

第14回 ナノスケール磁性体の機能調査専門委員会  
資料提供 5-1

## シリコン埋め込みY字型 微細パターン配列の磁気構造

佐藤勝昭<sup>1</sup>・森下義隆<sup>1</sup>・石橋隆幸<sup>1</sup>・町田賢司<sup>1,2</sup>・  
山本尚弘<sup>1</sup>・手塚 智之<sup>1</sup>・山岡武博<sup>3</sup>  
<sup>1</sup>農工大、<sup>2</sup>NHK放送技研、<sup>3</sup>SIIナノテクノロジー

## はじめに

- サブミクロンサイズの磁性体微細パターン配列における磁気構造を研究することは、高密度磁気ストレージや高密度スピントロニクスデバイスの設計上重要な意味をもつ。
- 我々は、ダマシン法を用いてシリコン基板に埋め込んだ磁性体微細構造における磁気モーメントの分布について、MFM観察およびLLG方程式を用いたマイクロ磁気シミュレーションにより研究してきた。

漏洩磁界  
パターンディスクメディア MRAM

## 電子ビームリソグラフィのプロセス

- Si基板に対する磁性体微細パターン埋め込み構造の作製は、電子線描画装置とドライエッチ、蒸着、CMPを組み合わせを行った。

JBX-5000SH (JEOL)  
Electron beam lithography  
Dry etching with CF<sub>4</sub>  
EB deposition of magnetic materials

## ダマシン法

MFM測定には試料表面の平坦性が好都合  
→ダマシン法(Damascene technique)を応用

レジスト塗布 (Resist ZEP-520A (950 Å) Spin-coat: 5000rpm, 30sec) → 電子ビーム描画 (ELS-7300ULH(ELIONIX) JBX-5000SH (JEOL)) → 露光 (ZED-N50.2 min) → ドライエッチ (CF<sub>4</sub> gas) → レジスト除去 (パーマロイ (Ni<sub>3</sub>P/Fe<sub>3</sub>)) → 蒸着 (パターニング) → 研磨・平坦化 (CMP (Chemical Mechanical Polishing)) → 焼結処理 (形状測定・磁気的評価 (SEM, AFM, MFM))

## MFM観察

- SIIナノテクノロジー製「SPI-4000/SPA300HV」  
- 高モーメント探針: Co-Pt-Cr (50 nm) 被覆  
- 低モーメント探針: Co-Pt-Cr (24 nm) 被覆

大気中測定  
空気による粘性抵抗によって、カンチレバーの共振点(Q値)が低下し、感度が低下  
↓  
低モーメント探針では真空中測定

SPI-4000/SPA-300HV (SIIナノテクノロジー製)

## マイクロ磁気シミュレーション

- 磁性体の磁気構造や非線形ダイナミクス計算にはLLG解析が広く利用されており、Public codeをオンラインで取得できる。OOMMFは、NISTのDonahueとPorterによって開発され、広く支持を得ている。
- OOMMFは3次元スピンを扱えるものの2次元モデル用に開発されており、複雑な形状入力にはマスキングを施すという煩雑な作業が必要である。本研究では、汎用の3次元CADで作成した任意の形状データを入力し、3次元スピンの3次元モデル用磁気解析ソフトウェアSolid-LLGを開発した。これにより、増幅型モデルなど、3次元的に複雑な形状の解析も可能となった。

## Landau-Lifshitz-Gilbert 方程式

$$\frac{\partial \mathbf{M}}{\partial t} = -\gamma \mathbf{M} \times \mathbf{H}_{\text{eff}} + \frac{\alpha}{M_s} \mathbf{M} \times \frac{\partial \mathbf{M}}{\partial t} \quad (1)$$

