

ホール電圧の角度依存性と最小二乗フィッティングの検討 その2

保磁力に近い回転磁場下でのふるまい

2015.4.14 鈴木 実

1. はじめに

強磁性体の残留磁化が外部磁場により回転する場合、外部磁場を回転したときのホール電圧の角度依存性は磁気異方性の効果により非正弦波的な角度依存性を示す [1-3]。以前の覚え書き [4] で、異方性定数が非対称の場合の磁氣的異方性によるホール電圧の角度依存性を計算したが、その際用いた回帰関数はいくつかある解の中から $\pi < \theta < 2\pi$ において磁氣的エネルギーが極大となる解を選択していた。これは実際には出現しない分枝である [3]。保磁力以下の回転外部磁場による磁化の回転においては、異方的磁化エネルギーのモデルを用いて磁化の回転角を決定する方程式を解く際に、エネルギーが極小となる解を選ばなければならない。この解は、磁化が磁化容易軸方向を向く場合であり、表記の問題に対してもこの解を取り上げる必要がある。この覚え書きでは、以上のことを考慮して、実験結果をより良く説明するモデルと新たな回帰関数を考える。これをもとに、垂直法最小二乗法による実験データへのフィッティング結果をメモする。

2. モデル

具体的な例は後で示すが (図1~図8のプロット)、上に述べたような条件下で実際に観察されるホール電圧角度依存性は、ホール電圧が直線的に増加して、 $\theta = \pi$ で不連続にジャンプし、 π から 2π まで似たような振る舞いを示す場合と、 $\theta = 0$ から π に非対称な U 字型の角度依存性を示し、 $\theta = \pi$ で不連続にジャンプして、 π から 2π で再び非対称な U 字型の角度依存性を示す場合である。両者の中間的な振る舞いも見られる。ここではこのようなふるまいを再現するモデルとして、薄膜面内の異方性定数が正と負の方向で非対称な場合を考え [3]、実験結果をより良く反映するようにモデルを精密化する。

ホール電圧が $\theta = \pi$ で不連続にジャンプするのは、 $\theta = \pi$ で異方性定数が不連続に変化するためと考える。(回転磁場による普通の磁化のジャンプでは \cos の値は不連続にならない。) $a < 1$ から $a > 1$ へ変化すれば $\theta = \pi$ における \cos の不連続が生じ、 a の差が大きければ不連続の段差も大きくなる。

一方、非正弦波的な U 字型のホール電圧は磁化 M に依存する磁気抵抗から生じており、 $a \simeq 0.2$ から ~ 0.8 の値の場合に顕著である。この場合は、磁化が外部回転磁場とともに遅延や先進を伴って回転している場合である。そうすると、ここで考えているような非対称なホール電圧角度依存性はキュリー点近傍で見られることから、半固定された磁化の部分と回転する磁化の部分の両方からの寄与が考えられる。そこで、実験結果を適切に説明するモデルとしてはこのような混合された状態を考えると都合がよい。回転するモデルとしては、前に述べたモデル [1] を使用できる。不連続にジャンプするモデルとしては、前のモデル [4] において、安定解 [3] を用いれば良い。

以上のような考えのモデルに基づき回帰関数 $F(x, y, a_k)$ を考えよう。まず、磁化が回転する部分の磁化の角度 [rad] を α_1 とする。つぎに、磁化が不連続にジャンプする部分の磁化の角度を α_2 とする。 α_2 を与える方程式の異方性定数は、0 から π にあるとき (a_8) と π から 2π にあるとき ($-a_9$) に符号と大きさが異なるとする。回転磁場の法線方向からの角度 [rad] を θ とする。実験データの角度 [deg] は x で表し、位相のずれ a_{10} があるとしよう。ホール端子間電圧 V_H への寄与は、異常ホール効果から $\cos \alpha_i$ ($i = 1, 2$)、磁気抵抗からの寄与が $\cos 2\alpha_i$ ($i = 1, 2$) である。これにドリフトとオフセットの部分を加えればホール電圧の角度依存性は

$$V_H = a_0 \cos \theta + a_1 \cos 2\alpha_1 + a_2 \cos \alpha_1 + a_3 \cos 2\alpha_2 + a_4 \cos \alpha_2 + a_5 x + a_6 \quad (1)$$

