縦磁界下における磁束運動シミュレーション

名古屋大学　吉田研究室
○足立健人、一野祐亮、吉田隆
（卒業生：伊藤慎太郎、松田圭介）

研究背景

■$BaHfO_3$添加$SmBa_2Cu_3O_y$薄膜

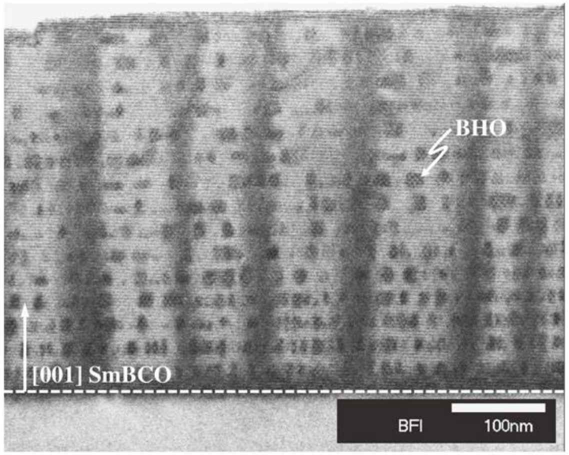

Fig. $BaHfO_3$添加$SmBa_2Cu_3O_y$積層薄膜の断面TEM像 [1]

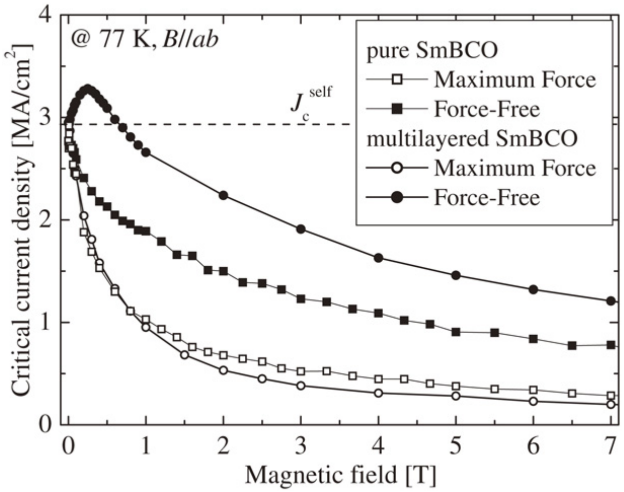

Fig. $SmBa_2Cu_3O_y$薄膜の77 K, B//IにおけるJ_cの磁場依存性 [1]

◎本研究室では、縦磁界下における積層薄膜について、より詳細な実験を行っている[2]

研究目的

縦磁界下における、超伝導体内の磁束線運動を可視化する
⇒3次元TDGL方程式を用いた数値シミュレーション

[1] A. Tsuruta et al.: Jpn. J. Appl. Phys. **53** (2014) 078003　[2] K. Sugihara et al.: Supercond. Sci. Technol. **28** (2015) 104004

Time Dependent Ginzburg-Landau（TDGL）方程式

TDGL方程式 ⇒ 超伝導と磁場の共存する状態の時間発展

$$
\begin{cases}
\dfrac{\partial \Delta(\boldsymbol{r},t)}{\partial t} = -\dfrac{1}{12}\left[\left(\dfrac{\nabla}{i} - \boldsymbol{A}(\boldsymbol{r},t)\right)^2 \Delta(\boldsymbol{r},t) - (1-T)(\alpha + \beta|\Delta(\boldsymbol{r},t)|^2)\Delta(\boldsymbol{r},t)\right] \\
\dfrac{\partial \boldsymbol{A}(\boldsymbol{r},t)}{\partial t} = (1-T)\mathrm{Re}\left[\Delta^*(\bar{\boldsymbol{r}},\bar{t})\left(\dfrac{\nabla}{i} - \boldsymbol{A}(\boldsymbol{r},t)\right)\Delta(\boldsymbol{r},t)\right] - \kappa^2 \nabla \times \nabla \times \boldsymbol{A}(\boldsymbol{r},t)
\end{cases}
$$

［Δ: オーダーパラメータ, $\boldsymbol{A}$: ベクトルポテンシャル］

- 無次元化定数

$$A = H_{c20},\ \Delta = |\Delta_\infty|^2,\ x,y,z = \xi_0,\ t = \frac{4\pi\sigma\xi_0\kappa^2}{c^2},\ H = H_{c20},\ J = J_{d0},\ T = T_c$$