$\gamma = \frac{g\mu_B}{\hbar}$ : 磁気角運動量比     $\alpha$ : Gilbert damping

Damping項の導入  
磁気モーメントの  
才差運動 → 緩和

## 3次元LLGシミュレータの開発

Solid-LLGの主な機能

- 3次元CADで作成した立体構造データの読み込み  
- 対応CAD: FEMAP (EliMagisインターフェース)
- OpenGLによるリアルタイム3次元立体表示
- 4次Runge-Kuttaを採用
- MFM探針との相互作用を考慮したForce gradient像の計算・表示  
→ MFM再生像
- 計算過程の連続ビットマップ出力  
→ 2次元アニメーション化

Solid-LLG build by VC++ .NET 2003 for Windows (Copyright© 2003-2005 NHK-TUAT)

## Solid-LLGアプリケーションの構成

CWinApp メインフレーム  
CSolidLLGDoc (LLGデータ管理, 複数材料の管理)  
CSolidLLGView (OpenGL表示, メニュー処理など)  
CLlgData (磁性材料 j = 0, 1, ..., N の管理)  
CElement (計算セルの3次元座標, 計算セルのΔM, M<sub>eff</sub>, 境界条件)  
CProp (磁気特性 (M<sub>s</sub>, A, K<sub>1</sub>, ...))  
CDlgCalc (マルチスレッド, LLG計算)  
CCalcInfo (マルチスレッド, 計算情報の管理)  
CAJElm (隣接要素情報: E<sub>ij</sub> = A<sub>ij</sub> = E<sub>i+1,j</sub>, E<sub>ij</sub> = A<sub>ij} = E<sub>i,j+1</sub>, ...)</sub>

### Force gradient 分布計算

試料からの漏洩磁界により MFM探針が受ける力:  $F_z$

作用・反作用

MFM探針からの漏洩磁界により 試料が受ける力:  $F_z'$

$$\text{Force on the tip: } F(x, y, z_w) = -F'(x, y, z) = -\iint M_{\text{mag}}(x', y', z') \frac{\partial H_z(x-x', y-y', z-z')}{\partial z} dx'dy'dz'$$

$$\text{MFM signal: } \frac{2kAf}{f} = -\frac{\partial F(x, y, z_w)}{\partial z_w} \quad (\propto \text{Force gradient})$$

$$= \iint M_{\text{mag}} \frac{\partial^2 H_z}{\partial z^2} dx'dy'dz' + \iint \frac{\partial M_{\text{mag}}}{\partial z_w} \frac{\partial H_z}{\partial z} dx'dy'dz'$$

※今回、探針の磁界による試料への影響は無視して、第2項を省略

### MFM探針からの磁界計算

MFM探針からの漏洩磁界:  $H_{\text{tip}}$

積分方程式法を用いた市販ソフト (Elf Magic) により計算

MFM探針モデル (1/4対称)

$h = 30 \text{ nm}$  における磁界分布

### これまでの研究のまとめ

- 正方形ドット、長方形ドット、十字型ドットの配列を作成し、MFM観察した。
- LLGシミュレーションの結果、ドット内のスピンド分布や、ドット間に働く静磁的相互作用を明らかにすることができた。

### 正方形ドットのMFM像 (高/低モーメント探針)

風車状

90° 磁壁

High-moment tip (CoPtCr/500 Å in Air)

Low-moment tip (CoPtCr/240 Å in HV)

MFM image

### 正方形ドットの計算パラメータ

Saturation magnetization ( $M_s$ )	800 emu/cm <sup>3</sup>
Exchange stiffness constant (A)	$1.3 \times 10^{-6}$ erg/cm <sup>3</sup>
Anisotropic constant ( $K_u$ )	1000 erg/cm <sup>3</sup> (x-direction)
Gyromagnetic constant ( $\gamma$ )	$-1.76 \times 10^7$ rad/(s · Oe)
Damping constant ( $\alpha$ )	0.1
Cell size	12.5 nm cubic

### 正方形単一ドットのシミュレーション

200 x 200 x 150 nm

200 x 200 x 1100 nm

Spin distribution with  $\text{div } \mathbf{M}$  image

Force gradient image

風車状

### 正方形4ドットの同時計算

200 x 200 x 1100 nm spacing: 50 nm

Spin distribution

- 4ドットのVortexが対称的に反転
- Vortex回転中心に僅かなずれ
- 90° 磁壁に湾曲

隣接ドットに近いほど大きな曲がり

Force gradient image

隣接ドット間の静磁的相互作用

### 正方形ドットのシミュレーションとMFM像

Force gradient image

Vortexの回転方向 (cw, ccw)

