

テラビット記録のためのパターン媒体技術

北上 修, 岡本 聡, 菊池伸明
(東北大学多元研)

島津武仁, 三塚 要, 青井 基
(東北大学通研)

本研究の一部は,

文部科学省“次世代IT基盤構築のための研究開発”

文部科学省 特別教育研究経費“ポストシリコン物質・デバイス創製基盤技術アライアンス”

科研費

情報ストレージ推進機構 (SRC)

の援助のもとで行われた.

内 容

I. 背景

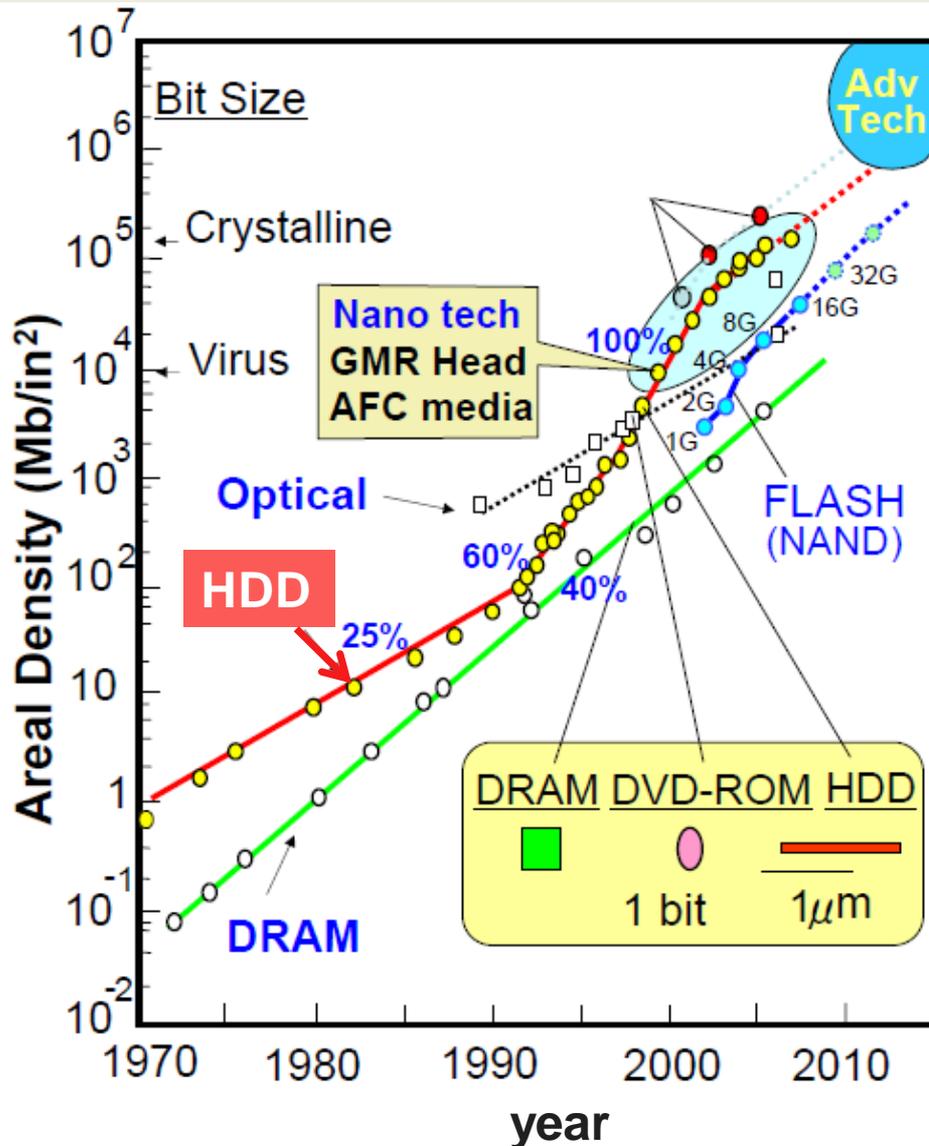
II. BPMテラビット記録の可能性に関する試算

III. BPM用磁性材料

IV. ドット格子の問題

V. まとめ

背景



trilemmaの解消
 —記録分解能, 熱安定性, 飽和記録—

Up to 1 Tb/in²

Graded media
 ECC (H/S) media etc.