パラメータ ⇒ 任意にピンニングセンターの配置が可能（形状、種類）

$$\alpha = \begin{cases} -1 & :\text{超伝導} \\ \left(\dfrac{\xi_0}{\xi_n}\right)^2 = \alpha_n & :\text{常伝導} \end{cases} \qquad \beta = \begin{cases} 1 : \text{超伝導} \\ 0 : \text{常伝導} \end{cases}$$

[4] R. Kato, Y. Enomoto and S. Maekawa.: Phys. Rev. B **47** (1993) 13 [5] T. Matsushita et al.: Adv. Cryog. Eng. Mater. **36** (1990) 263

超伝導体のモデリング（離散モデル化）

■ TDGL方程式を離散化

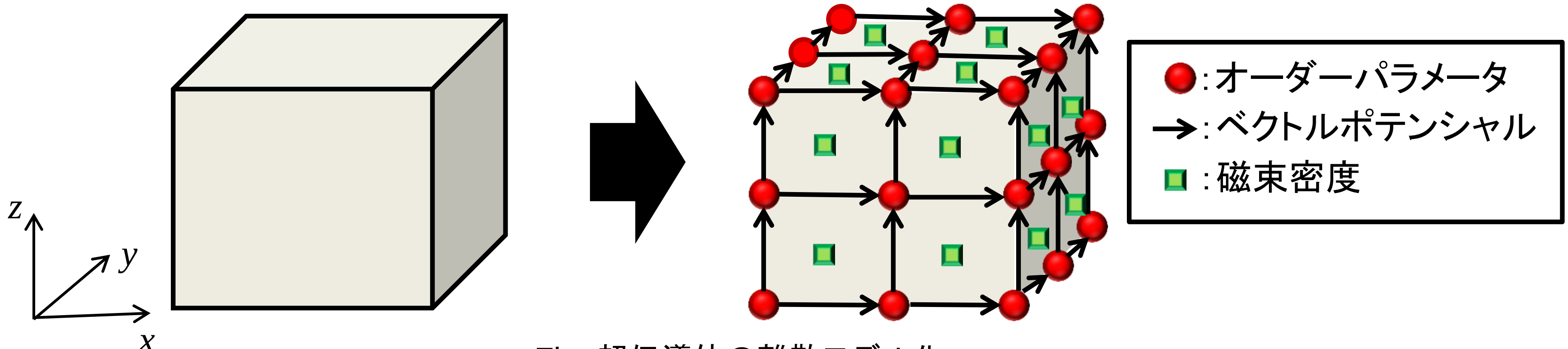

Fig. 超伝導体の離散モデル化

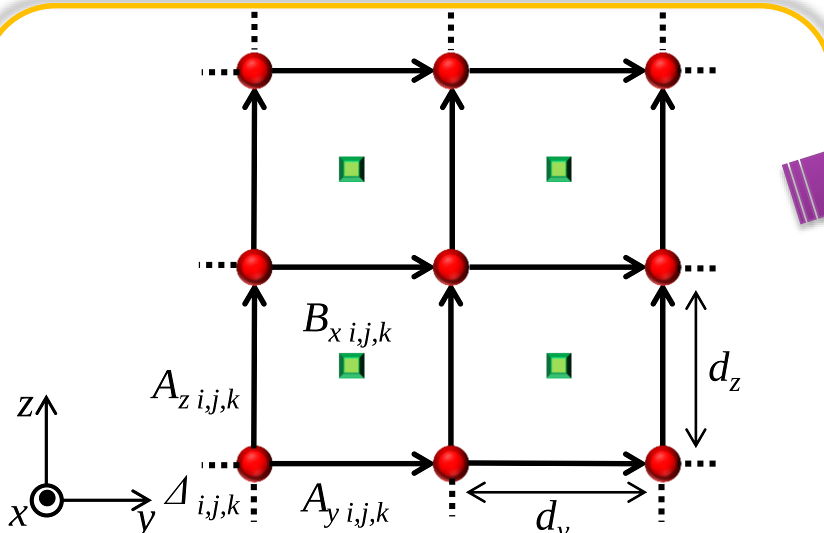

Fig. 離散モデルにおけるΔ, A, B の各定義(y-z面)