と表すことができる。ここで、 θ および α_i ($i = 1, 2$) は次の方程式で与えられる。

$$\theta = c(x - a_{10}) \quad (2)$$

$$\sin \phi_1 = a_7 \sin 2\alpha_1 \quad (0 < \theta < 2\pi) \quad (3)$$

$$\sin \phi_2 = \begin{cases} a_8 \sin 2\alpha_2 & (0 < \theta < \pi) \\ -a_9 \sin 2\alpha_2 & (\pi < \theta < 2\pi) \end{cases} \quad (4)$$

ただし、

$$\alpha_i = \theta + \phi_i \quad (i = 1, 2) \quad (5)$$

$$c = \pi/180 \quad (6)$$

である。

これから、変数 x 、ホール電圧 y 、パラメータ a_k ($k = 0, \dots, 10$) で表す回帰関数 $F(x, y, a_k)$ は次のようになる。

$$F(x, y, a_k) = a_0 \cos \theta + a_1 \cos 2\alpha_1 + a_2 \cos \alpha_1 + a_3 \cos 2\alpha_2 + a_4 \cos \alpha_2 + a_5 x + a_6 - y = 0, \quad (7)$$

この式を用いて、実際のホール電圧角度依存性のデータに垂直法による最小二乗フィッティングを行う。垂直法最小二乗法の正規方程式 [1, 5] に必要な微係数は以下の通りである。

$$F_0 = \frac{\partial F}{\partial a_0} = \cos \theta \quad (8)$$

$$F_1 = \frac{\partial F}{\partial a_1} = \cos 2\alpha_1 \quad (9)$$

$$F_2 = \frac{\partial F}{\partial a_2} = \cos \alpha_1 \quad (10)$$

$$F_3 = \frac{\partial F}{\partial a_3} = \cos 2\alpha_2 \quad (11)$$

$$F_4 = \frac{\partial F}{\partial a_4} = \cos \alpha_2 \quad (12)$$

$$F_5 = \frac{\partial F}{\partial a_5} = x_i \quad (13)$$

$$F_6 = \frac{\partial F}{\partial a_6} = 1 \quad (14)$$

$$F_7 = \frac{\partial F}{\partial a_7} = (-2a_1 \sin 2\alpha_1 - a_2 \sin \alpha_1) \frac{\partial \alpha_1}{\partial a_7} \quad (15)$$

$$F_8 = \frac{\partial F}{\partial a_8} = (-2a_3 \sin 2\alpha_2 - a_4 \sin \alpha_2) \frac{\partial \alpha_2}{\partial a_8} \quad (16)$$

$$F_9 = \frac{\partial F}{\partial a_9} = (-2a_3 \sin 2\alpha_2 - a_4 \sin \alpha_2) \frac{\partial \alpha_2}{\partial a_9} \quad (17)$$

$$F_{10} = \frac{\partial F}{\partial a_{10}} = ca_0 \sin \theta + (2a_1 \sin 2\alpha_1 + a_2 \sin \alpha_1) \frac{\partial \alpha_1}{\partial x} + (2a_3 \sin 2\alpha_2 + a_4 \sin \alpha_2) \frac{\partial \alpha_2}{\partial x} \quad (18)$$

ただし、上の式で、

$$\frac{\partial \alpha_1}{\partial a_7} = \frac{\sin 2\alpha_1}{\cos \phi_1 - 2a_7 \cos 2\alpha_1} \quad (19)$$

$$\frac{\partial \alpha_2}{\partial a_8} = \frac{\sin 2\alpha_2}{\cos \phi_2 - 2a_8 \cos 2\alpha_2} \quad (20)$$

$$\frac{\partial \alpha_2}{\partial a_9} = -\frac{\sin 2\alpha_2}{\cos \phi_2 + 2a_9 \cos 2\alpha_2} \quad (21)$$

$$\frac{\partial \alpha_1}{\partial x} = c \frac{\cos \phi_1}{\cos \phi_1 - 2a_7 \cos 2\alpha_1} \quad (22)$$

$$\frac{\partial \alpha_2}{\partial x} = c \frac{\cos \phi_2}{\cos \phi_2 - 2a_8 \cos 2\alpha_2} \quad (23)$$