Beyond 1 Tbps

ビットパターン媒体(BPM)

and / or

エネルギーアシスト記録

熱アシスト (TAMR)

マイクロ波アシスト (MAMR)

瓦記録 (shingle 記録)

BPMによりテラビット記録は可能か？

BPMに係わる様々な課題

Media

1. 量産化 技術
2. サイズ分布, 位置ずれ,
3. 加工ダメージ
4. SFD

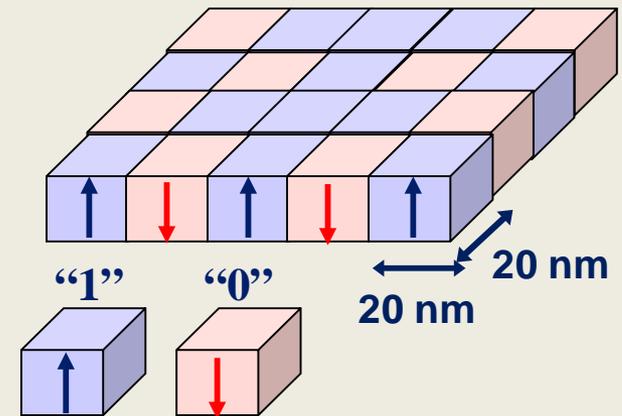
HDI

安定浮上 spacing < 10 nm

R/W

記録タイミング

BPM for 1 Tb/in²



BPMによるテラビット記録は原理的に可能か？

BPMテラビット記録の可能性

問題設定

BPMにより 5 Tbps は原理的に可能か？

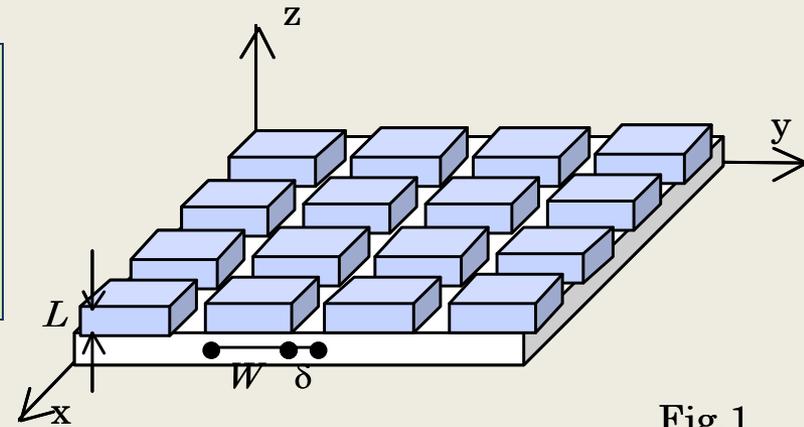
[JEITA Report 『ストレージ技術調査研究報告書』21 (2007)]

BPM が満足すべき要件

1. 個々のドットが満たすべき条件
2. ドット集合体が満たすべき条件
3. 記録特性及び熱安定性からの要求



5 Tbps は原理的に可能か？



個々のドットが満たすべき条件

B1-1. ビット占有面積 $S = (W + \delta)^2 = 130 \text{ nm}^2$ (正方ドットの場合 $W + \delta = 11.4 \text{ nm}$)

B1-2. 垂直磁化条件

実効垂直異方性

$$K_{\text{eff}} = K_u + \frac{1}{2} (N_{p_x, y} - N_{p_z}) M_s^2 = K_u + \frac{1}{2} \Delta N_{p_x, z} M_s^2 > 0 \quad \dots\dots(1)$$

