

外部変調下における磁区構造パターンの発展

Evolution of pattern of magnetic domain structure under the external modulation

(平成17年9月受理)

三浦 靖一郎* (MIURA Seiichiro)

Abstract

The evolution of a two-dimensional labyrinth pattern of magnetic domain structure in a uniaxial garnet thin film is studied. The usually observed domains of the labyrinth structure contain many defects. The labyrinth structure changes to a parallel-stripe structure under magnetic field cycles. In this evolution, defects of the domain pattern disappear. We have introduced a number of magnetic domain junctions as characteristic values of a domain pattern. We have reported that the number of junctions decreases with the power law as a function of the number of ac magnetic field cycles. In this paper, it is found that a one-dimensional correlation function of pattern of magnetic domain structure changes with the number of field cycles as same as the number of junctions decreases.

1. Introduction

草木に見られる枝分かれ，山並みや雲，煙や乱流がつくる渦巻きなどの自然界のパターンは，これまで直感的，また定性的にしか捉えられていなかった。しかし，一見ランダムにしか見えないこれらのパターンにも何か統計的な規則性があるのではないかという疑問や，コンピュータ技術の飛躍的發展，それに付随した画像処理法の進歩によって，近年，物理学においてもパターン問題が取り扱われるようになった。

パターン問題は，水と油といった2種類の液体における相分離問題や結晶成長，BZ反応やTuring反応のような化学反応によるもの，高分子のかたちや液晶分子が示すパターン，そして磁性流体など，分野を問わず私たちの身の回りに数多く存在する。¹⁻⁵⁾ 本研究では，種々のパターン問題がある中で，磁性体薄膜にみられる磁区構造がつくりだすパターン，とりわけ，迷路状磁区におけるストライプ状

磁区の発展について取り扱う。

パターン問題の研究対象として磁性体薄膜を用いる利点は，偏光顕微鏡など比較的小さな設備で磁区構造を観察することができること，磁場や温度などの外部パラメータによる多彩な構造が見られることである。また，近年，磁性体薄膜は，光ファイバ同士を低損失で接続する部品（光アイソレータ）の中に利用されており，素子の安定動作のために磁区構造の状態を知ることが望まれていることも挙げられる。⁶⁾

これまでの研究では，複雑な迷路状磁区構造がストライプ状磁区構造へ緩和していく過程で，磁区上に見られる三つ又状分岐点も磁区構造の緩和と共に減少していくことを報告してきた。⁷⁾ ここでは，この緩和過程を定量的な解析を行うことで，空間的な長距離秩序の特長について報告する。

2. Materials

本研究で用いた磁性体薄膜は、希土類鉄ガーネット (Rare-earth garnet : RIG) の R^{3+} の一部を Bi^{3+} で置換した (RBi)IG 単結晶 (組成: $(Ho_{1.2}Tb_{0.6}Bi_{1.2})Fe_5O_{12}$) であり、その特長を表 1 に示す。この単結晶は、Bi 置換により、置換前と比べて数倍の Faraday 効果が得られ、さらに、薄膜にすることで波長 $1\mu m \sim 2\mu m$ の近赤外領域で透明となるので、偏光顕微鏡を利用した磁区観察ができる。

表1 磁性体薄膜試料の特長

| | |
|---------|--|
| 組成 | $(Ho_{1.2}Tb_{0.6}Bi_{1.2})Fe_5O_{12}$ |
| 結晶構造 | 立方晶系 |
| 空間群 | $O_h(10)-(Ia3d)$ |
| 作製方法 | 液相エピタキシャル(LPE)法 |
| 種結晶 | $Gd_3Ga_5O_{12}$ (GGG) [111]基板 |
| 大きさ | 4[mm ²] |
| 厚さ | 20[μm] |
| 飽和磁場 | 約 450[Oe] |
| ストライプの幅 | 約 10[μm] |

また、(RBi)IG 単結晶は、 $Gd_3Ga_5O_{12}$ (GGG){111} 基板上に液相エピタキシャル (Liquid phase epitaxy : LPE) 法によって育成されたもので、結晶の成長方向に対して特定の方向を磁化容易軸とする一軸異方性のため、ゼロ磁場下では膜面に垂直な 2 方向の磁区により迷路状の磁区構造を形成する。従って、この薄膜の磁区構造は、上向き磁区と下向き磁区を生じる二次元イジング・モデルとして扱える。