である。式 (23) は $0 \leq \theta < \pi$ で成り立ち、 $\pi \leq \theta < 2\pi$ では a_8 を $-a_9$ に置き換える必要がある。

3. 数値計算とプログラム

具体的なプログラム Hall-angle-angular-least-aniso-3i-4.c と Hall-angle-angular-least-aniso-3i-3.c は同じ日付の 2015/4/14 の別のエントリーに示す。 a_9 が 1 以上の時に式 (11) は 2 つの解を有するが、上のプログラムはその 2 つの解に対応している。前者は、 $\theta = \pi$ で磁化がジャンプした後に $\alpha_2 = 0$ となる解に対応し、後者は $\alpha_2 = \pi$ となる解に対応している。2 つとも安定解であり、実現し得る。

回帰関数式 (1)–(6) はパラメータ a_k に関して非単調な変化をするので、最小二乗フィッティング計算で a_k の初期値を正しく選択しないとパラメータが発散するか、所望の収束値が得られない結果に終わる。したがって、適切なパラメータの初期近似値を選ぶ必要があるが、これまでの検討では自動的に初期近似値を探すルーチンはまだ得られていない。そこで本メモのプログラムでは、最初に実際にいくつかパラメータの値を代入して比較の実験結果に近い値が出た場合、それを初期近似値とした。実際の計算では fit-p-angle-3i-4.txt または fit-p-angle-3i-2.txt に記録してこれを読み込むか、もしなければ default としてプログラム内にある値を用いるようになっている。

回帰関数は a_k に関する非線形性が著しいので、1 回で得られる a_k の補正値をそのまま使うと発散する。そこで本プログラムでは、1 回解いた正規方程式の解を 0.02 倍した値を補正としている。これは前回のプログラム [4] と同様である。

ϕ を求める関数は `double aniso_magn_r(double a, double b)` で与えている。パラメータ a を a に、 b に θ を入れると ϕ が返される。これは異方性定数が正の場合である。異方性定数が負の場合は、 ϕ が正の場合よりも $\pm\pi/2$ シフトしていることから、 b の代わりに $b \pm \pi/2$ を入れれば良い。 $a < 1$ の場合、 ϕ は θ の周期 π の周期関数であるから、両方同じ値となる。 $a > 1.0$ の場合、 ϕ の周期が 2π となって、かつ安定解と不安定解の 2 種類が存在し、 $\theta = \pi/2$ で $\phi = 0$ が安定解、 $\theta = 0$ で $\phi = 0$ が不安定解である。異方性定数が $a < -1.0$ の場合も安定解と不安定解の 2 種類が存在し、 $b + \pi/2$ の場合に $\theta = 0$ で $\phi = 0$ となる解が安定解、 $b - \pi/2$ の場合に $\theta = 0$ で $\phi = 0$ となる解が不安定解である。 $a > 1$ の場合と比較して、それぞれ、 θ を $\pm\pi/2$ にしたときに相当する。 ϕ は安定解を選択する。

4. ホール抵抗率

ホール抵抗率 ρ_H は通常のホール抵抗率と異常ホール効果によるホール抵抗率の和である。後者は磁化の垂直成分、すなわち、 $\cos \phi(0)$ に比例する。これを、磁場反転によってホール電圧の符号を変える成分からの寄与と考えると、式 (6) で、前者は第 1 項、後者は第 3 項と第 5 項に対応する。磁場を反転した時に変化する量

がホール抵抗率に相当するとして、今の場合は、第5項の取り扱いが問題である。実験では磁場の角度が正確に $\theta = 0$ あるいは π からずれることや、ジャンプする途中の場合などが考えられるため、何か前提がないと求められない。そこでここでは、 $\theta = 0, \pi$ では過渡的状态にあり、ちょうど半分がジャンプしていると見なすことにして、それぞれジャンプの前後の値の平均をとり、 $\theta = 0$ と π の差はそれぞれの平均の差と考えることにする。そうすると、 $0 < \theta < \pi$ における α を α^+ と表し、 $\pi < \theta < 2\pi$ における α を α^- と表すことにすると、

