

# ゼミ レポート 07

山田朔也

2022 年 6 月 27 日

## 1 本レポートについて

本レポートは 6 月 14 日に行われたゼミにて出題された課題に対するレポートとなっている。課題の内容は、前回のレポートで計算した 1 次元磁膜を 2 次元に拡張することとなる。

## 2 原理

### 2.1 2 次元 Bloch 磁壁

2 次元では、膜の表面付近で磁気モーメントが膜面に平行な方向を向くことにより、膜の表面に現れる磁極が減少し、静磁エネルギーが減少させることができる。よって、2 次元の Bloch 磁壁の磁化構造は図 1 で表される。

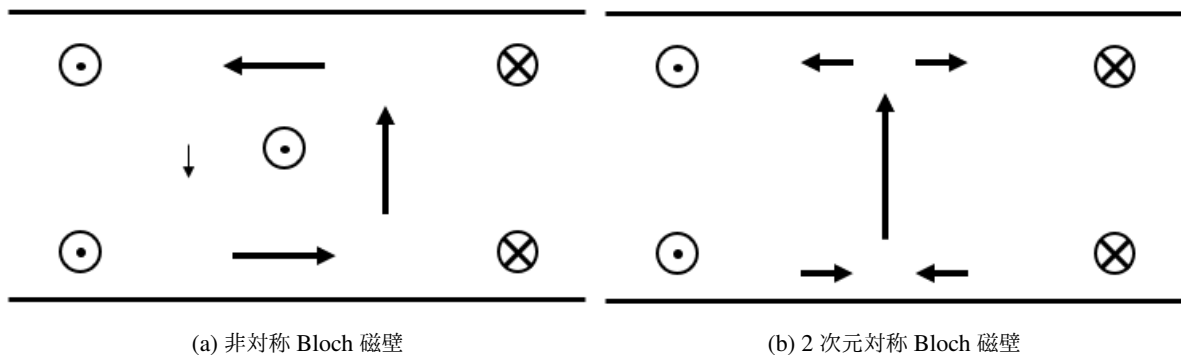


図 1: 2 次元 Bloch 磁壁の磁化構造の概念図

### 2.2 2 次元 Néel 磁壁

2 次元 Néel 磁壁の磁化構造とその周りに発生する磁極は図 2 で表される。

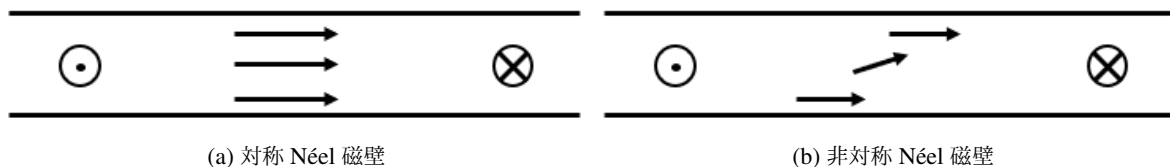


図 2: 2 次元 Néel 磁壁の磁化構造の概念図

なお、非対称 Néel 磁壁は、対称 Néel 磁壁が発生する条件よりさらに膜厚を厚くしていくと現れる。ただし、厚くしすぎると Bloch 磁壁が現れる。

## 2.3 自由境界条件

2 次元磁壁の磁化構造を求める場合、 $\pm x$  の境界領域はディレクレ条件を用い、 $\pm z$  の境界領域はノイマン条件を用いる。

ノイマン条件は、境界上で次の関係を満たすように磁気モーメントの向きを設定する。

$$\frac{d\vec{M}}{dn} = 0 \quad (1)$$

ここで  $\mathbf{n}$  は境界領域での法線方向となる。

今回の計算では、計算領域の外に仮想的に 0 番目の計算セルを想定し、その位置での磁気モーメントの向きと、1 番目のセルの磁気モーメントの向きを用いて、式 2 の関係が成り立つようにする。

$$\frac{\delta \vec{M}}{\delta z} = \frac{\vec{M}_1 - \vec{M}_0}{dz} = 0 \quad (2)$$

この式より、計算領域の外の仮想セルでの磁気モーメントの向きは、計算領域の端の点での向きと同じものを設定すれば良いことが分かる。

## 3 問題

### 3.1 問題内容

問題内容は、膜厚方向の磁化構造も考慮した 2 次元計算を行う。その上で、以下の内容を調べる。

1. 2 次元計算での静磁界係数式を導出する。
2. 静磁界係数を求めるプログラムを作成し、対称性を調べる。
3. 2 次元の Bloch 磁壁及び Néel 磁壁の磁化構造を求め、得られた磁化構造を図で示す。
4. 計算点と計算時間の関係をグラフで示す。