磁性体薄膜試料の磁区は、その全磁気エネルギーが最小となるように多磁区構造をとる。通常、ゼロ磁場下では迷路状であり、残留磁化がない場合、上向き磁区と下向き磁区の割合は等しくなる。図 1 に、偏光顕微鏡で観察される磁区構造と磁区の三つ又状分岐点を示す。

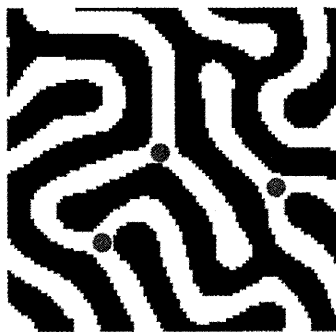


図1 偏光顕微鏡により観察される磁区構造と三つ又状磁区
白黒の領域がそれぞれ上向き磁区・下向き磁区を示す。
灰色の点は、磁区の三つ又状分岐点を示す。

3.Experiments

試料の磁区構造は偏光顕微鏡を用いて観察する。試料の磁区構造を変化させるため、外部から変調を加えた。本研究では、ソレノイド状コイルの中心に試料を置き、試料の磁化容易軸方向である膜面に垂直方向に磁場を加えた。

磁区構造の変化を調べるために、同じ条件のパターンを生成する必要がある。そのため、まず試料に外部静磁場を加えて磁氣的飽和状態、すなわち、単磁区構造にする。その後、急速に外部静磁場を取り除くと、上向き磁区と下向き磁区が複雑に入り乱れた磁区構造が得られる。この複雑な磁区構造は、安定した再現性を持つため、これを初期状態とした。

ゼロ磁場下での自発磁化による磁区構造の変化は、極めて遅くほとんど変化しない。そこで、磁区構造の変化を早めるために、外部から熱的ゆらぎとして交番磁場を印加する。ほぼ孤立系のパターン発展として取り扱うため、印加する交番磁場は、磁区の動きが外部磁場に追従できる範囲とし、飽和磁場に対して小さく振動数が低いものを選んだ。また、実験は室温にて行った。

4. Results

初期状態から、振動数 0.25[Hz]、大きさ 170[Oe]の正弦波状の交番磁場を 3000 回印加したときの磁区構造の変化を図 2 に示す。図 2 より、交番磁場の印加回数と共に複雑さが徐々に緩和し、上向き磁区と下向き磁区が平行にそろったストライプ状磁区の領域が大きくなっていくことがわかる。また、磁区の三つ又状分岐点は、初期状態ではほぼ均一に存在するが、印加回数と共に、ストライプ状磁区の周辺に分布することがわかる。ストライプ状磁区の領域は、印加回数が 500 回を過ぎたあたりから急速に広がっていく。

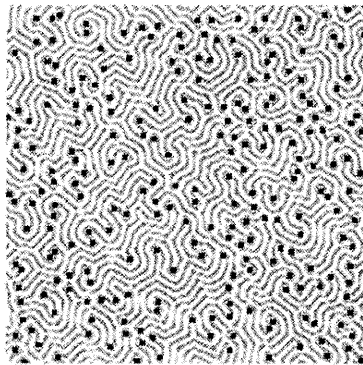
5.Discussion

これまでの研究で、この条件下での磁区の三つ又状分岐点は、交番磁場の印加回数と共に、次式に示すべきの法則によって減少することがわかっている。

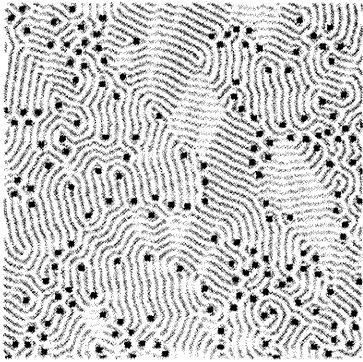
$$N = N_1 \cdot n^{-\alpha}$$

ここで、 N はある印加回数時の分岐点数、

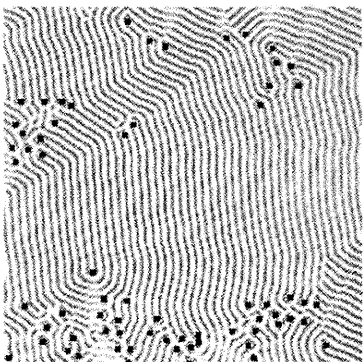
N_1 は初期状態での分岐点数, n は印加回数, α は定数であり, 印加磁場の大きさにより異なる. また, α は磁区構造の緩和過程の変化に対応して傾きがかかることがわかっている.