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2}[\cos \alpha_2^+(0_+) + \cos \alpha_2^-(0_-)] - \frac{1}{2}[\cos \alpha_2^+(\pi_-) + \cos \alpha_2^-(\pi_+)] \\ &= \frac{1}{2}[\cos \alpha_2^+(0_+) - \cos \alpha_2^+(\pi_-)] - \frac{1}{2}[\cos \alpha_2^-(\pi_+) - \cos \alpha_2^-(0_-)] \\ &= \cos \phi_2(0) \end{aligned} \quad (24)$$

となる¹。ホール電圧への寄与はこの半分になる。そうするとこのような前提の場合にホール抵抗率は

$$\rho_H = a_0 + a_2 \cos \phi_1 + \frac{1}{2} a_4 \cos \phi_2(0) \quad (25)$$

で与えられる。

垂直法最小二乗フィッティングの結果を aniso-3i-4 の場合について図 1-4 に、aniso-3i-3 の場合について図 5-8 に示した。aniso-3i-4 は、 $a < -1$ のときに $\phi = 0$ を通る解を使用した場合で、aniso-3i-3 は、 $a < -1$ のときに $\phi = \pi$ または $\phi = -\pi$ を通る解を使用した場合である。

明らかに、aniso-3i-3 の場合のほうが良いフィットが得られている。(乖離のパラメータ L (垂線の長さの自乗の総和) を比較すればフィットの優劣がわかる。) これから判断すれば、aniso-3i-3 の前提として採用した方程式 (1) の解のうち、ジャンプ後に π を向く磁化のモデルが実験結果を良く表しているように見える。また、式 (25) を用いたホール抵抗率の値は両者ともほぼ同様であるが、aniso-3i-3 のほうが、予測される範囲に近いように見える。

このモデルが十分物理を反映するかその根拠にはまだ議論があるかもしれない。しかし、フィットはやや悪いとはいえ、ホール抵抗率の値を評価するという目的のためには、後者のモデル aniso-3i-3 が使用できると思われる。ただし、厳しい目で見れば両方共異方性定数の符号反転を十分説明できる具体的根拠に欠けていると指摘される面がある。その点で、このモデルはまだ十分とは言い難い。また、現象が複雑となりそれを表現するモデルのパラメータの数が多くなってしまった。このようなモデルにはまだ議論が必要であろうが、このようなフィッティングが必要な実験データは、特定の狭い温度範囲、磁場範囲の少数点であり、フィッティングから得られるホール抵抗率の評価値は、他の一般的なモデルを用いた評価値と大きく乖離していない。²

¹これは、 $\phi_2^+(\theta)$ が $\theta = \pi/2$ を中心に反対称であること、 $\alpha_2^+(\theta)$ が $a < -1$ の場合に振動し、 $\theta = n\pi$ において 0 になることから出てくる。詳細は次の脚注に示す。

² $a > 0$ の場合の ϕ と θ の関係はエントリー [1] の図 1 に示すように、 $\theta = \pi/2$ または $\theta = -\pi/2$ で反対称である。したがって、 $\theta = \pm\pi/2$ で $\phi = 0$ である。

$a < 0$ の場合は、 $|a|$ の場合の $\phi(\theta)$ を正または負の方向に $\pi/2$ シフトした関数で表される。すなわち、 ϕ^+ を $a > 0$ 場合を表すとすれば、 $-a$ の場合は、 $\phi^-(\theta) = \phi^+(\theta \pm \pi/2)$ である。 ϕ^+ は $a > 0$ の場合の ϕ で、以下で断らなければ ϕ は $a > 0$ の場合とする。

まず、明らかに、 $\phi^-(\theta)$ は $\theta = 0$ で反対称である。したがって、 $\phi^-(0) = 0$ である。

$|a| > 1$ の場合、 $\phi(\theta)$ は θ の短調減少関数になって、周期関数ではなくなる。さらに、 θ を π シフトした関数はすべて等価である。ここでは、 ϕ^- を $\theta = 0$ で 0 となる関数とし、 ϕ^+ を $\theta = \pi/2$ で 0 となる関数を考える。