B1-3. 双安定かつコヒーレントな磁化挙動

$$W \leq L_{\text{ex}} \text{ or } \delta_w \text{ (?)} \quad \dots\dots(2)$$

ここで 交換結合長 $L_{\text{ex}} = \frac{2q}{M_s} \sqrt{\frac{2A}{N_{p_x}}}$

磁壁厚 $\delta_w = \pi \sqrt{\frac{A}{K_{\text{eff}}}}$

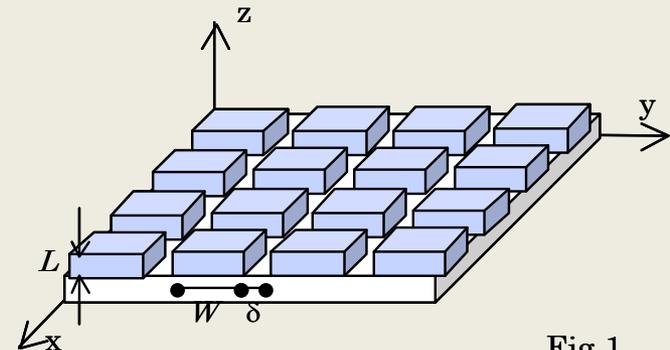
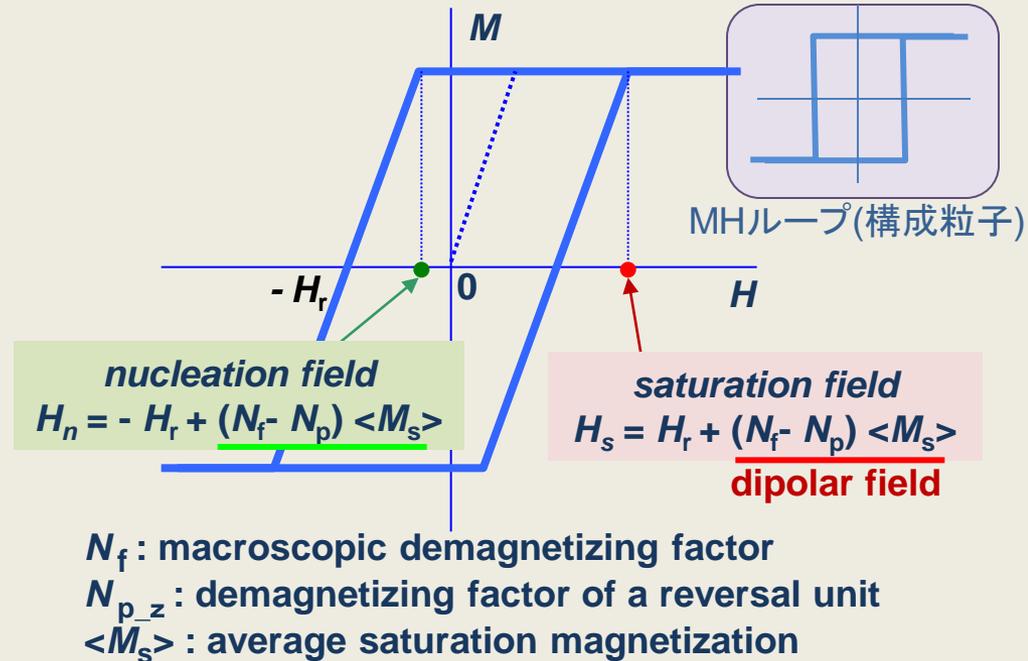
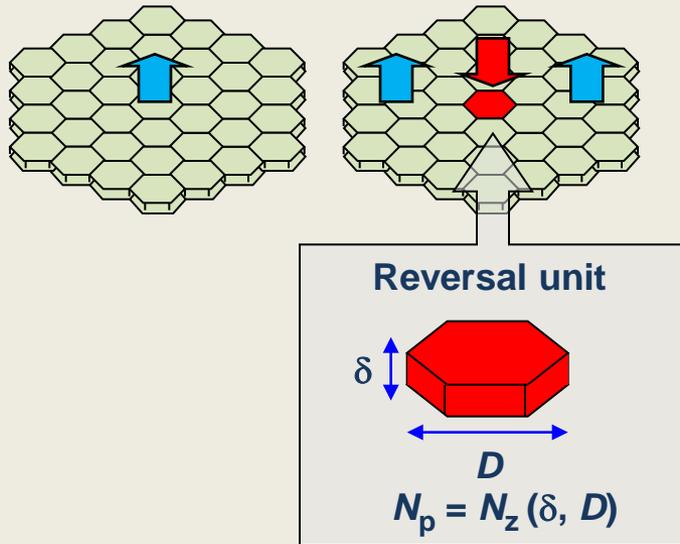


Fig.1

ドット集合体が満たすべき条件

この問題に入る前に、ドットや粒子集合体の磁化過程を理解しなければならない。



[O. Kitakami et al. Jpn. J. Appl. Phys. **40**, 4019 (2001); *ibid* **41**, L455 (2002)]

個々の粒子は以下の実効異方性を有する

$$K_{\text{eff}} = K_u - \frac{1}{2} (N_{p_z} - N_{p_{x,y}}) M_s^2 \quad \dots \dots (3)$$

粒子は、外部磁場に加え、自身を除いた全粒子からの双極子場(反磁場)を感じながら磁化する。その双極子場は、集合体全体が生み出す場から自分自身が生み出す場の差分に等しく $(N_f - N_{p_z}) \langle M_s \rangle$ となる。このような考察から求まる磁化曲線は、上図のように反磁場係数差の逆数 $1 / (N_f - N_{p_z})$ で傾斜したものとなる。

ドット集合体が満たすべき条件

双極子相互作用が媒体設計マージンを著しく狭める

1. Increase of saturation field H_s

⇒ Unfavorable for saturation recording

2. Reduction of nucleation field H_n

⇒ DC noise & ATE problem

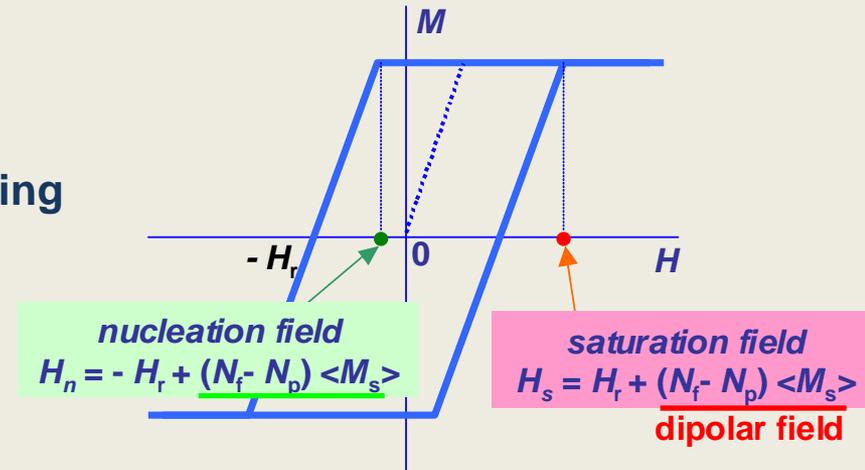
3. Severe reduction of energy barrier

⇒ $\Delta E (H_d = 0) = KV \gg \Delta E (H_d = - (N_f - N_{p_z}) \langle M_s \rangle)$