(a)



(b)



(c)

図2 印加回数による磁区構造の緩和過程

印加した交番磁場は振動数 0.25[Hz], 大きさ 170[Oe] である. 印加回数はそれぞれ(a) 1 回, (b) 500 回, (c) 3000 回を示す. ここで, 画像領域は $300 \mu\text{m} \times 300 \mu\text{m}$ であり, ■ は分岐点を示す.

ここでは, 磁区構造パターンの緩和過程を, 相関関数を用いて調べる. 磁化の分布は二次元であり, 交番磁場の印加回数が n 回のある位置 r における Faraday 効果による通過光強度 $I(r, n)$ は

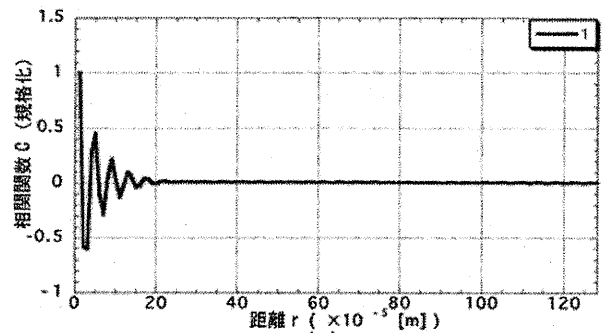
$$I(r, n) = A \cos^2 \phi(r, n)$$

と表すことができる. ここで, $\phi(r, n)$ は試料の磁化方向と顕微鏡内にある偏向子の偏向方向のなす角, A は試料の磁気異方性などで決まる定数である.

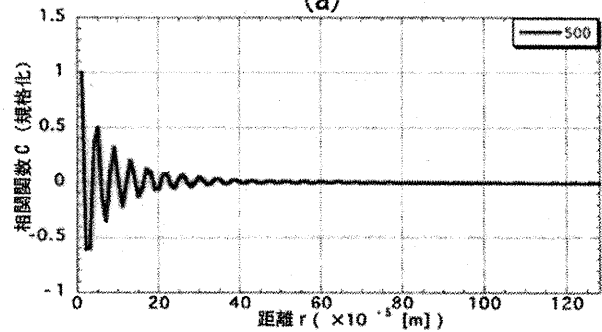
このとき, 磁化の相関関数 $C'(r, n)$ は

$$C'(r, n) = \frac{\langle (I(r, n) - \langle I \rangle) (I(0, n) - \langle I \rangle) \rangle}{\langle (I(r, n) - \langle I \rangle)^2 \rangle}$$

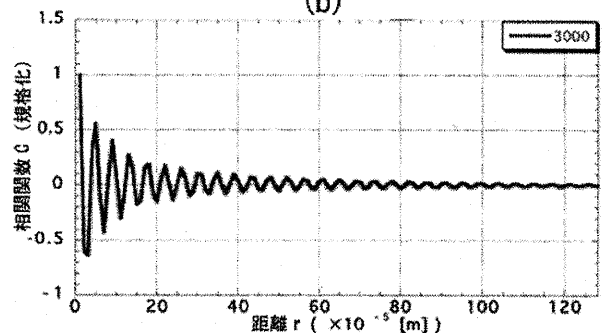
で定義される.



(a)



(b)



(c)

図3 印加回数による磁区構造の緩和過程

印加した交番磁場は振動数 0.25[Hz], 大きさ 170[Oe] である. 印加回数はそれぞれ(a) 1 回, (b) 500 回, (c) 3000 回を示す. ここでの相関関数 $C(r, n)$ は, $C(\infty, n) = 0$, $C(0, n) = 1$ として規格化したものである. 通常, 磁区構造パターンの場合, 中心から距離 r が離れるに連れて相関がなくなる.