$a < -1$ の場合の $\alpha = \phi^- + \theta$ を $\alpha^-(\theta)$ と書くことにする。

$$\sin \phi^- = a \sin 2\alpha^- \quad (A-1)$$

より、 $|a| > 1$ のときには α^- は $m\pi/2$ を中心として幅が $\pi/2$ よりも小さい 1 つの閉区間の内側に制限され、そこで振動する。一方、 ϕ^+ は短調減少関数であるから、 $\phi^+ = n\pi$ のときに、右辺は 0 になり $\alpha^+ = m\pi/2$ である。 $\theta = \pi/2$ のとき $\phi^+(\theta) = 0$ であるから $\alpha^+(\pi/2) = \phi^+(\pi/2) + \pi/2 = \pi/2$ となる。すなわち、 $m = 1$ である。したがって、 $\theta = n\pi$ のとき、 $\alpha^+(n\pi) = \phi^+(n\pi) + n\pi = \pi/2$ でなければならないから、

$$\phi^+(n\pi) = \pi/2 - n\pi \quad (A-2)$$

でなければならない。

$\phi^-(\theta)$ についても同様のことが成り立つ。 $\phi^-(\theta)$ は $\phi^+(\theta)$ を $\pi/2$ シフトしたものであるから、 $\theta = 0$ のとき $\phi^-(\theta) = 0$ であるから $\alpha^-(0) = \phi^-(0) = 0$ となる。したがって、 $\theta = n\pi$ のとき、 $\alpha^-(n\pi) = \phi^-(n\pi) + n\pi = 0$ でなければならないから、

$$\phi^-(n\pi) = -n\pi \quad (A-3)$$

でなければならない。
以上のことから、

$$\begin{aligned}\cos \alpha_2^+(\pi_-) &= \cos[\phi_2^+(\pi_-) + \pi] = \cos[-\phi_2^+(0_+) + \pi] = -\cos[\phi_2^+(0_+)] \\ \cos \alpha_2^-(\pi_+) &= \cos[\phi_2^-(\pi_+) + \pi] = \cos(-\pi + \pi) = 1 \\ \cos \alpha_2^-(0_-) &= \cos[\phi_2^-(0_-)] = \cos(0_+) = 1\end{aligned}$$

となる。これから、
ホール電圧を本文で述べたように $\theta = 0$ の平均と $\theta = \pi$ の平均の差とすると、

$$\begin{aligned}& \frac{1}{2}[\cos \alpha_2^-(0_-) + \cos \alpha_2^+(0_+)] - \frac{1}{2}[\cos \alpha_2^+(\pi_-) + \cos \alpha_2^-(\pi_+)] \\ &= \frac{1}{2}[\cos \alpha_2^+(0_+) - \cos \alpha_2^+(\pi_-)] - \frac{1}{2}[\cos \alpha_2^-(\pi_+) - \cos \alpha_2^-(0_-)] \\ &= \frac{1}{2}[\cos \alpha_2^+(0_+) + \cos \alpha_2^+(0_+)] - \frac{1}{2}[\cos\{\phi_2^-(\pi_+) + \pi\} - \cos \phi_2^-(0_-)] = \cos \alpha_2^+(0_+) - \frac{1}{2}[-\cos\{\phi_2^-(0_+)\} - \cos \phi_2^-(0_-)] \quad (\text{A-4}) \\ &= \cos \alpha_2^+(0_+) = \cos \phi_2^+(0_+) \quad (26)\end{aligned}$$

となる。したがって、式 (24) が得られる。

なお、 $a < -1$ のときの解 $\phi_2^-(\theta)$ として、 $\theta = 0$ のときに $\phi_2^- - \pm\pi$ となる関数を取り上げた場合を考えよう。このとき、式 (A-3) はそれぞれ、

$$\phi^-(n\pi) = -(n-1)\pi \quad (\text{A-5})$$

$$\phi^-(n\pi) = -(n+1)\pi \text{ となる。} \quad (\text{A-6})$$

そうすると、式 (A-4) の第 2 項大括弧内は、式 (A-5) の場合に、

$$\cos\{\phi_2^-(\pi_+) + \pi\} - \cos \phi_2^-(0_-) = \cos\{0 + \pi\} - \cos \phi_2^-(\pi_-) = 0$$

