

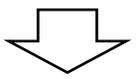
～センター報告～

# 機械学習を利用した 磁気パラメータの推定

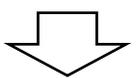
情報記録工学研究室  
田辺 賢士

## スピントロニクスにおける研究開発の流れ

① 磁性薄膜の作製

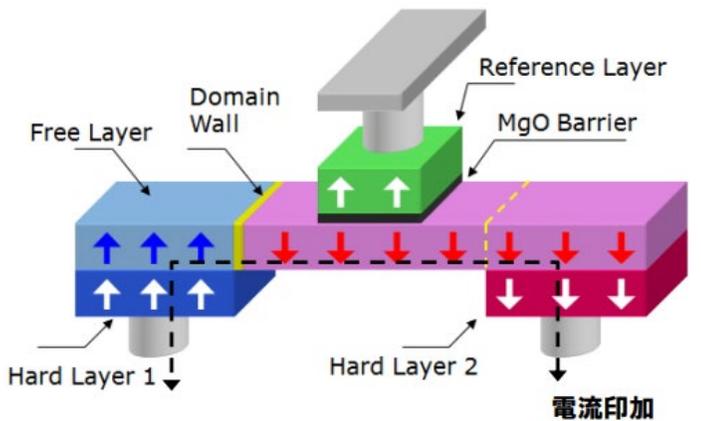


② 磁気特性の評価  
(磁気パラメータの計測)



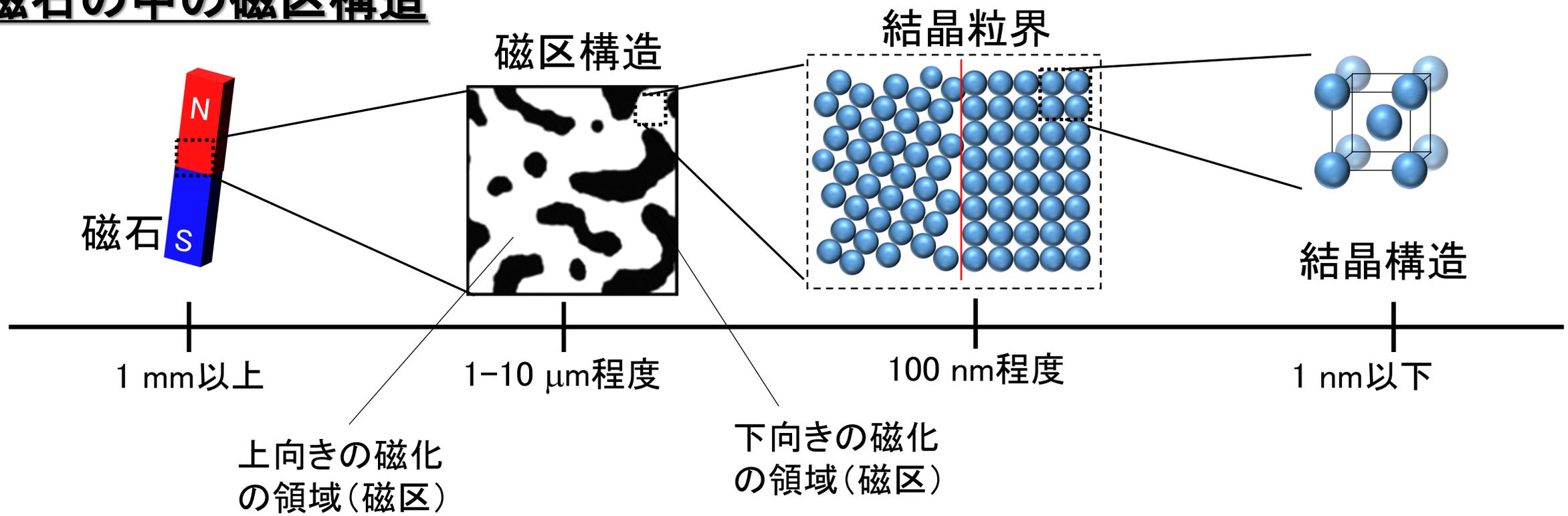
③ デバイス作製

- ✓ 飽和磁化  $M_S$
- ✓ 磁気異方性定数  $K_u$  ( $K_{\text{eff}}$ )
- ✓ 交換スティフネス定数  $A_{\text{ex}}$
- ✓ ジャロシンスキー守谷 (DMI) 定数  $D$
- ✓ 磁気異方性の分散  $\sigma = \Delta K_u / K_u$
- ⋮