上記の項目をそれぞれ小問 1-4 として回答をしていく。

### 3.2 材料定数等

材料定数等は、各小問の欄で特筆しない限り以下のものを使用する。

- 飽和磁化  $M = 800 \text{ emu/cm}^3$
- 交換スティフネス定数  $A = 1 \times 10^{-6} \text{ erg/cm}$
- 異方性定数  $K_u = 0 \text{ erg/cm}^3$
- 損失定数  $\alpha = 1$
- 磁気回転比  $|\gamma| = 1.76 \times 10^7 \text{ rad/(s} \cdot \text{Oe)}$
- 時間刻み  $dt = 0.1 \times 10^{-12} \text{ s}$
- 格子間隔  $dx = 80 \text{ \AA}$
- 格子間隔  $dz = 80 \text{ \AA}$
- x 方向の計算点数  $nx = 30$
- z 方向の計算点数  $nz = 20$
- x 方向の境界領域では、ディレクレ条件を用い、左端を (0,-1,0)、右端を (0,1,0) とする。
- z 方向の境界領域では、ノイマン条件を用いる。
- 初期値 (非対称 Bloch 磁壁):
  - 膜表面:図 1a に示した表面付近の磁化構造
  - 表面以外:1 次元 Bloch 磁壁の計算で用いたもの
- 初期値 (対称 Bloch 磁壁):
  - 膜表面:図 1b に示した表面付近の磁化構造
  - 表面以外:1 次元 Bloch 磁壁の計算で用いたもの
- 初期値 (非対称 Néel 磁壁):
  - 膜表面:1 次元 Néel 磁壁の計算で用いたもの
  - 表面以外:mx,mz をそれぞれ 0.5 に設定
- 初期値 (対称 Néel 磁壁):1 次元 Néel 磁壁の計算で用いたもの

### 3.3 小問 1

この問題では、2 次元計算での静磁界係数を導出する。

まず、静磁界は、z 軸に平行な辺が作る磁界と、x 軸に平行な辺が作る磁界のふたつあり、それぞれ式 3,4,5,6 で表された。

$$H_x = -2Mx \left( \tan^{-1} \frac{z1}{x1} - \tan^{-1} \frac{z1}{x0} - \tan^{-1} \frac{z0}{x1} + \tan^{-1} \frac{z0}{x0} \right) = q_{xx} \cdot mx \quad (3)$$

$$\left( \text{但し } \frac{z1}{x1}, \frac{z1}{x0}, \frac{z0}{x1}, \frac{z0}{x0} \text{ は } -\frac{2}{\pi} \text{ から } \frac{2}{\pi} \text{ の値} \right)$$

$$H_z = -Mx \left[ \log(x1^2 + z1^2) - \log(x1^2 + z0^2) - \log(x0^2 + z1^2) + \log(x0^2 + z0^2) \right] = q_{xz} \cdot mx \quad (4)$$

$$H_z = -2Mz \left( \tan^{-1} \frac{x1}{z1} - \tan^{-1} \frac{x1}{z0} - \tan^{-1} \frac{x0}{z1} + \tan^{-1} \frac{x0}{z0} \right) = q_{zz} \cdot mz \quad (5)$$

$$\begin{aligned} H_x &= -Mz \left[ \log(z1^2 + x1^2) - \log(z1^2 + x0^2) - \log(z0^2 + x1^2) + \log(z0^2 + x0^2) \right] \\ &= q_{zx} \cdot mz = q_{xz} \cdot mz \end{aligned} \quad (6)$$

これらの式を、まとめることで式 7,8 として表される。

$$H_x = q_{xx} \cdot mx + q_{xz} \cdot mz \quad (7)$$

$$H_z = q_{xz} \cdot mx + q_{zz} \cdot mz \quad (8)$$

ここで、今回は前回と異なり、計算セルが 2 次元方向に存在しているため、それを踏まえて考えると  $q_{xx}, q_{zz}, q_{xz}$  はそれぞれ式 9,10,11 で表される。

$$q_{xx}(k,l) = -2M \left( \tan^{-1} \frac{(l+0.5)dz}{(k+0.5)dx} - \tan^{-1} \frac{(l+0.5)dz}{(k-0.5)dx} - \tan^{-1} \frac{(l-0.5)dz}{(k+0.5)dx} + \tan^{-1} \frac{(l-0.5)dz}{(k-0.5)dx} \right) \quad (9)$$