となり、式 (A-6) の場合にも、

$$\cos\{\phi_2^-(\pi_+) + \pi\} - \cos \phi_2^-(0_-) = \cos\{-2\pi + \pi\} - \cos \phi_2^-(\pi_-) = 0$$

となるから、結局、式 (25) の結果は変わらない。

ちなみに、 a が $\theta = 0, \pi$ で符号変化しない場合を考えてみよう。

まず、 $a > 0$ の場合、

$$\begin{aligned}\cos \alpha_2^+(0_+) - \cos \alpha_2^+(\pi_+) &= \cos \phi_2^+(0_+) - \cos\{\phi_2^+(\pi_+) + \pi\} \\ &= \cos \phi_2^+(0_+) + \cos\{\phi_2^+(\pi_+)\} = \cos \phi_2^+(0_+) + \cos\{-\phi_2^+(0_-)\} \\ &= 2 \cos \phi_2^+(0)\end{aligned}$$

となり、式 (??) の右辺第 2 項と同じである。

$a < 0$ の場合、

$$\begin{aligned}\cos \alpha_2^-(0_+) - \cos \alpha_2^-(\pi_+) &= \cos \phi_2^-(0_+) - \cos\{\phi_2^-(\pi_+) + \pi\} \\ &= \cos \phi_2^-(0_+) - \cos\{\phi_2^-(\pi_+) + \pi\} = \cos \phi_2^-(0_+) - \cos(-\pi + \pi) = 1 - 1 = 0\end{aligned}$$

となり、したがって、 $a < -1$ の場合はホール電圧成分は生じない。

[1] 200K-0.2T-Ca.txt

a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6
0.037447	0.014151	-0.043226	-0.048954	-0.001199	0.000429	-0.041289
a_7	a_8	a_9	a_{10}	L	$\rho_H(\mu \Omega \text{ cm})$	
0.239668	1.169048	1.060750	1.343431	9.755950e-05	-0.226336	

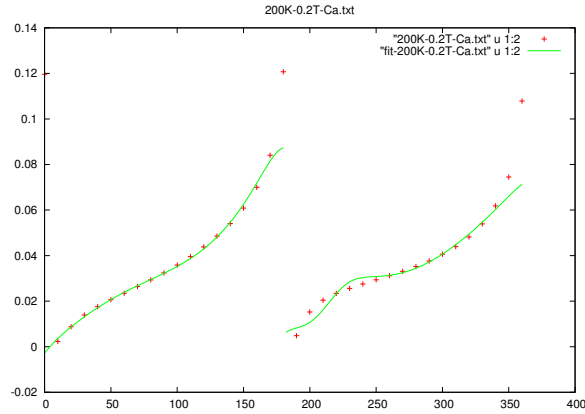


図 1: aniso-3i-4 による 200K-0.2T-Ca.txt へのフィット

[2] 200K-0.4T-Ca.txt

a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6
0.021917	0.017353	-0.032194	-0.040089	0.002724	0.000355	-0.024193
a_7	a_8	a_9	a_{10}	L	$\rho_H(\mu \Omega \text{ cm})$	
0.256488	1.211195	1.159180	1.863179	2.571055e-05	-0.364312	

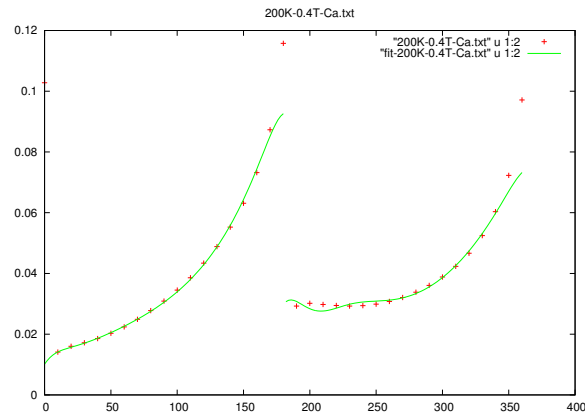


図 2: aniso-3i-4 による 200K-0.4T-Ca.txt へのフィット

[3] 200K-0.6T-Ca.txt

a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6
-0.000136	0.016778	-0.009662	0.006345	-0.034769	0.000140	0.040384
a_7	a_8	a_9	a_{10}	L	$\rho_H(\mu \Omega \text{ cm})$	
0.334130	4.688219	1.071968	-3.652541	1.460775e-04	-0.436955	

