホール素子の温度が上昇した場合を考える。一般の物質 (導体) は温度上昇に伴い、抵抗も上昇する。それは物質の構成原子の熱運動が激しくなり、自由電子がとおりにくくなる為である。よって、これによりホール効果による電位差も生じにくくなるのである。これより、R_H と V は負符号で比例すると言えるのである。よってこの比例係数を κ とすれば、

$$R_H = -\kappa\, t + \beta \qquad (\kappa \geq 0,\ \beta\ =\ const\,,\ t; temprature)$$

と言う関係が成り立つはずである。よって X 軸を温度 , Y 軸をホール係数 (およびプレナーホール係数) としてフィッティング結果をプロットし、それに対して最小二乗法でフィッティングをかけてやり、κ を求めてやる。

3.4.2　電圧から温度への変換

今回の測定では温度は電圧として測定されている。これらを再び普段使われている温度の単位である (℃) に変換する。これには実験結果があるのでそれを使った。

以下にその結果を記す。

$$temp[mV] = 0.0253\, temp[℃] - 2.4147$$

もしくはこれを逆に解いたものである

$$temp[℃] = 39.5257\ (temp[mV] + 2.4147)$$

により与えられる。

4　まとめ

4.1　解析結果

詳しい結果などは最後に載せておく。ここでは、出てきた結果をまとめておく。

$\star$ <u>ホール係数</u>

$$R_x = -0.0016\,temp + 1.098\ \ [V/T\,A]$$
$$R_y = -0.0005\,temp + 1.0505\ \ [V/T\,A] \qquad \text{(但し}, temp\text{は温度 (℃))}$$
$$R_z = -0.0003temp + 1.0226\ \ [V/T\,A]$$

$\star$ <u>プレナーホール係数</u>

$$P_x = -0.00003\,temp + 0.0138[V/T^2\,A]$$
$$P_y = -0.00003\,temp + 0.0138[V/T^2\,A] \qquad \text{(但し}, temp\text{は温度 (℃))}$$
$$P_z = -0.00001\,temp + 0.0126[V/T^2\,A]$$

$\star$ $\underline{residual\ \ voltage}$

$$(V_0)_x = -0.0002temp\ - 0.0716[mV]$$
$$(V_0)_y = -0.0196temp\ + 0.3699[mV] \qquad \text{(但し}, temp\text{は温度 (℃))}$$
$$(V_0)_z = -0.0004temp\ + 0.0653[mV]$$

これがフィッティングによる結果である。ホール係数は予想どおりの温度依存性を示しており、また全体的に値もまとまっているので結果としては信用に値するものであると思う。

4.2　最後に

今回、フィッティングを３，４回ほどやり直さなければいけない状況になってしまった事は、反省すべき点であると思います。最初から全体をうまく見通す事が出来たらこんな手間はかからなかったはずです。ただ、この最終結果を出す上で、依然使っていたフィッティング結果を初期値として使ったりしたので、すべてが無駄になっているのではないと信じたいです。

今度はこの結果を用いて磁場の構築をするのですが、今回の失敗を踏まえてすすめていきます。