計測が難しいパラメータや、  
計測に時間がかかるパラメータも存在する

## 磁石の中の磁区構造



- 磁区構造は結晶粒界とは関係のない
- 磁区と結晶粒界はスケールが違う

**磁石の内部は、無数の磁区に分かれている**

## 磁性薄膜の中のランダム磁区構造

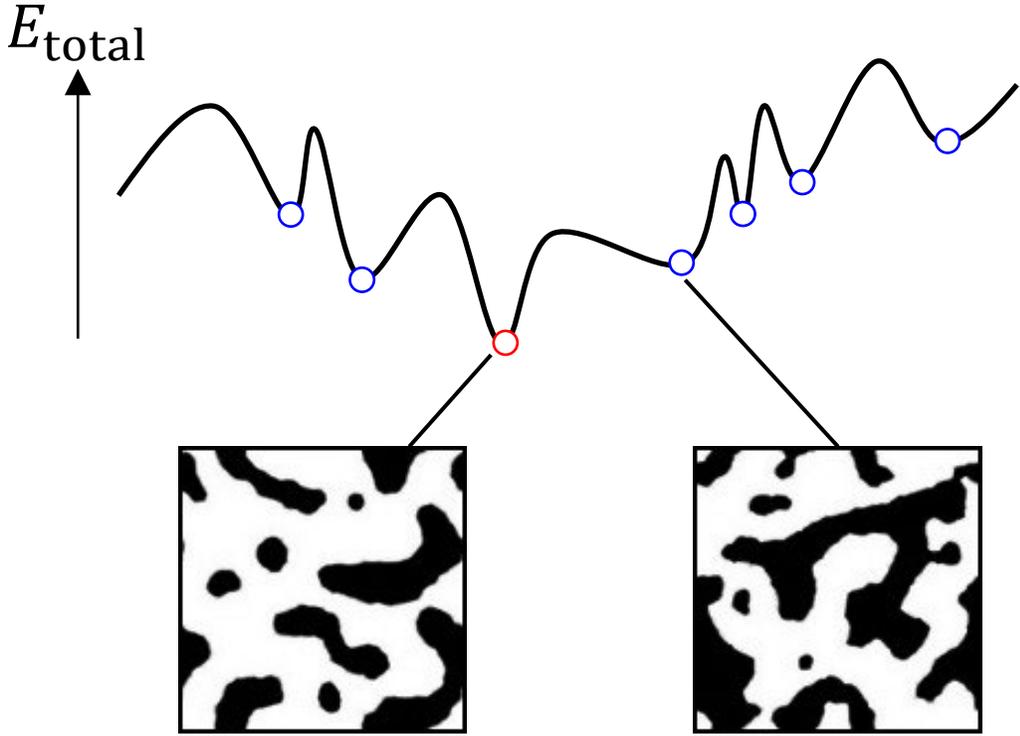
磁区構造は、全磁気エネルギーが極小になるように決定される

$$E_{\text{total}} = E_{\text{static}} + E_{\text{exch}} + E_{\text{aniso}} + E_{\text{DMI}} + \dots$$

$\uparrow$              $\uparrow$              $\uparrow$              $\uparrow$   
 $M_S$          $A_{\text{ex}}$          $K_u$              $D$