オーダーパラメータΔ : 格子点

ベクトルポテンシャルA : 格子間

磁束密度B : 格子の中心

- ✓ 差分法
- ✓ 磁束密度

$$B_{x\ i,j,k} = \mathrm{rot}(A)_x$$

- ✓ リンク変数の導入（ベクトルポテンシャル）

$$U_{x\ i,j,k} = \exp(-id_x A_{x\ i,j,k})$$

NAGOYA UNIVERSITY

数値シミュレーション条件

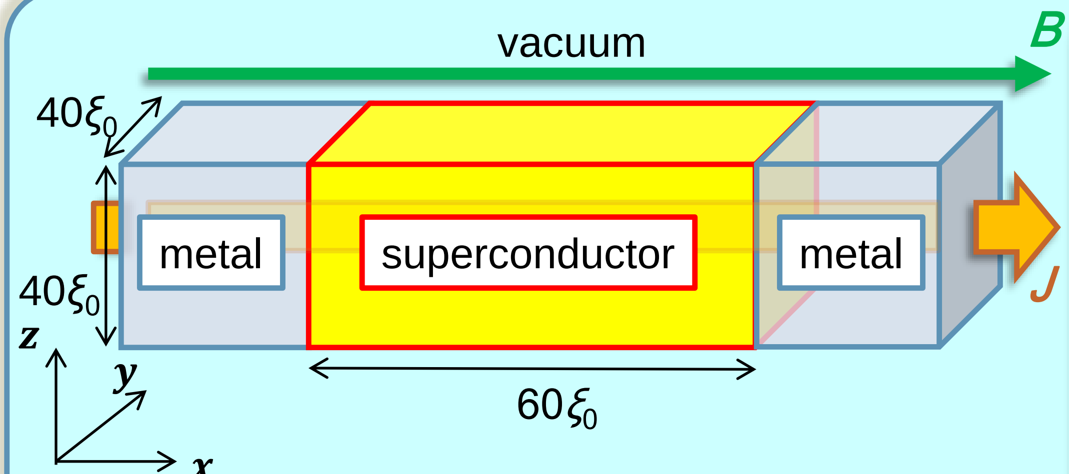

Fig. シミュレーションスケールと外部条件

◆ x方向境界条件

Fig. 電流方向における境界条件

➢ **ノイマン境界条件を適用**

◆ 外部条件

Table 材料条件及び外部条件

サイズ	$60\xi_0 \times 30\xi_0 \times 30\xi_0$
材料	$\kappa = \lambda_0 / \xi_0 = 3$
境界	x方向:金属境界 y,z方向:真空境界
温度	$0.5T_c$
外部磁界	$0.15B_{c2(0)}$