Low-moment tip (CoPtCr/240 Å in HV)

MFM image

- 隣接ドット間のコントラスト反転現象
- 90° 磁壁の湾曲

MFM測定結果に一致

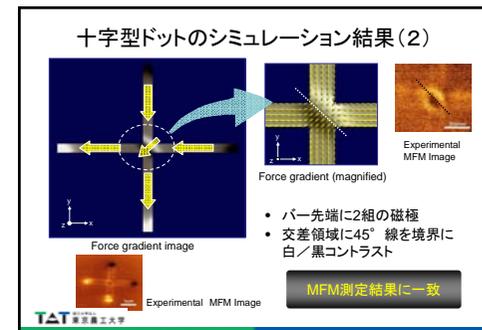
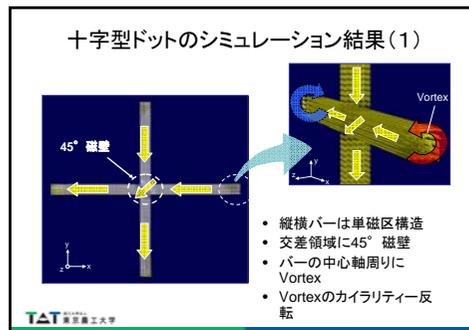
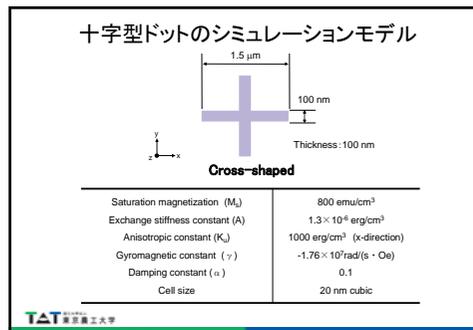
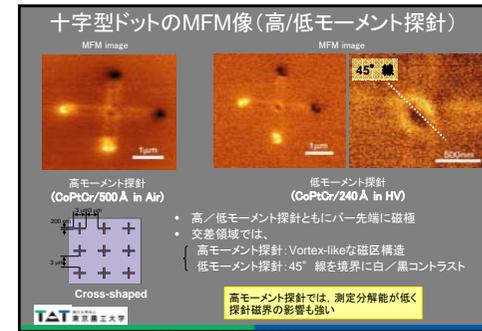
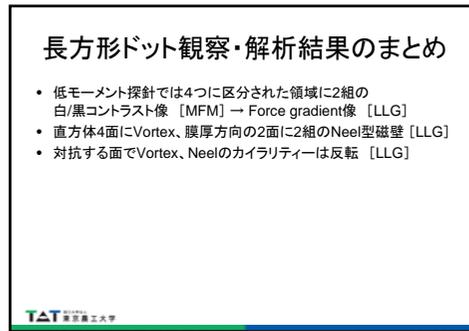
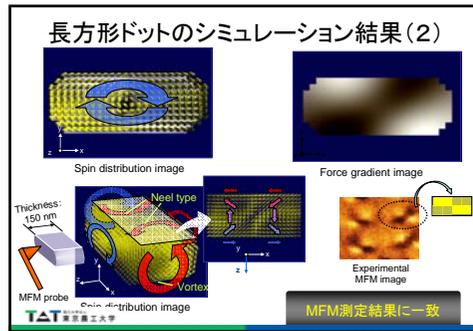
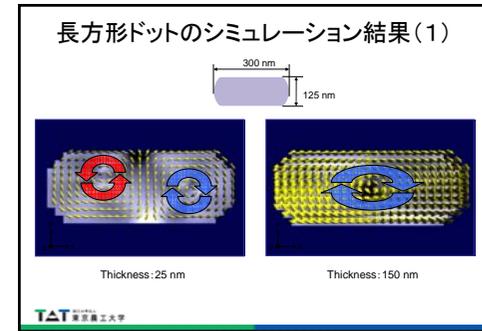
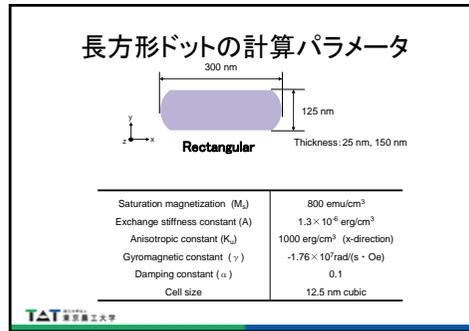
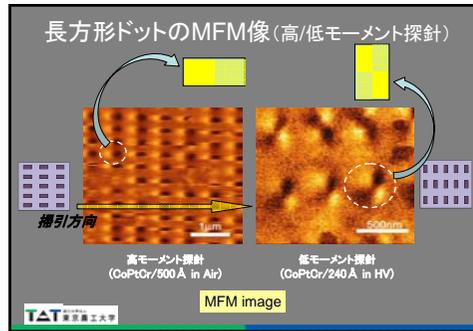
磁性体の大きさや形状、系の交換エネルギー、静磁エネルギーなどの組合によって決まる