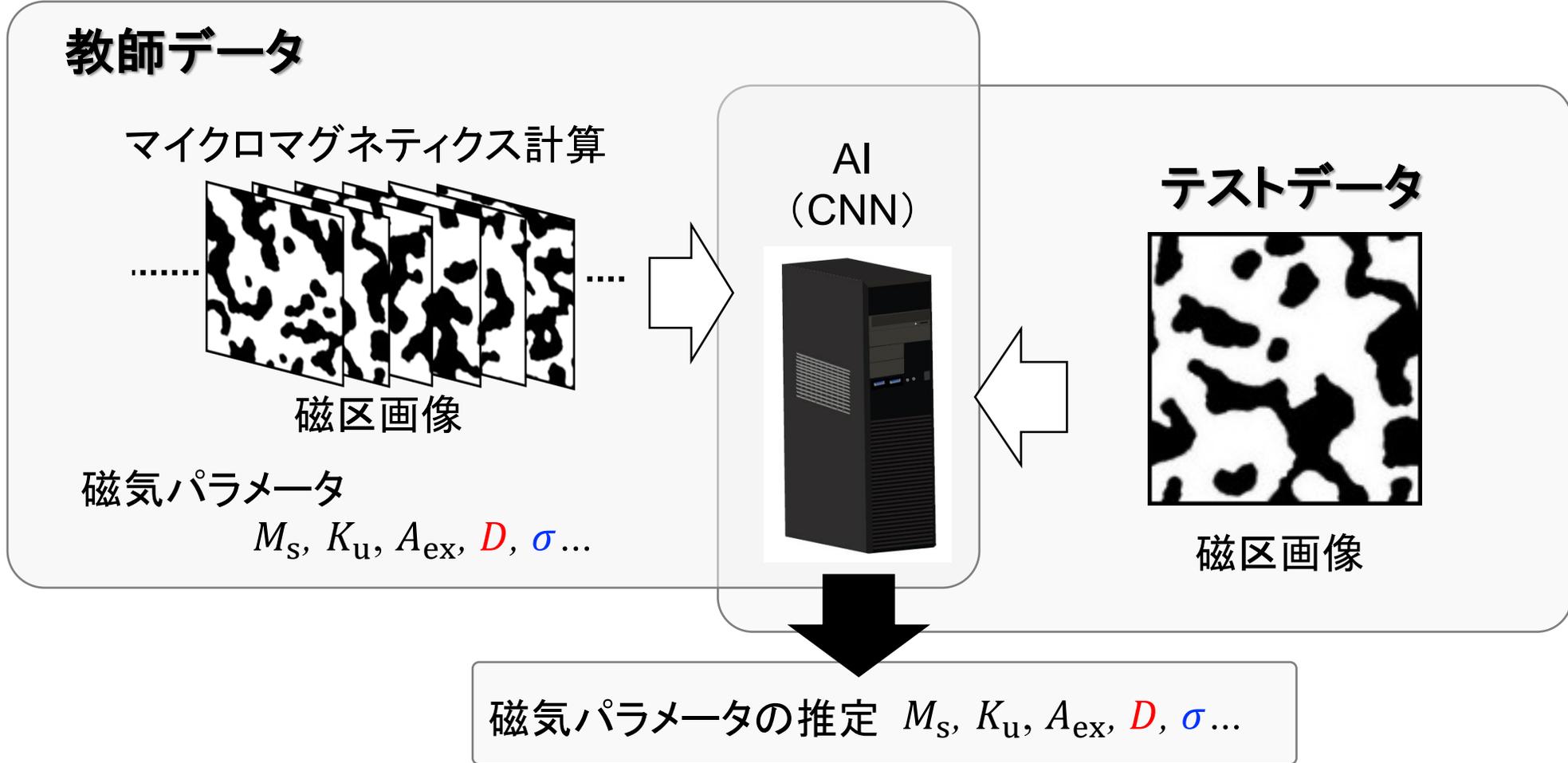
各パラメータの影響がエネルギーとして現れる

磁区構造は、各パラメータの影響を受ける



**ランダム磁区構造の中に、パラメータの情報を含んでいるはず**

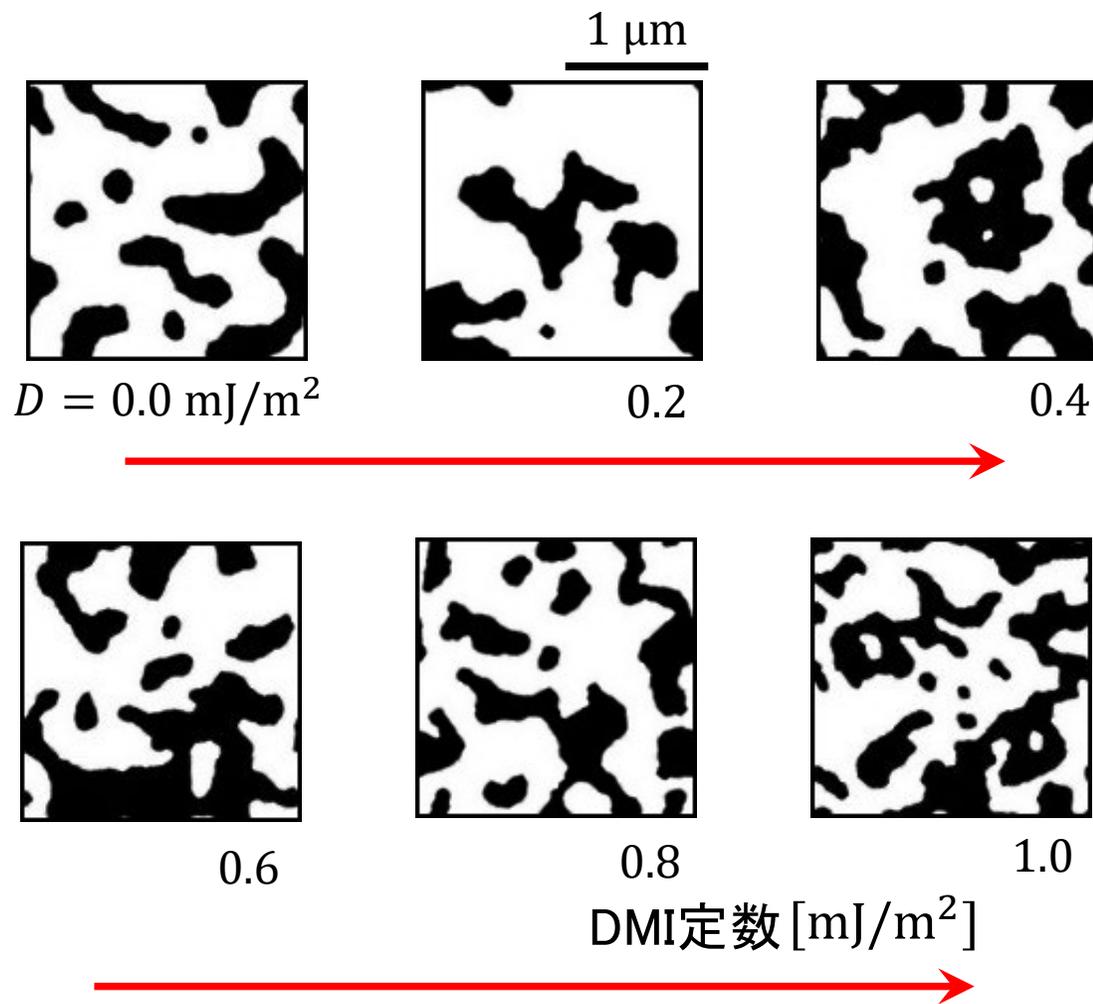
## 概要



**1枚の磁区画像から、すべての磁気パラメータの推定ができるか？**

# 3-1. 実験1 (DMI定数の推定)

## DMI定数の影響

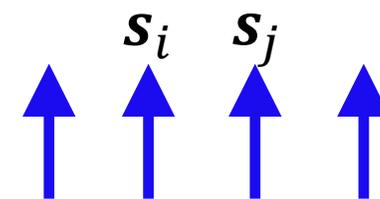