4. Increase in effective switching field distribution

⇒ Deterioration of recording resolution

$$\frac{dM}{dx} = \frac{dM}{dH_{\text{loop}}} \cdot \frac{dH_{\text{head}}}{dx}$$



ドット集合体が満たすべき条件

粒子間の双極子相互作用は記録媒体のあらゆる性能に甚大な影響を及ぼす。本報告で取り扱うパターン媒体の場合も全く同様で、この相互作用の影響を如何に低減するかが媒体をデザインをする上で非常に重要である。 但し、パターン媒体の場合に難しいのは、平均反磁場係数を通常の薄膜のように単純に $N_f \sim 4\pi$ で近似できない点にある。この具体的な計算は後ほど行うとして、先ず記録媒体応用の観点からドット集合体にどのような性質が求められるかをまとめる。

B2-1 DCイレースノイズ低減のためには残留磁化比が $M_r / M_s = 1$

$$H_K^{\text{eff}} > H_d \text{ (dipolar field from all surrounding particles)}$$

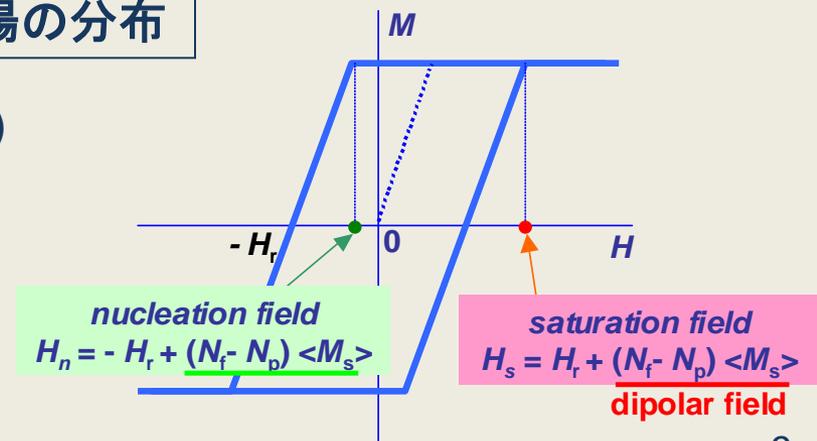
$$H_K^{\text{eff}} = 2K_{\text{eff}} / M_s = 2K_u / M_s + (N_{p_x} - N_{p_z}) M_s \dots\dots(4)$$

$$H_d = (N_f - N_{p_z}) < M_s >$$

B2-2 双極子相互作用 H_d によるスイッチング磁場の分布

$$H_K^{\text{eff}} - H_d \leq H_{\text{sw}} \leq H_K^{\text{eff}} + H_d \dots\dots(5)$$

双極子場 H_d を可能な限り低減
 ← 信号処理に依存



記録特性及び熱安定性からの要求

B3-1 飽和記録

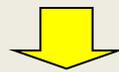
$$\text{飽和磁場 } H_{\text{sat}} = H_K^{\text{eff}} + H_d = H_K^{\text{eff}} + (N_f - N_{p_z}) \langle M_s \rangle \leq H_{\text{head}}^{\text{max}} \quad \dots\dots(6)$$

* 主磁極/SULの組み合わせで双極子場は約1/3に減少.

See, for example, Report for IT21, unpublished (2003/4/25). In this calculation, I adopted the Nakamoto & Bertram's analytic model. [K. Nakamoto and H. N. Bertram, J. Magn. Soc. Jpn. **26**, 79 (2002)]

B3-2 熱安定性

$$\text{エネルギー障壁 } \Delta E [H_d^{\text{max}} = -(N_f - N_{p_z}) \langle M_s \rangle] \geq 40 k_B T \quad \dots\dots(7)$$



式(2)のコヒーレント条件より

$$\Delta E = K_{\text{eff}} V \left(1 - \frac{(N_f - N_{p_z}) \langle M_s \rangle}{H_K^{\text{eff}}} \right)^2 \geq 40 k_B T \quad \dots\dots(8)$$

5 Tbps用BPMに課される条件

- B1. 個々のドットが満たすべき条件
- B2. ドット集合体が満たすべき条件
- B3. 記録特性及び熱安定性からの要求



条件 (1), (2), (4)~(6), (8)