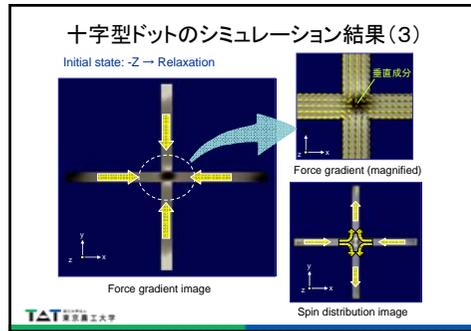
カイラリティー

観測的に制御して、新メモリーへの応用

### 正方形ドット観察・解析結果のまとめ

- ドット内には還流磁区 (Vortex) 構造 [MFM, LLG]
- 低モーメント探針では風車状 [MFM]
  - Force gradient像も風車状分布 [LLG]
- 隣接ドット間でのカイラリティー反転現象 [MFM, LLG]
- 90° 磁壁の湾曲は隣接ドット間の静磁的相互作用 [LLG]
- ドット間を広げるとカイラリティー正転 [LLG]





- ### 十字型ドット観察・解析結果のまとめ
- バー先端に2組の磁極 [MFM, LLG]
  - 隣接したバー先端に静磁的相互作用 [MFM]
  - 交差領域に45°線を境界に白/黒コントラスト [MFM, LLG]
  - 交差領域に45°磁壁 [LLG]
  - バーの中心軸周りにVortex [LLG]
  - Vortexのカイラリティー反転 [LLG]
- TAT 東京工業大学

### 今回の研究: Y字型パターン

- Y字型パターンの場合磁気状態はどうなるであろうか。
- 3つの腕のうち2つにプラスマイナスの磁極が生じたとき、残りの腕はどうなるであろうか。
- 接近させて蜂の巣構造にしたときに、アイスルールに従うか。

Y字型パターン

直線配列 (十分に隔離)

蜂の巣配列 (接近して配置)

TAT 東京工業大学

### アイスルールとは?

◆スピニアイス

◆パイロクロア型格子におけるアイスルール

Pyrochlore lattice:  
(a) Fully occupied Dy atoms in Dy<sub>2</sub>Ti<sub>2</sub>O<sub>7</sub>  
(b) Vacancies in Dy sites  
Z. Han et al., J. Phys. Soc. Jpn., 72, 411 (2003).