## DMIのハミルトニアン

$$\mathcal{H} = D \cdot \underline{s_i} \times \underline{s_j}$$

隣接するスピンを表す

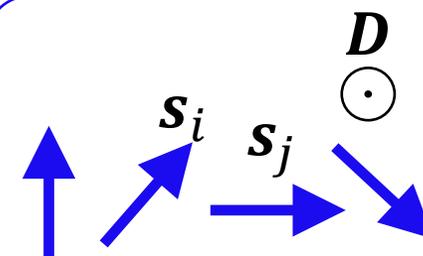
一様な構造



$$\underline{s_i} \times \underline{s_j} = 0$$

$$\mathcal{H} = 0$$

非一様な構造



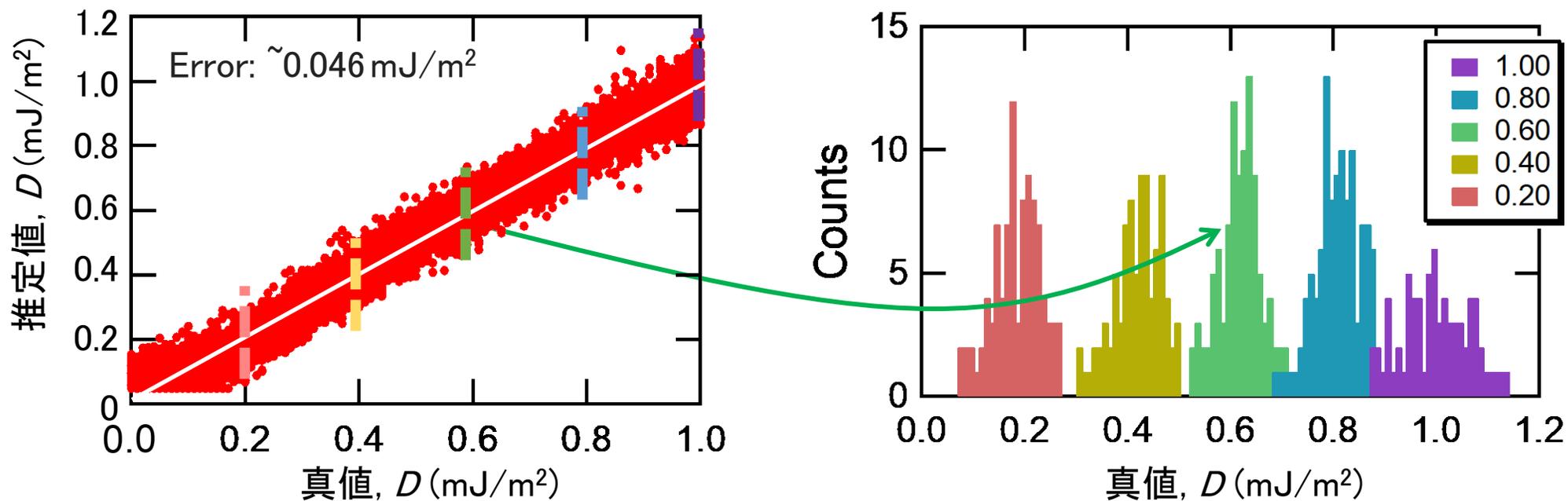
$$D \cdot \underline{s_i} \times \underline{s_j} < 0$$