以上の条件式を統合・整理すると、5 Tbps BPMに課される条件は以下の通り。

$$(N_f - N_{p_z}) \langle M_s \rangle \leq H_K^{\text{eff}} \leq H_{\text{head}}^{\text{max}} - (N_f - N_{p_z}) \langle M_s \rangle \quad \dots\dots(9)$$

$$M_s V H_K^{\text{eff}} \left(1 - \frac{(N_f - N_{p_z}) \langle M_s \rangle}{H_K^{\text{eff}}} \right)^2 \geq 80 k_B T \quad \dots\dots(10)$$

結局、5 Tbps用パターン媒体を原理的に実現できるかどうかは、式(9) & (10)を同時に満たす解が存在するかどうかにかかっている。これらの解の存在を見つけるには、ドット集合体の反磁界係数 N_f 、単一ドットの反磁界係数 $N_{p_x, y, z}$ を知らなければならない。そこで、先ずこれらの反磁界係数の計算法について述べた後、5Tbps用パターン媒体の条件式(9) & (10)に戻る。

見積もりに必要な反磁界係数

$$\underline{(N_f - N_{p_z})} \langle M_s \rangle \leq H_K^{\text{eff}} \leq H_{\text{head}}^{\text{max}} - \underline{(N_f - N_{p_z})} \langle M_s \rangle \quad \dots\dots(9)$$

$$M_s V H_K^{\text{eff}} \left(1 - \frac{(N_f - N_{p_z}) \langle M_s \rangle}{H_K^{\text{eff}}} \right)^2 \geq 80 k_B T \quad \dots\dots(10)$$

$$K_{\text{eff}} = K_u + \frac{1}{2} \left(\underline{N_{p_x, y}} - N_{p_z} \right) M_s^2 = K_u + \frac{1}{2} \Delta N_{p_x, z} M_s^2 > 0$$

N_f : ドット集合体のz方向反磁界係数 (全ドット)

N_{p_z} : 一つのドットのz方向反磁界係数

$N_{p_x, y}$: 一つのドットのx, y方向反磁界係数

$N_f - N_{p_z}$: 自身以外のドットの影響による反磁界係数

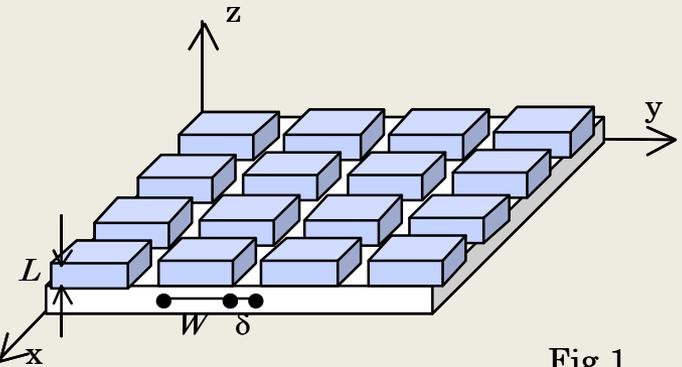


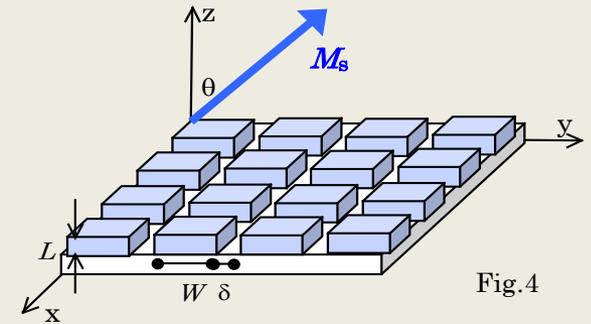
Fig.1

ドットの垂直方向反磁界係数

ドット集合体

packing density $\rho = \left(\frac{W}{W + \delta} \right)^2$

$$N_f = \frac{4\pi}{3} \left(\frac{2}{\rho} \cdot \frac{K_{\perp}}{2\pi M_s^2} + 1 \right) = \frac{4\pi}{3} \left\{ 2 \left(\frac{W + \delta}{W} \right)^2 \cdot \frac{K_{\perp}}{2\pi M_s^2} + 1 \right\}$$



$$\frac{K_{\perp}}{2\pi M_s^2} = \frac{1}{2} \left(\frac{W}{W + \delta} \right)^2 \left[3 \left(\frac{W}{W + \delta} \right)^2 - 1 \right] + \frac{3W^2}{\pi^3 L (W + \delta)} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{m^3} \sin^2 \frac{m\pi W}{W + \delta} \left[1 - \exp \left(-\frac{2m\pi L}{W + \delta} \right) \right]$$

$$+ \frac{3(W + \delta)}{\pi^5 L} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{m^2 n^2 \sqrt{m^2 + n^2}} \sin^2 \frac{m\pi W}{W + \delta} \sin^2 \frac{n\pi W}{W + \delta} \left\{ 1 - \exp \left[-\frac{2\pi \sqrt{m^2 + n^2} L}{W + \delta} \right] \right\}$$