◆強磁性単純ネットワークに現れるアイスルール

◆スピニアイス格子強磁性ドット配列人工構造

M. Tanaka, E. Saitoh, H. Miyajima, T. Yamada, and Y. Iye, J. Appl. Phys., 97, 10J710 (2005)

R. F. Wang, et al., NATURE, vol. 439 (2006) 303.

頂点での磁化の流れ, "two-in one-out", "one-in two-out"に限定  
磁化の流れが"0"にならない(交換エネルギーの増大を軽減)

"two-in two-out"が安定  
ドット間に静磁的相互作用

TAT 東京工業大学

### 使用した高性能電子ビーム描画装置

エリオニクス製、TFE7300ULH

- 電界放出型電子銃
- 加速電圧: 30 kV
- 最小描画線幅: 20 nm
- レーザー測長付
- つなぎ精度: 60 nm

TAT 東京工業大学

### 作製したY字パターン配列のSEM像

SiO<sub>2</sub>

Si

Ni<sub>4</sub>Fe<sub>20</sub>

直線配列 (隔離)

蜂の巣配列 (接近)

断面図

TAT 東京工業大学

### 十分離れたY字ドットの直線配列

直線配列 (well-spaced)

高マゼントプローブ使用

低マゼントプローブ使用

- 初期状態ではランダムに分布
- 2つの腕には正負の磁極、残りの腕には多磁区構造が見られる。

TAT 東京工業大学

### AFM像とMFM像の重ね合わせ

- AFM像とMFM像を重ねることによって、磁気力の及ぶ範囲を明確に見ることが出来る。

3D像

TAT 東京工業大学

### Y字型ドットの外部磁界制御

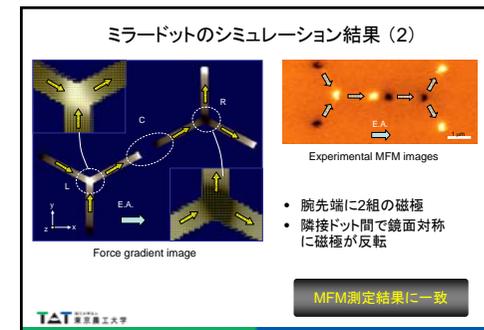
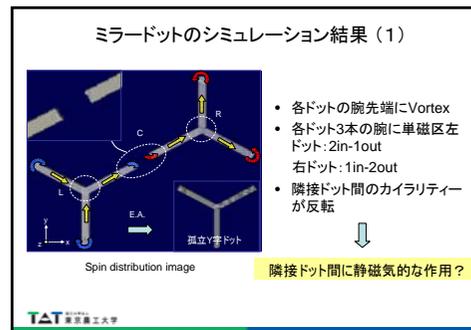
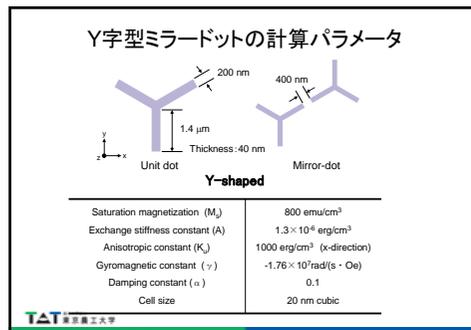
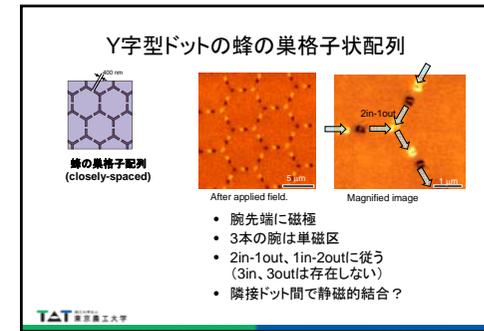
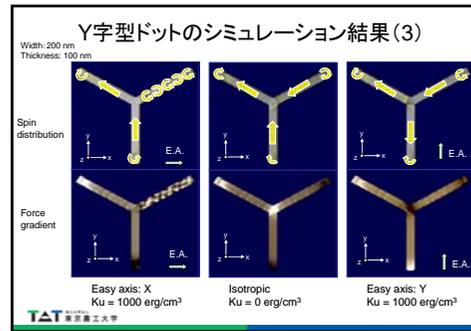
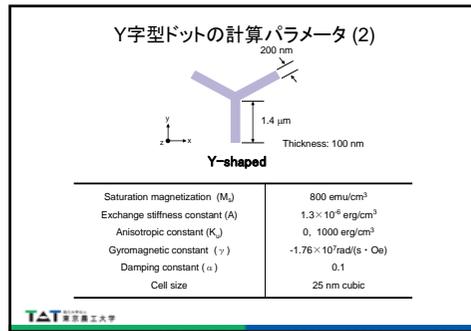
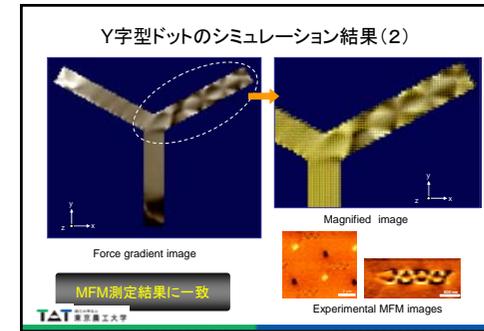
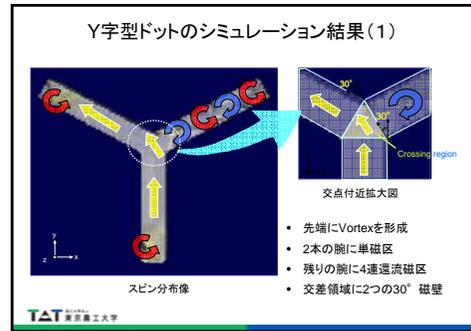
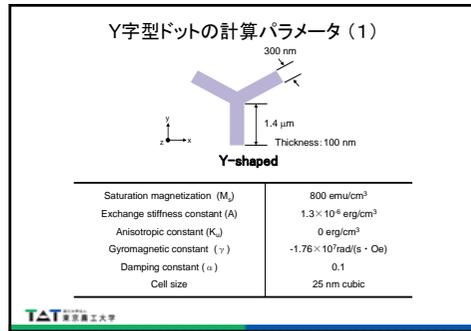
After demagnetized