$$\mathcal{H} < 0$$

非一様な構造の方が安定

**パラメータが磁区構造に影響を与える証拠**

# DMI定数の推定

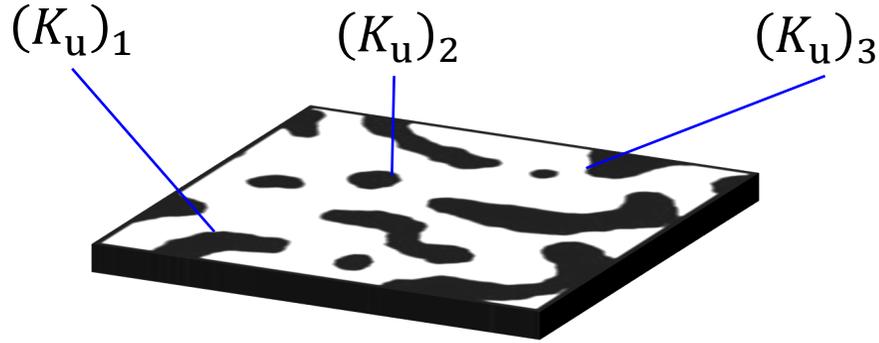


**DMI定数の推定に成功した**

# 3-2. 実験2(磁気異方性分散の影響)

## 磁気異方性定数の分散 $\sigma$

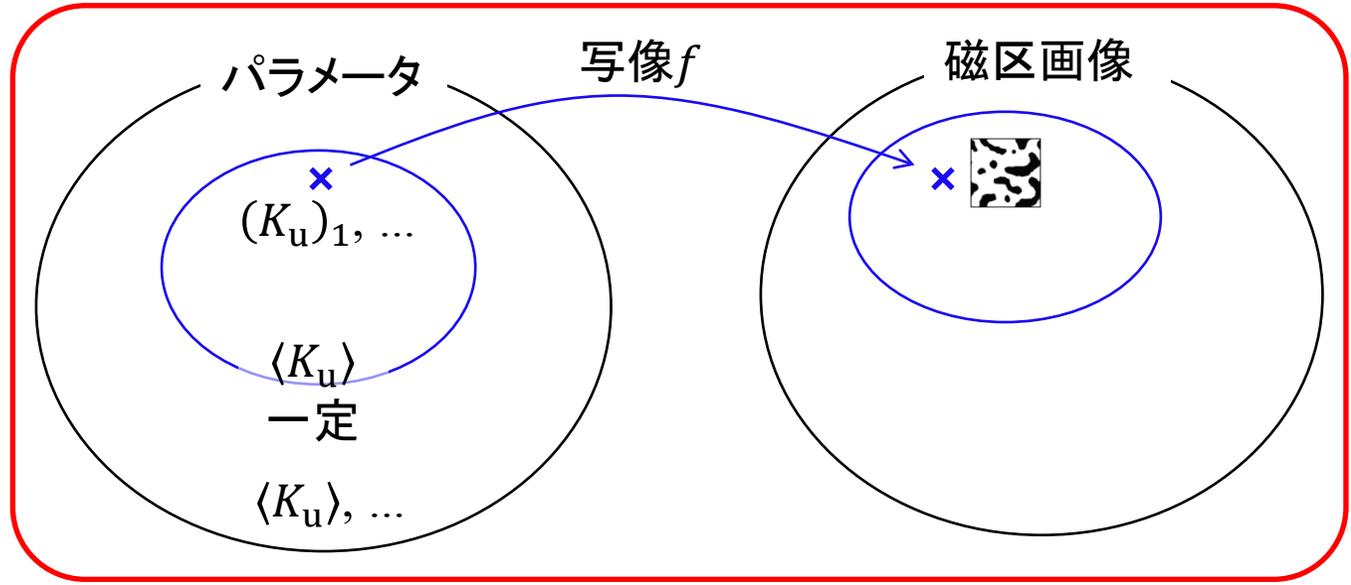
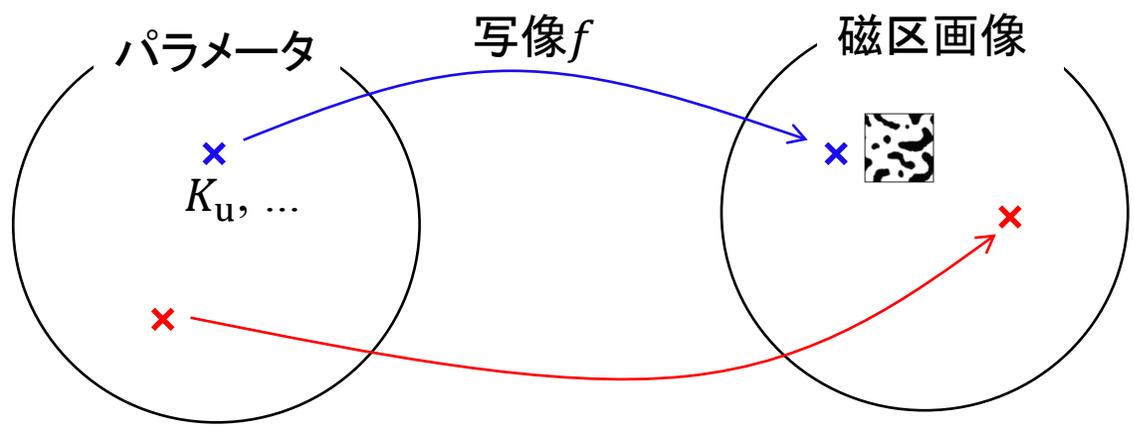
磁気異方性定数の値は場所に依存する  
(ラフネス、不純物、格子欠陥等の影響)



磁気異方性定数の分散

$$\sigma = \frac{\Delta K_u}{\langle K_u \rangle} = \frac{1}{\langle K_u \rangle} \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n ((K_u)_i - \langle K_u \rangle)^2}$$

磁気異方性定数の平均値  
(実験的に計測可能なパラメータ)