単一ドット

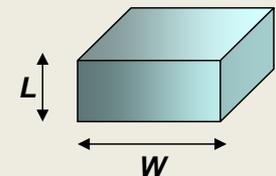
$$\pi p^2 N_{p_z} = 2p^2 \cot^{-1} \left(\frac{1}{p^2} \sqrt{1 + 2p^2} \right) - p(p^2 - 1) \cdot \log \left(\frac{\sqrt{1 + 2p^2} + p}{\sqrt{1 + 2p^2} - p} \right) + p^3 \cdot \log(3 + 2\sqrt{2})$$

$$- p \cdot \log \left(\frac{\sqrt{1 + p^2} + p}{\sqrt{1 + p^2} - p} \right) - 2p^2 \sqrt{1 + p^2} + \frac{2}{3} p^3 + 2p^2 \sqrt{1 + 2p^2} - \frac{2}{3} (1 + 2p^2)^{3/2}$$

aspect ratio $p = L/W$

$$N_{p_{x,y}} = \frac{1}{2} (1 - N_{p_z})$$

$$\Delta N_{x-z} = (N_{p_{x,y}} - N_{p_z})$$



H. Fujiwara, JPSJ **20**, 2092 (1965); T. Iwata et al. JAP **37**, 1285 (1966). その後、異なる格子に対する計算も行われている。M. Masuda et al. JJAP **26**, 1680 (1987); H. Daimon & O. Kitakami, JJAP **30**, 282 (1991).

ドット集合体及び単一ドットの反磁界係数

形状異方性 $K_{\text{eff}} = K_u + \frac{1}{2} (N_{p_x,y} - N_{p_z}) M_s^2 = K_u + \frac{1}{2} \Delta N_{p_x,z} M_s^2 > 0$

磁化曲線傾斜 $\alpha = \frac{dM}{dH} = 4\pi \frac{1}{\Delta N} = 4\pi \frac{1}{N_f - N_{p_z}}$

ドット周期固定 ($a = 11.4 \text{ nm}$) の場合

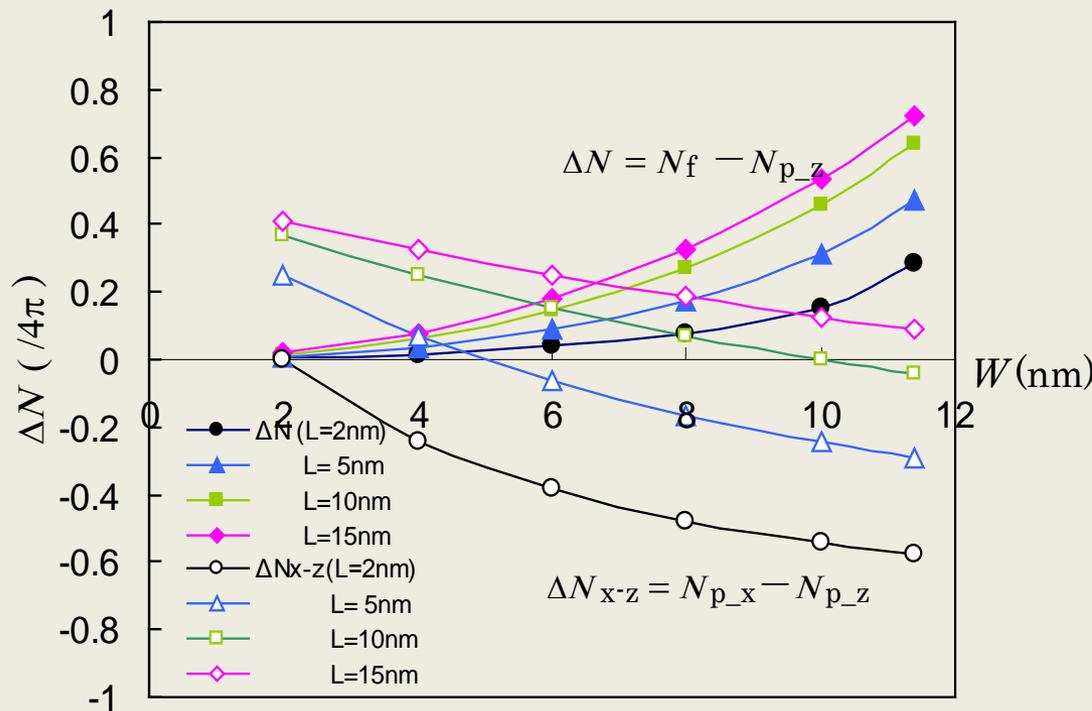
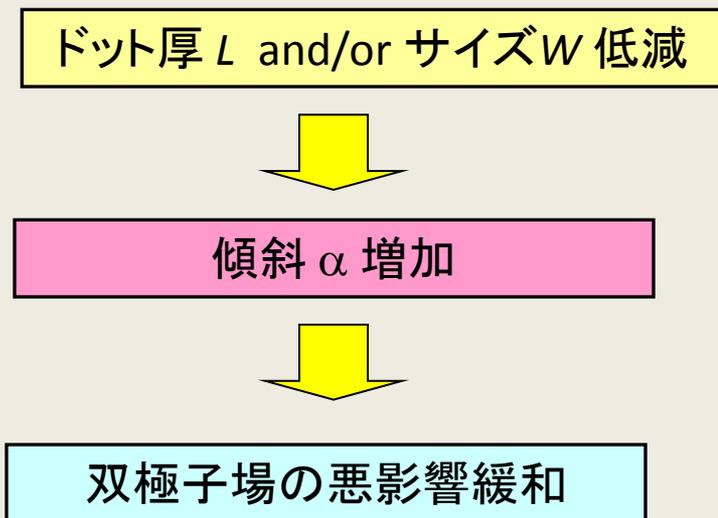