➢ 格子点数

$$(Nx+1)\times(Ny+1)\times(N_z+1) = 121\times 61\times 61$$

➢ 空間差分

$$dx = dy = dz = 0.5\xi_0$$

➢ 使用した言語と開発環境

・言語：C++

・開発環境：Microsoft Visual C++ 2010 express

NAGOYA UNIVERSITY

四隅における磁場の影響

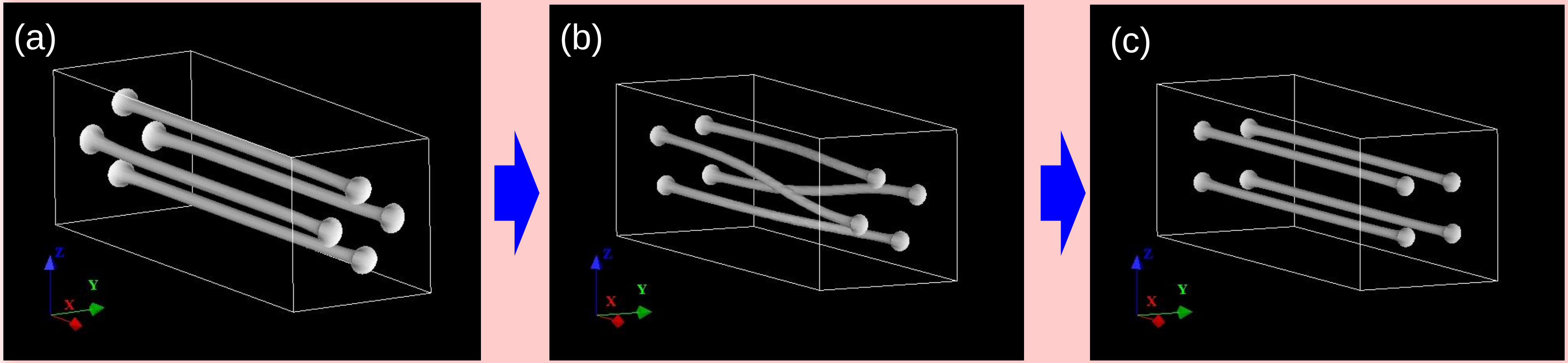

Fig. 磁束運動の様子（(a) J = 0, (b) J = 0.005111J_d, (c) J = 0.006222J_d）

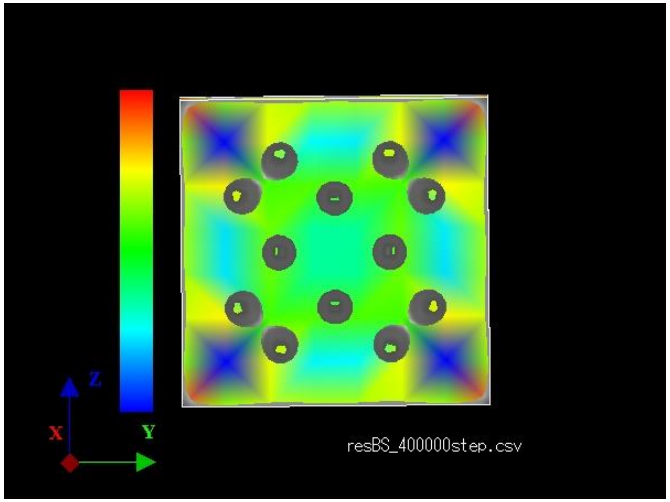

Fig. 磁場分布(B=0.30B_{c2})