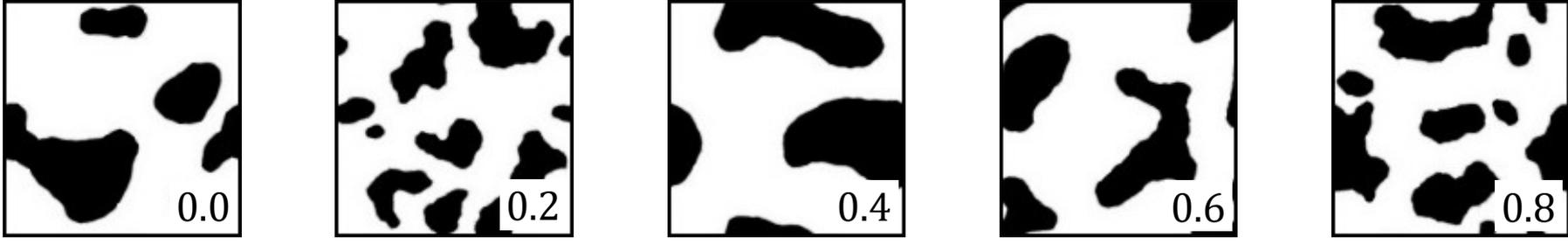


**磁気パラメータには分散がある**

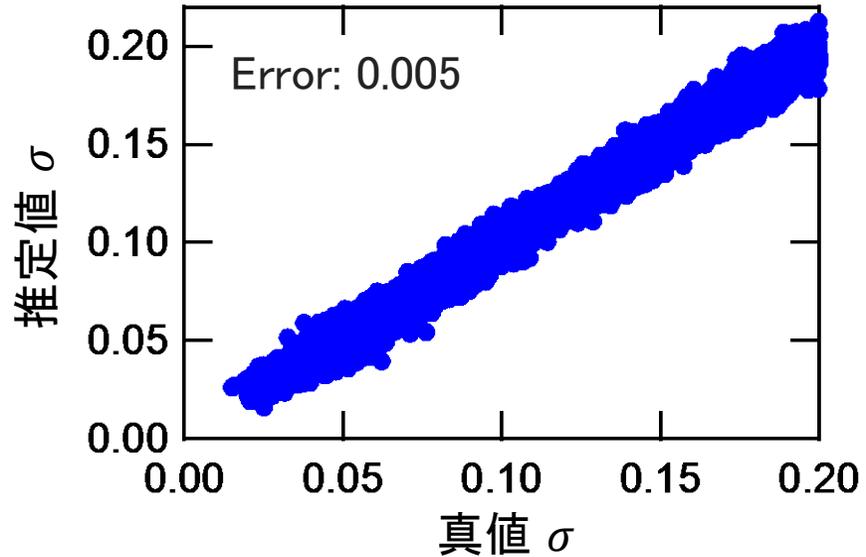
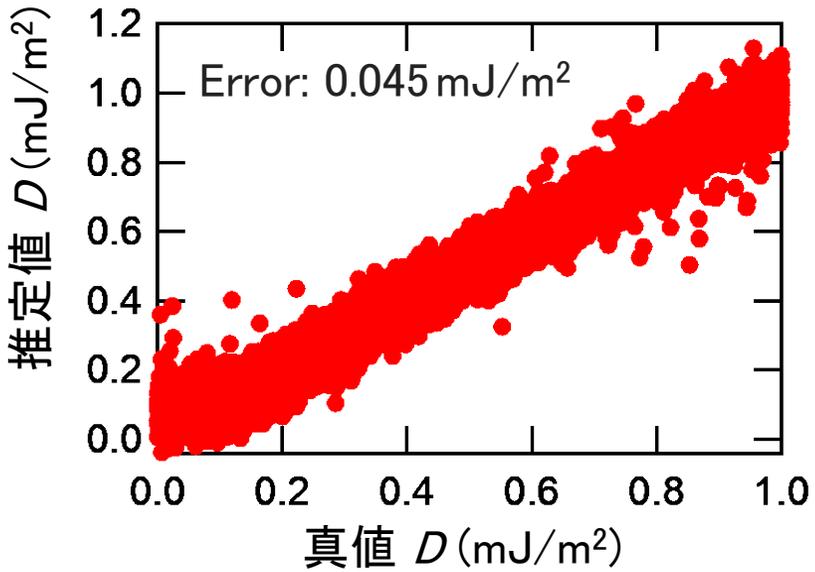
# 3-2. 実験2 (磁気異方性分散の影響)

## DMI定数および異方性分散の推定

$\sigma$ はランダムに変化



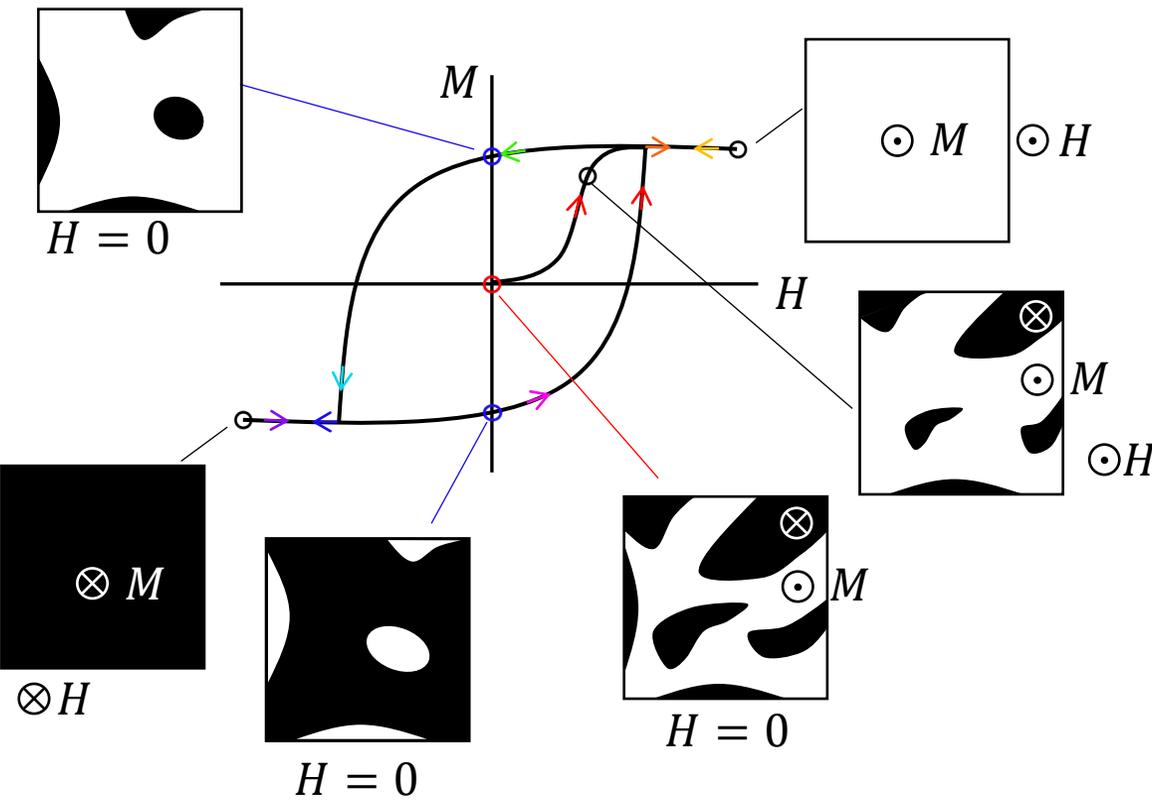
→ DMI定数 [mJ/m<sup>2</sup>]