$$q_{zz}(k,l) = -2M \left( \tan^{-1} \frac{(k+0.5)dx}{(l+0.5)dz} - \tan^{-1} \frac{(k-0.5)dx}{(l+0.5)dz} - \tan^{-1} \frac{(k+0.5)dx}{(l-0.5)dz} + \tan^{-1} \frac{(k-0.5)dx}{(l-0.5)dz} \right) \quad (10)$$

$$q_{xz}(k,l) = -M \log \left[ \{(k+0.5)dx\}^2 + \{(l+0.5)dz\}^2 \right] + M \log \left[ \{(k-0.5)dx\}^2 + \{(l+0.5)dz\}^2 \right] \\ + M \log \left[ \{(k+0.5)dx\}^2 + \{(l-0.5)dz\}^2 \right] - M \log \left[ \{(k-0.5)dx\}^2 + \{(l-0.5)dz\}^2 \right] \quad (=0) \quad (11)$$

ここで、 $k$  は  $x$  方向の番目を表し、 $l$  は  $z$  方向の番目を表す。

### 3.4 小問 2

この問題では、静磁界係数を求めるプログラムを作成し、対称性を調べる。まずは式 9,10,11 で表される  $q_{xx}, q_{zz}, q_{xz}$  の計算結果を、表 3 にまとめた。ただし、 $n_x = 4$ ,  $n_d = 2$  として計算は行った。

$l \backslash k$	-3	-2	-1	0	1	2	3
-1	128.047	192.998	0.000	-1483.672	0.000	192.998	128.047
0	177.595	397.936	1483.672	-5026.548	1483.672	397.936	177.595
1	128.047	192.998	0.000	-1483.672	0.000	192.998	128.047

(a)  $q_{xx}$  の計算結果

$l \backslash k$	-3	-2	-1	0	1	2	3
-1	-128.047	-192.998	0.000	1483.672	0.000	-192.998	-128.047
0	-177.595	-397.936	-1483.672	-5026.548	-1483.672	-397.936	-177.595
1	-128.047	-192.998	0.000	1483.672	0.000	-192.998	-128.047

(b)  $q_{zz}$  の計算結果

$l \backslash k$	-3	-2	-1	0	1	2	3
-1	-128.047	-192.998	0.000	1483.672	0.000	-192.998	-128.047
0	-177.595	-397.936	-1483.672	-5026.548	-1483.672	-397.936	-177.595
1	-128.047	-192.998	0.000	1483.672	0.000	-192.998	-128.047

(c)  $q_{xz}$  の計算結果

図 3: 静磁界係数の計算結果

表 3 から、 $q_{xx}, q_{zz}$  は  $k, l = 0$  を中心として対称となった。また  $q_{xz}$  は同じく中心を対称としているが、正負が逆転するという結果となった。

### 3.5 小問 3

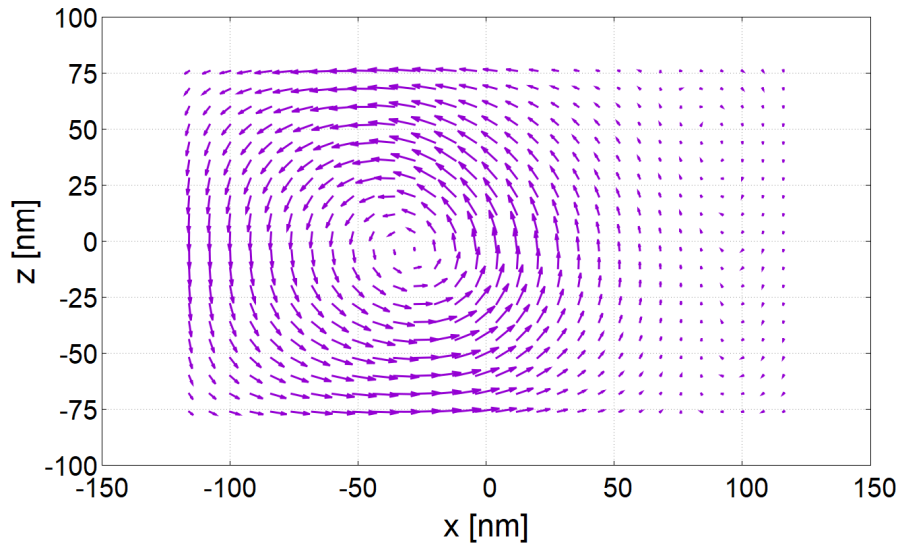
この小問では、2次元の Bloch 磁壁及び Néel 磁壁の磁化構造を求め、得られた磁化構造を図で示す。