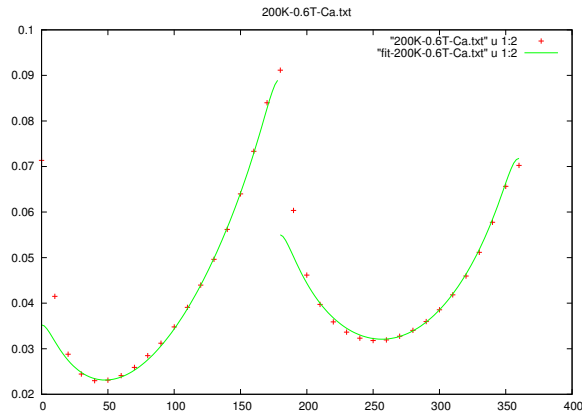


図 3: aniso-3i-4 による 200K-0.6T-Ca.txt へのフィッティング.

[4] 200K-0.8T-Ca.txt

a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6
-0.008156	0.020510	-0.002079	-0.010213	0.002517	0.000102	0.030567
a_7	a_8	a_9	a_{10}	L	$\rho_H(\mu \Omega \text{ cm})$	
0.292737	0.876003	0.999996	-1.345854	2.356191e-04	-0.309671	

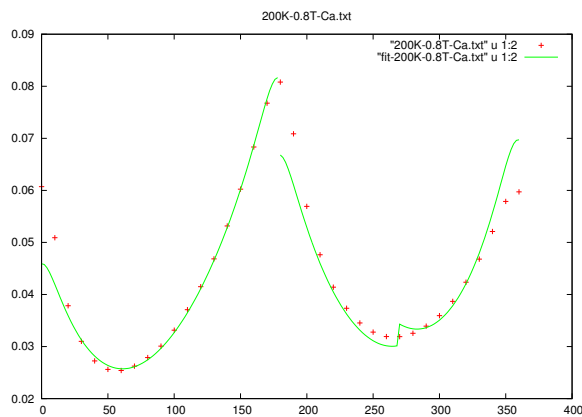


図 4: aniso-3i-4 による 200K-0.8T-Ca.txt へのフィッティング.

[5] 200K-0.2T-Ca.txt

a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6
-0.021231	-0.003056	-0.032866	0.148059	0.464912	0.001009	0.085949
a_7	a_8	a_9	a_{10}	L	$\rho_H(\mu \Omega \text{ cm})$	
0.401977	2.402203	1.011427	0.279220	3.347457e-05	-0.214237	

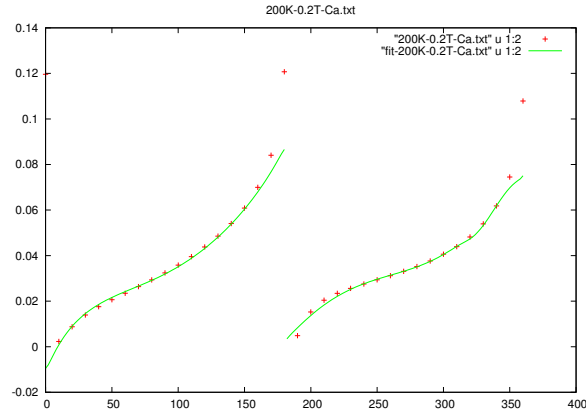


図 5: aniso-3i-3 による 200K-0.2T-Ca.txt へのフィット

[6] 200K-0.4T-Ca.txt

a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6
-0.012839	0.009428	-0.018910	0.080506	0.263791	0.000604	0.065880
a_7	a_8	a_9	a_{10}	L	$\rho_H(\mu \Omega \text{ cm})$	
0.392922	2.937642	1.059766	0.738532	9.261056e-06	-0.348721	