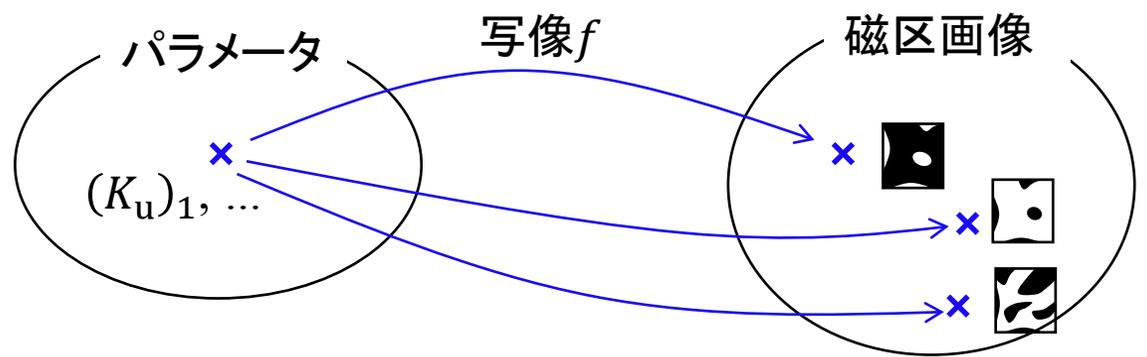
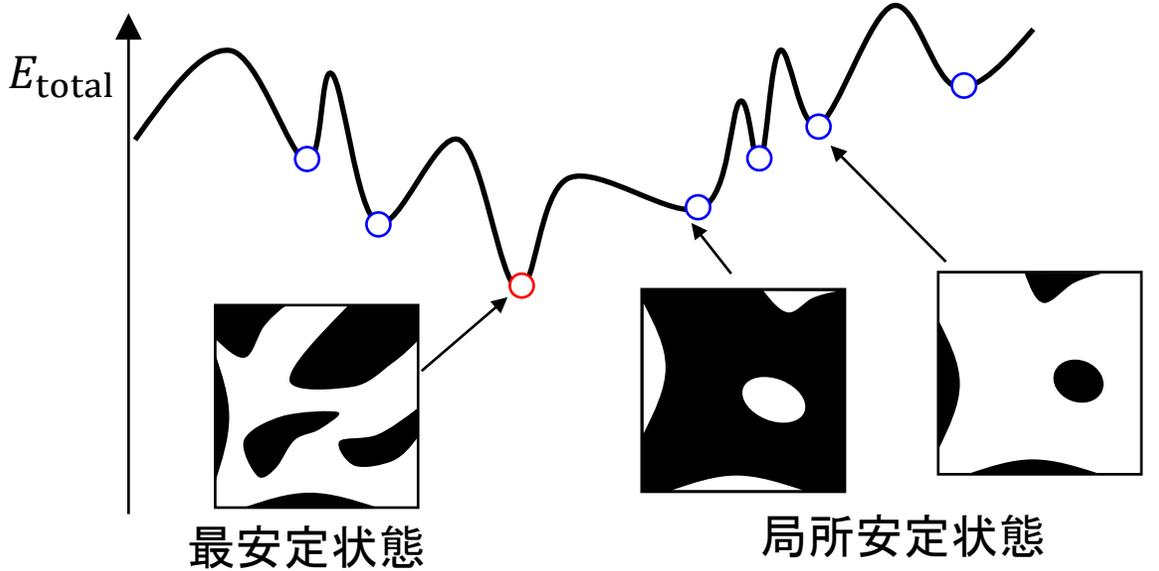
**DMI定数と異方性分散の推定に成功**