磁束が端にトラップ

↓

四隅の磁場が弱いことに起因？

↓

端の影響を受けない形状への変更

シミュレーション形状の変更

➢ 実際の試料サイズでは、端の影響を無視できる

⇔ シミュレーションサイズでは、磁束運動が端の影響を大きく受ける

I. 計算領域を拡大

✓ 端の影響を小さくすることが可能

⇒ 計算コスト上昇、限度有

II. 円筒状に計算領域を変更

✓ 端の影響を排除可能

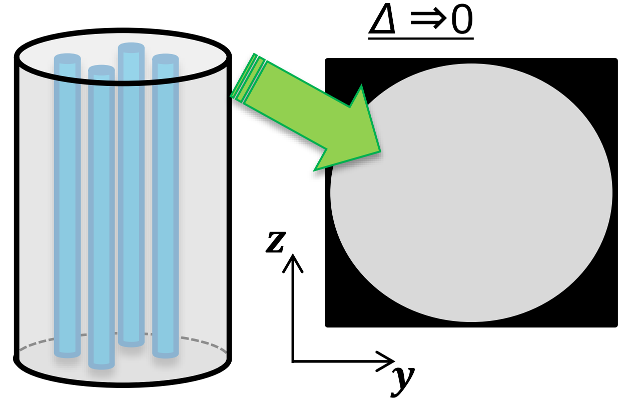

Fig. 円筒形状でのシミュレート

※有明高専の松野先生からご助言を頂きました。

電流印加と結果の表示

◆ 電流印加方法

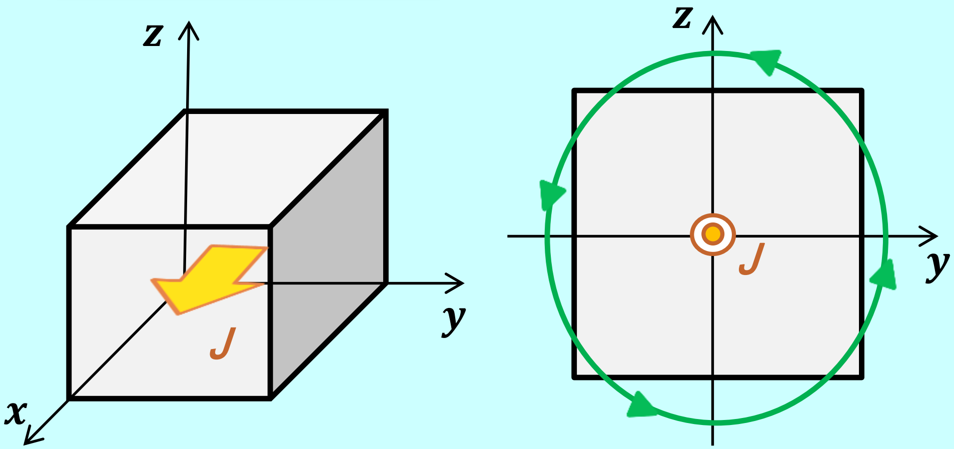

Fig. 電流印加方法(ビオサバールの法則によって自己磁場を算出し、外部磁場に加えることで電流密度J が印加された状況を再現)