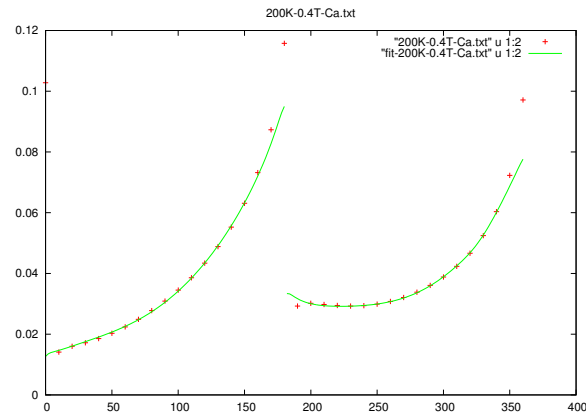


図 6: aniso-3i-3 による 200K-0.4T-Ca.txt へのフィット

[7] 200K-0.6T-Ca.txt

a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6
0.008894	0.022805	-0.006864	-0.077837	-0.149453	0.000018	-0.025504
a_7	a_8	a_9	a_{10}	L	$\rho_H(\mu \Omega \text{ cm})$	
0.405220	2.698922	2.168083	-0.086004	1.577645e-05	-0.443023	

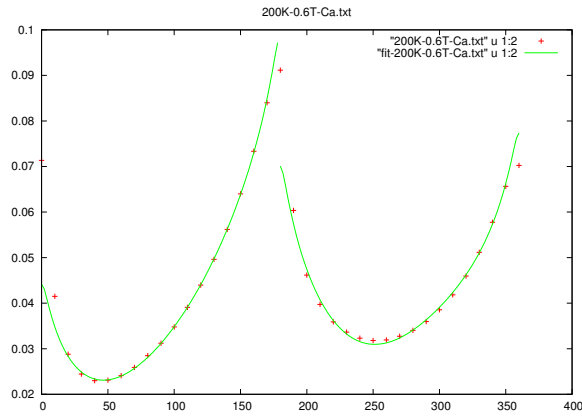


図 7: aniso-3i-3 による 200K-0.6T-Ca.txt へのフィッティング.

[8] 200K-0.8T-Ca.txt

a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6
-0.003670	0.023317	-0.113219	-0.000973	0.212037	0.001188	-0.054934
a_7	a_8	a_9	a_{10}	L	$\rho_H(\mu \Omega \text{ cm})$	
0.400488	0.398423	3.427241	0.039433	6.077650e-06	-0.407629	

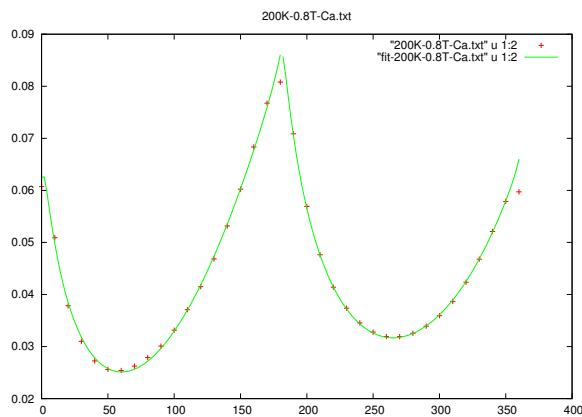


図 8: aniso-3i-3 による 200K-0.8T-Ca.txt へのフィッティング.

参考文献

- [1] 「磁気異方性媒質中の磁場と磁化の方向及び磁気抵抗の角度依存性(pdf)」(2014/12/6のエントリー).
http://totoha.web.fc2.com/anisotropic_magnetism.pdf
- [2] 「異常ホール効果電圧角度依存性への垂直法最小二乗フィッティング(pdf)」(2014/12/7のエントリー).
http://totoha.web.fc2.com/hall_voltageAngular.pdf
- [3] 「強磁性媒質中の磁化の方向および非対称角度依存性(改訂)(pdf)」(2015/4/4のエントリー).
http://totoha.web.fc2.com/anisotropic_magnetism-3.pdf
- [4] 「強磁性媒質中の磁化の方向および非対称角度依存性(pdf)」(2014/12/25のエントリー).
http://totoha.web.fc2.com/anisotropic_magnetism-2.pdf

2019.4.19 一部追加, 一部改訂