# 3-3. 実験3(局所安定状態からの推定)

## ヒステリシスと局所安定状態



ヒステリシス(磁気履歴)が存在する

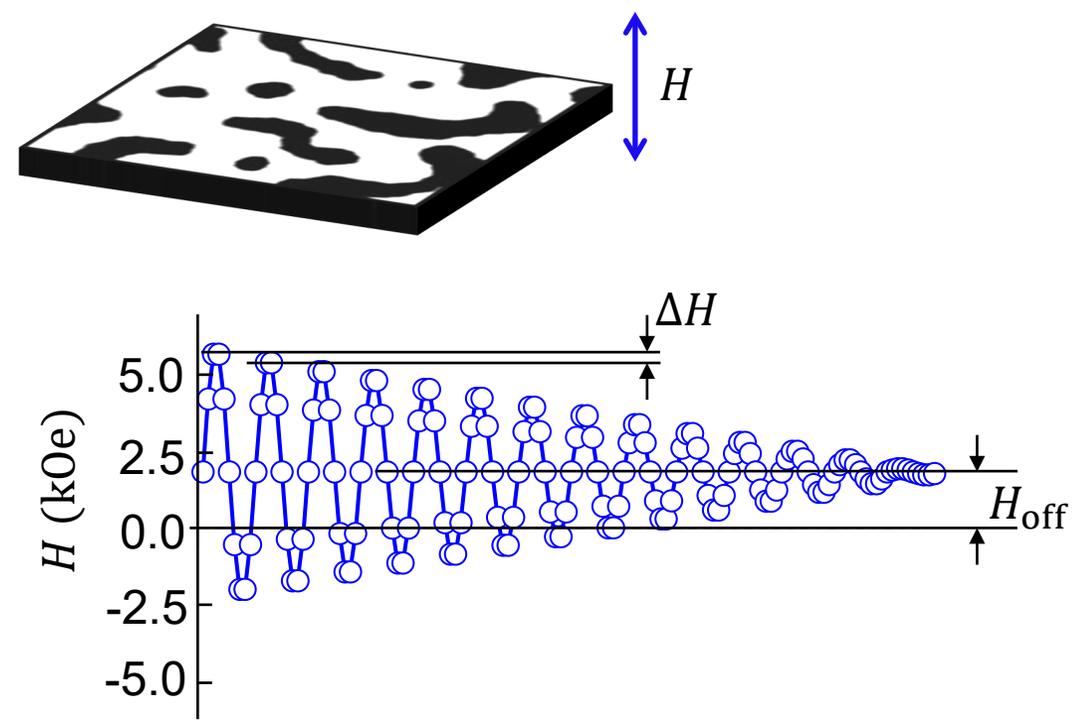


**無数の局所安定状態が存在する**

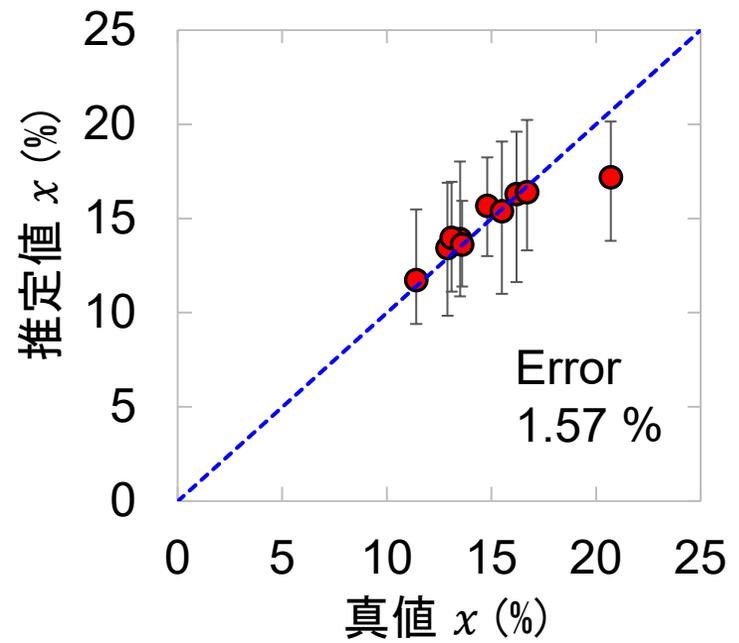
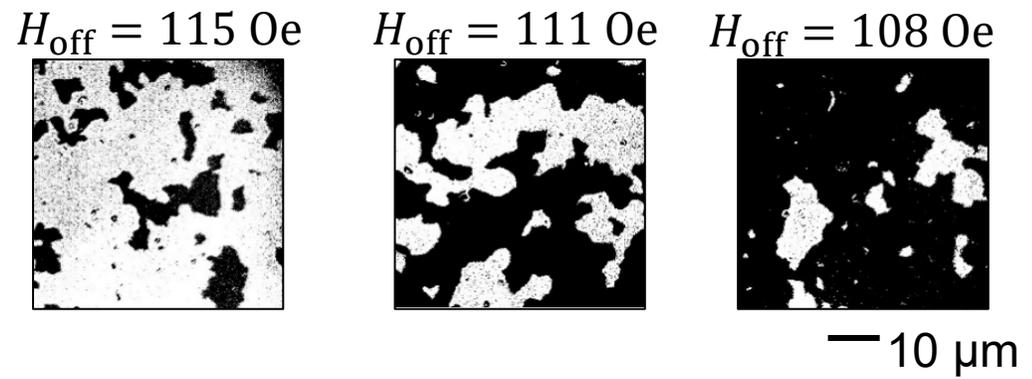
## 局所安定状態からの推定

交流消磁法: 交流磁場を印加して磁区を作製する

$$H = H_{\text{off}} + (H_{\text{max}} - \Delta H \sin(2\pi ft))$$



TbCo合金  
Tb15.5%



**局所安定状態からの推定に成功**

1. 機械学習を用いて、**磁区画像からDMI定数の推定**に成功した
2. 機械学習を用いて、**異方性分散**がある中での推定に成功した
3. 機械学習を用いて、**局所安定状態**からの推定に成功した

<sup>1,2</sup> M. Kawaguchi et al., npj Computational Materials 7, 20 (2021).