Random

高マゼントプローブ使用

6状態の記憶

TAT 東京工業大学



## Y字型ドットの観察・解析結果のまとめ

- 直線状配列
  - 2本の腕先端部に磁極、腕内部は単磁区 [MFM, LLG]
  - 残りの腕に4つのVortexが並んだ多磁区 [MFM, LLG]
  - 交差領域では、スピンの2段階に30°屈折(30°磁壁) [MFM, LLG]
- 蜂の巣状配列
  - 腕先端のみに磁極、腕内部は単磁区 [MFM]
  - 2in-1out, 1in-2out規則 [MFM]
- ミラードット
  - 腕はすべて単磁区、先端には磁極 [MFM, LLG]
  - ドット間の磁極の極性が鏡面対称 [MFM, LLG]
  - 2in-1out, 1in-2out規則 [MFM, LLG]
- 形状異方性の大きなサンプルは静磁的相互作用は小さい



## まとめ

- 電子線リソグラフィと化学機械研磨 (CMP) を用いたダマシン法により磁性体ナノ構造の作製を行った
- 正方形、長方形、十字型、Y字型ドット配列の磁化状態を磁気力顕微鏡 (MFM) により観察した。
- 複雑な3次元形状の磁化状態を解析できるLLGシミュレータ「Solid-LLG」を開発し、これを用いてさまざまな微小磁性体のスピン構造を解明した。
- 微小磁性体の規則配列において、ドット間の静磁的相互作用を見いだした。
- MFM探針モデルと微小磁性体との相互作用を考慮したForce gradient分布のシミュレーション手法を開発し、MFM像とよい一致を示すことを明らかにした。



## 謝辞

- 低モーメントプローブによるMFM測定  
SIIナノテクノロジー(株) 山岡 武博 氏
- NHK放送技術研究所

本研究は、東京農工大学21世紀COEプログラム  
「ナノ未来材料」の一環として行ったものである。