Fig.5

5 Tbpsの原理的な可能性について

BPMに課される条件

$$(N_f - N_{p_z}) \langle M_s \rangle \leq H_K^{\text{eff}} \leq H_{\text{head}}^{\text{max}} - (N_f - N_{p_z}) \langle M_s \rangle \quad \dots\dots(9)$$

$$M_s V H_K^{\text{eff}} \left(1 - \frac{(N_f - N_{p_z}) \langle M_s \rangle}{H_K^{\text{eff}}} \right)^2 \geq 80 k_B T \quad \dots\dots(10)$$

以降の議論を具体的に進めるために、現実に近い以下の2条件を設定する。

a. 記録ヘッドが発生しうる最大磁場 $H_{\text{head}}^{\text{max}} = 16 \text{ kOe}$. \dots\dots(11)

b. 双極子場 $(N_f - N_{p_z}) \langle M_s \rangle = \Delta N \langle M_s \rangle$ は有効異方性場 H_K^{eff} の 1/5以下.

$$H_K^{\text{eff}} \geq 5 \Delta N \langle M_s \rangle \quad \dots\dots(12)$$

5 Tbpsの原理的な可能性について

$H_{\text{head}}^{\text{max}} = 16 \text{ kOe}$ を (9), (10) に代入して

$$H_{\text{K}}^{\text{eff}} \leq \frac{5}{6} H_{\text{head}}^{\text{max}} = 13.3 \text{ kOe} \quad \dots\dots(13)$$

$$M_{\text{s}} V H_{\text{K}}^{\text{eff}} \geq 125 k_{\text{B}} T = 5.2 \times 10^{-12} \text{ erg at } 300\text{K} \quad \dots\dots(14)$$

$$H_{\text{K}}^{\text{eff}} \geq 5 \Delta N \langle M_{\text{s}} \rangle \quad \dots\dots(12)$$

式(13)において、許容異方性磁場の限界 $H_{\text{K}} = 13.3 \text{ kOe}$ をとると、式(14)より

$$V \geq \frac{3.9 \times 10^5}{M_{\text{s}}} [\text{nm}^3] = \begin{matrix} 1300 (M_{\text{s}} = 300 \text{ emu/cc}) \\ 800 (M_{\text{s}} = 500) \\ 500 (M_{\text{s}} = 800) \\ 400 (M_{\text{s}} = 1000) \end{matrix} \quad \dots\dots(14')$$

式(12)と(14')を同時に満足する解があるかどうかが5 Tbpsの実現可能性を決める。

$M_s = 300 \text{ emu/cc}$ の材料を用いた場合

式(12) $H_K^{\text{eff}} \geq 5 \Delta N \langle M_s \rangle$ より

$$\Delta N \leq \frac{H_K^{\text{eff}}}{5 \langle M_s \rangle} = \frac{1.33 \times 10^4}{5 \rho M_s} = 4\pi \frac{0.7}{\rho} \quad 0 < \rho \leq 1$$

右図を見てわかるように、この不等式は今回計算した全サイズ領域

$$0 < W \leq 11.4 \text{ nm}, \quad 0 < L \leq 15 \text{ nm}$$

に於いて満足される。

また式(14')より $V \geq 1300 \text{ nm}^3$ でなければならないが、これは例えば

$$W = 10 \text{ nm}, \quad L = 13 \text{ nm}$$

とすることにより容易に満足される。したがって、 $M_s = 300 \text{ emu/cc}$ の場合には5 Tbpsの解は存在する。ちなみにこの場合の実効異方性定数は

$$K_{\text{eff}} = \frac{1}{2} M_s H_K^{\text{eff}} = 2 \times 10^6 \text{ erg/cc}$$