ここで、 $\langle f(r,n)f(0,n) \rangle$ は、 $f(r+r',n)f(r',n)$

の r' における空間平均である。実験結果の解析においては、観察した画像を 256 画素×256 画素分割し、二次元 Fourier 変換から得られるパワースペクトルを逆 Fourier 変換することにより二次元相関関数 $C'(r,n)$ をまず得る。さらに、位置 r が一定の場所で、 $C'(r,n)$ を角度方向に平均し、解析画像の中心から動径方向の一次元相関関数 $C(r,n)$ を得る。

この方法による一次元相関関数 $C(r,n)$ を図 4 に示す。

図 4 より、交番磁場の印加回数と共に磁区構造の相関が伸びていることがわかる。すなわち、これは、磁区が不規則な迷路状状態から規則的なストライプ状の状態となったことで、空間的な相関が広がったことを意味する。

さらに、この相関関数を中心からの距離 r に関する包絡線の式

$$y(n) = B \cdot e^{-\frac{r}{\tau_n}}$$

で近似して相関長を調べると、磁場の印加回数に伴う相関長 τ_n は、ベキの法則に従って増加する傾向があり、分岐点数の減少傾向の変化に対応していることがわかった。

ここで、 B は定数、 r は解析画像中心からの距離、 τ_n は相関長を示す。

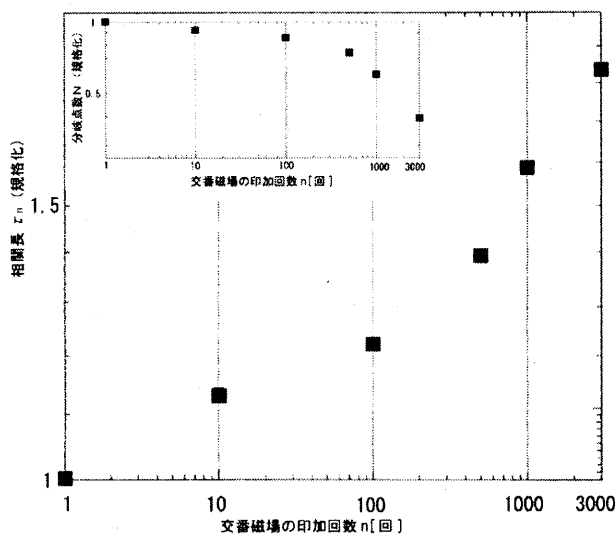


図 4 印加回数による磁区構造の緩和過程

印加した交番磁場は振動数 0.25[Hz]、大きさ 170[Oe]

である。図中の挿入図は、印加回数における分岐点数の変化を示す。それぞれ、磁場の印加回数が 1 回のときの値で規格化している。

6. Conclusion

(RBi)IG 単結晶磁性体薄膜試料において、外部磁場により磁氣的飽和をさせ、再現性のよい複雑な磁区構造パターンをつくりだし、外部変調である交番磁場を 3000 回まで印加したときの磁区構造のパターン変化を調べた。

磁区構造は、磁場の印加回数と共に迷路状状態から徐々にストライプ状状態へ緩和する。その緩和過程において、磁区構造に見られる三つ又状分岐点の減少傾向と磁区構造の空間的遷移が対応する傾向があることがわかった。

7. Remarks

この研究は、平成 15 年度および平成 16 年度の文部科学省の科学研究補助を利用して行った。

参考文献

- [1] ド・ジャン, “高分子の物理学”, 吉岡書店, 1984 年
- [2] 齋藤幸夫, “結晶成長”, 裳華房, 2002 年
- [3] 吉川研一, “非線形科学”, 学会出版センター, 1992 年
- [4] 松下貢, “フラクタルの物理”, 裳華房, 2002 年
- [5] N.Mason, et.al., “Scaling Behavior of Two-Time Correlations in a Twisted Nematic Liquid Crystal”, 70, 190-193, Physical Review Letters, 1993
- [6] 白井一志, “ビスマス置換磁性ガーネット単結晶における、磁区形成機構の研究と光磁気センサへの応用”, 博士論文, 岡山大学, 1999 年
- [7] M.Mino, S.Miura, K.Dohi and H.Yamazaki, “Relaxation of magnetic domain structure in garnet thin film under field cycles”, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 12-23 1560-1562 (2001)