ただし、第3章2節の材料定数のままでは Bloch 磁壁が出てきてしまうため、計算条件を工夫した。工夫内容は、まず  $n_z = 12$  とする。対称 Néel 磁壁の算出時は  $dz = 10 \text{ \AA}$ 、非対称 Néel 磁壁の算出時は  $dz = 35.9 \text{ \AA}$  とした。

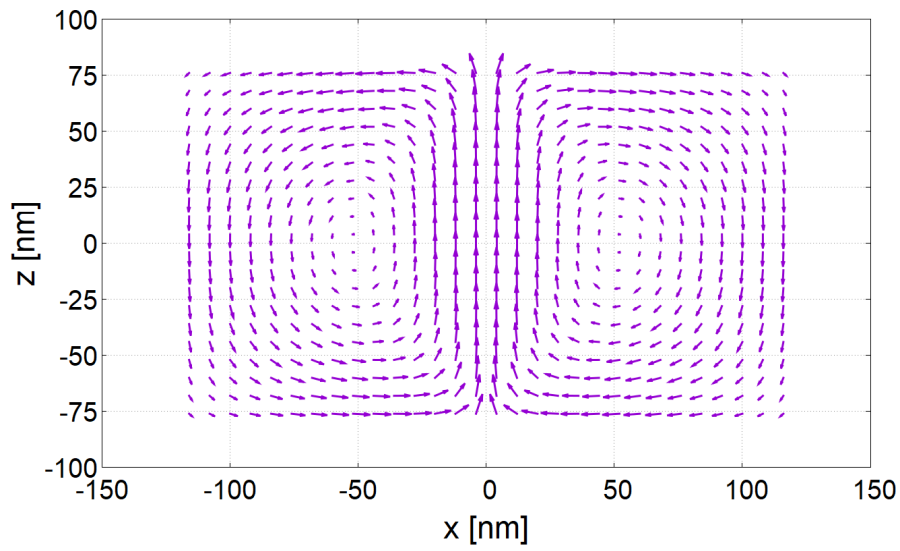
対称 Néel 磁壁や、非対称 Néel 磁壁を計算するときに、この膜厚を大きくしたところ、対称 Néel 磁壁は非対称 Néel へと変わってしまい、非対称 Néel 磁壁は Bloch 磁壁の形に変わってしまった。

また、第3章2節にあるように、非対称 Néel 磁壁を計算する場合は、事前に表面以外の磁気モーメントを  $x, z$  正方向に向けておくことで得られやすかった。