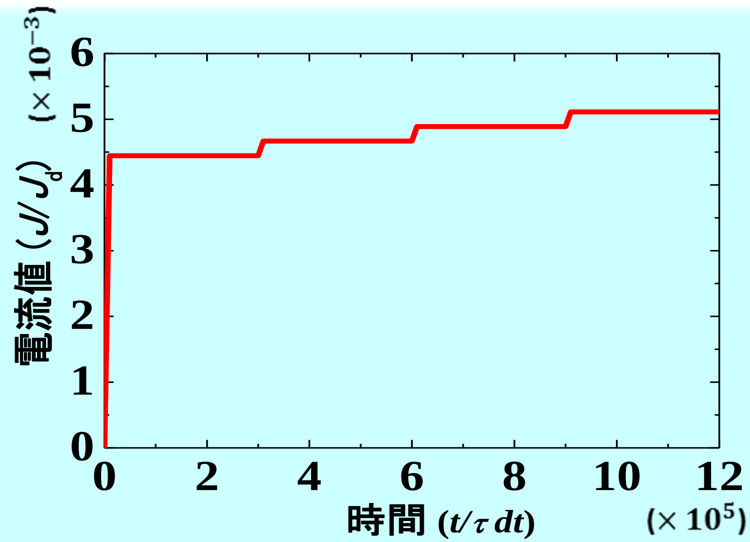

Fig. 印加電流の時間変化

◆ シミュレーション結果の表示方法

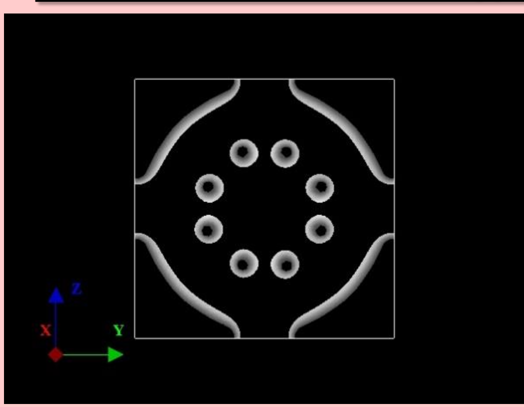

Fig. シミュレーション結果

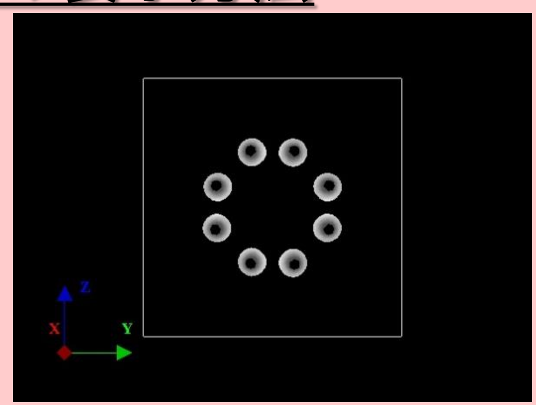

Fig. シミュレーション結果表示

➢ 結果を確認しやすく表示

<u>円筒部から外 : $|\Delta| = 1$</u>

※結果の表示の際のみ

NAGOYA UNIVERSITY

シミュレーション結果（形状変更）

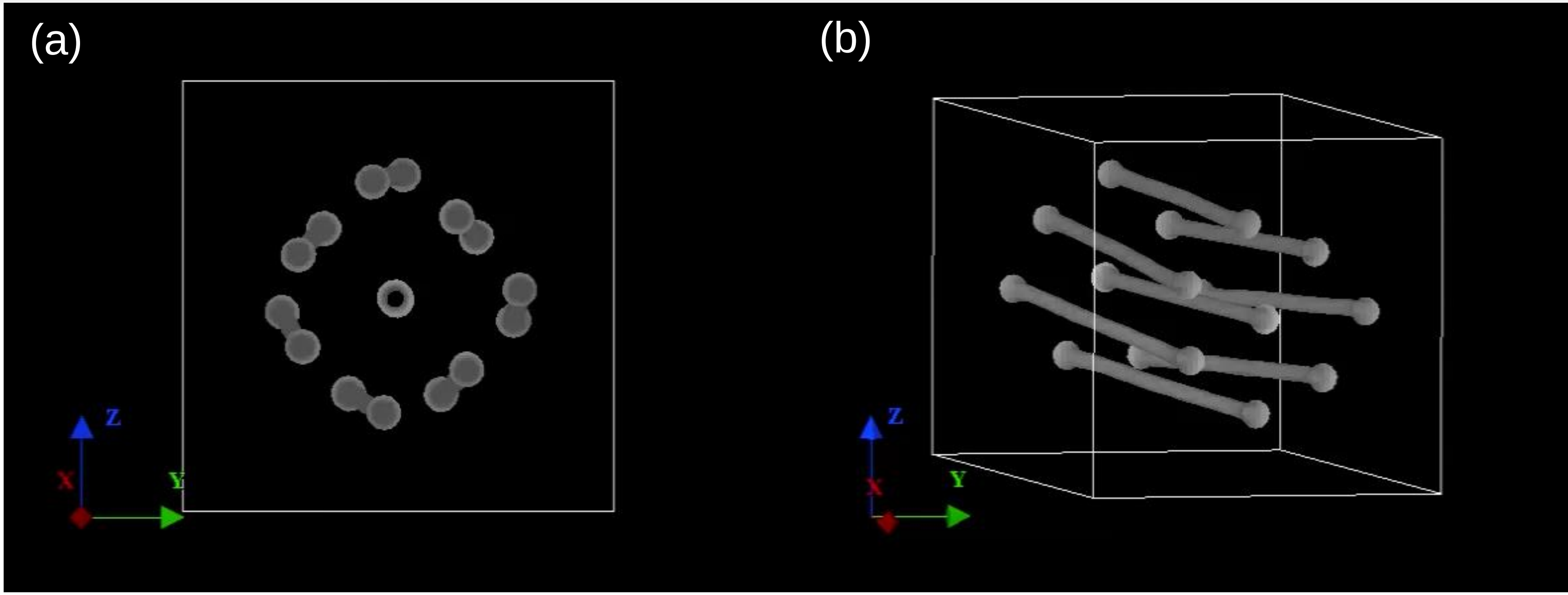

Fig. 縦磁界下における磁束線運動(a)正面(b)別角度

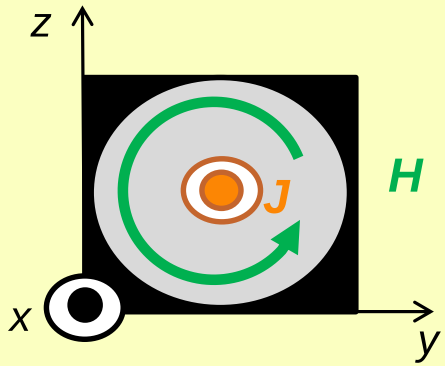

Fig. 自己磁界発生イメージ

四隅の影響をなくしたことで，
<u>磁束がトラップされることなく、自己磁界方向へ傾く</u>

<u>問題点と課題</u>

- ✓ 一定電流を十分な時間流す ⇒ 回転運動停止
- ✓ 今後、より高い電流を印加する必要がある

今後の展望

◆ 領域の拡大

- ✓ 実際の試料サイズに近い系でのシミュレート
- ✓ 計算の高速化

◆ 人工ピンニングセンターの導入

- ✓ 人工ピンニングセンターを想定した場合の磁束運動を可視化
（実験においては、積層薄膜においてJ_cピーク発現）
- ✓ 最適なピン形状の探索

◆ 縦磁界効果に関する考察

- ✓ 表面電界分布等