計算結果の図は、gnuplot のベクトル表示の機能を使用して作成した。その結果を図 4,5 として示す。

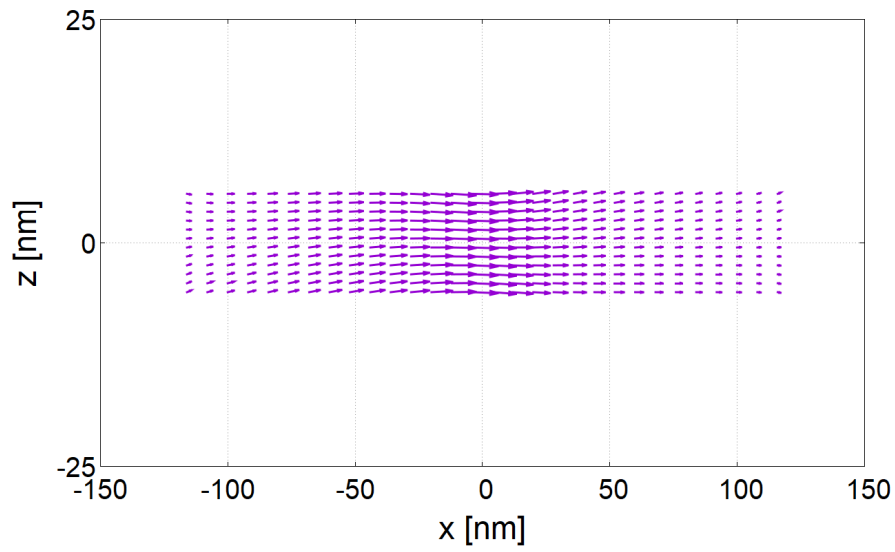


(a) 非対称 Bloch 磁壁の磁化構造

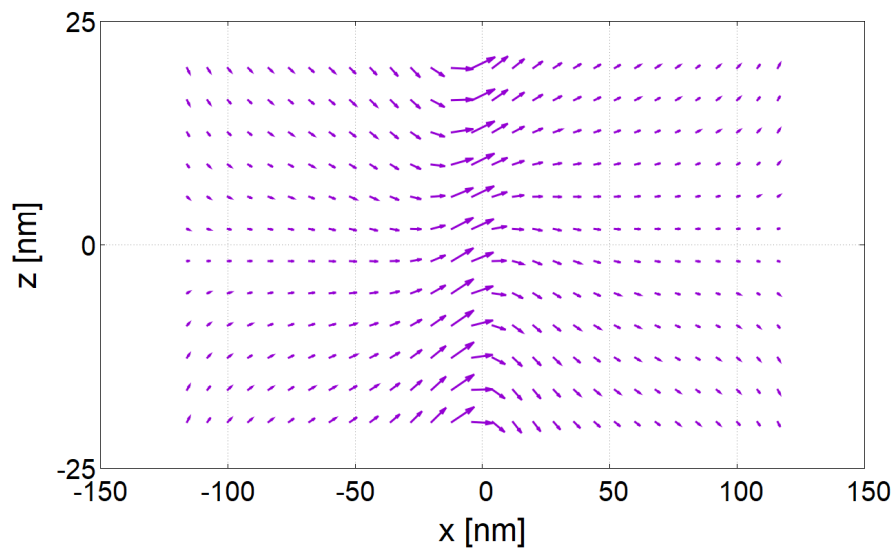


(b) 対称 Bloch 磁壁の磁化構造

図 4: 計算によって得られた Bloch 磁壁の磁化構造



(a) 対称 Néel 磁壁の磁化構造



(b) 非対称 Néel 磁壁の磁化構造

図 5: 計算によって得られた Néel 磁壁の磁化構造

図 4, 5 から幾つかわかったことがある。まず、対称非対称に限らず、Bloch 磁壁は図 1 の概念図と非常に近い形で計算がされた。また、Néel 磁壁に関しては、対称は概念図とほぼ一致した。非対称は概念図と多少異なるものの概ね想定通りの形となった。

### 3.6 小問 4

この小問では、計算点と計算時間の関係をグラフで示す。該当のグラフは図 6 としてまとめた。

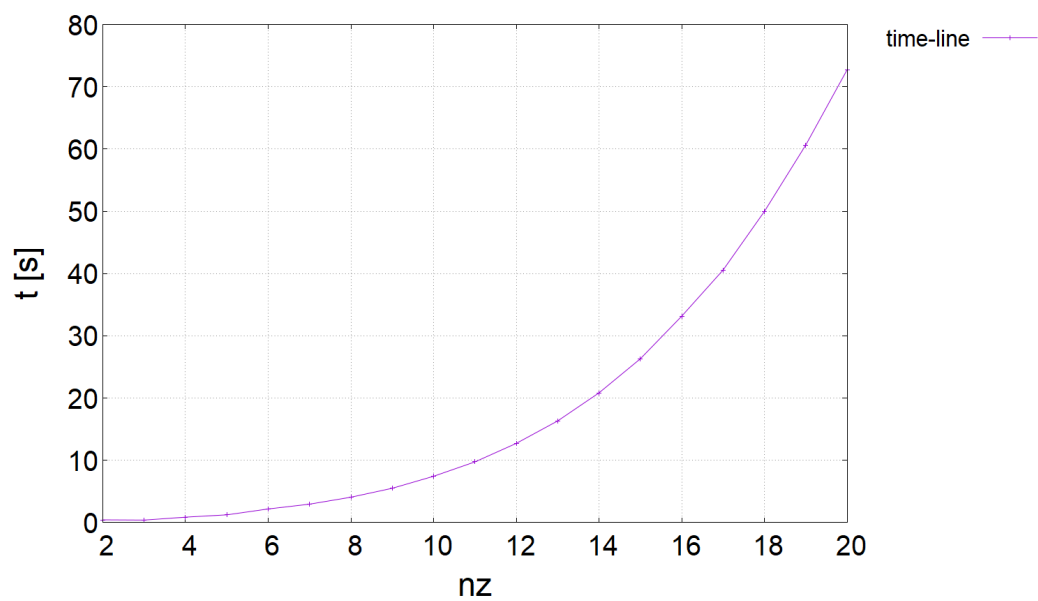


図 6: 計算点数と計算時間の関係のグラフ

この図 6 から、計算時間は  $nz$  の二乗に比例して増加していることが分かる。

## 4 参考文献

- 配布されたテキスト