材料的にも対応可能

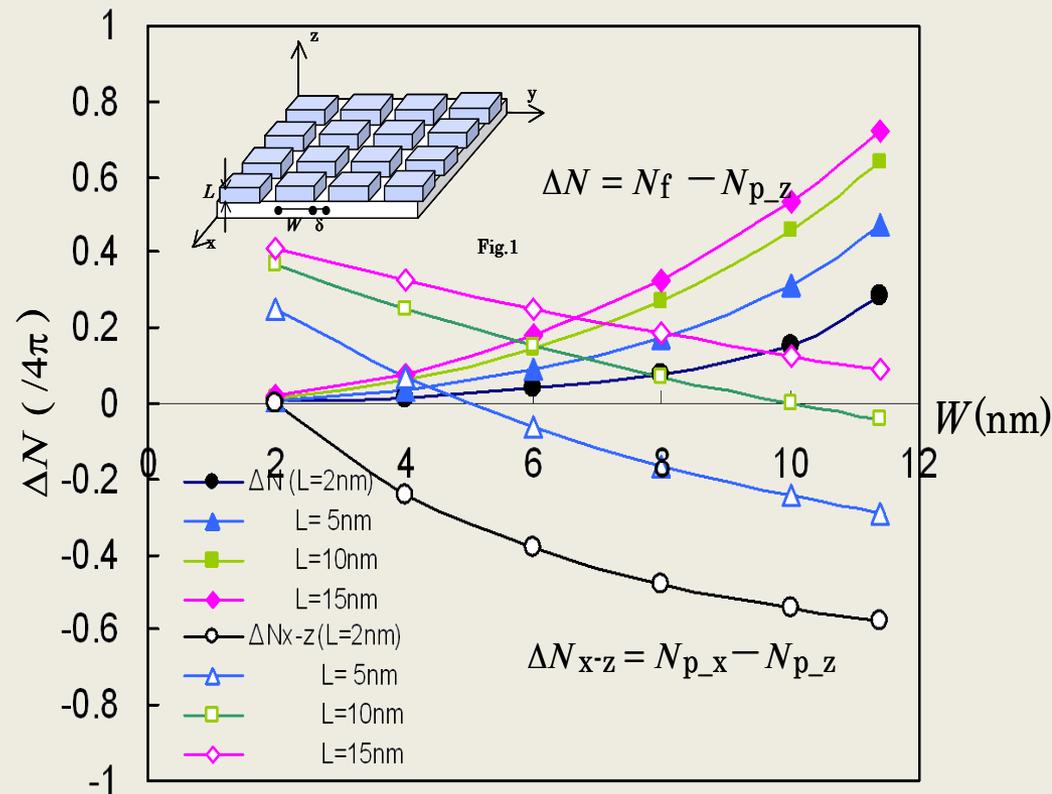


Fig.5

5 Tbpsの原理的な可能性について

1. 簡単な試算より, 5 Tbps という超高密度記録は BPM により原理的に実現可能との見通しが得られた.
2. BPM 設計にあたっては, 双極子相互作用の制御が重要である.
3. 双極子相互作用軽減のためには

磁化 M_s ドット体積 ドット厚

の低減が非常に有効である.

BPM用磁性材料

Co/Pt

Table 1 Magnetic properties & characteristic length for various magnetic materials

materials	M_s (emu/cc)	K_u (erg/cc)	H_K (kOe)	Q ($K_u/2\pi M_s^2$)	d_c (nm)*	l_{ex} (nm)**	δ_w (nm)***	memo
hcp Co	1400	4.2×10^6	6	0.34	84	29	22	
hcp Co ₈₀ Pt ₂₀	1200	13	22	1.4	170	34	12	$H_n > H_p$
L1 ₀ FePt	1100	70	128	9.2	400	26	4	$H_n \sim H_p$
L1 ₁ CoPt	950	35	73	6.2	380	30	3	
Co/Pt *	1650 (/Co) [380]	27 (/Co) [6.2]	12	1.6 [6.8]	1000		3.5	$H_n > H_p$

☆ The data for [Co(0.6nm)/Pt(2.0nm)]₃ are quoted from the master thesis of T. Kato at Tohoku Univ.

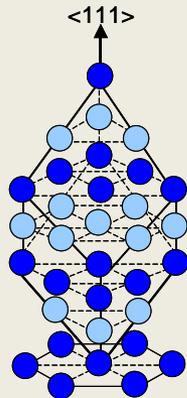
The numbers in parentheses are the values averaged over total volume.

* Critical diameter for single-domain spherical particle : $d_c = 9\gamma_w / (2\pi M_s^2)$ γ_w : wall energy density

** Exchange length for spherical particle : $l_{ex} = 2r_{ex} = q \sqrt{6A/\pi M_s^2}$

*** Wall width

L1₁ CoNi-Pt



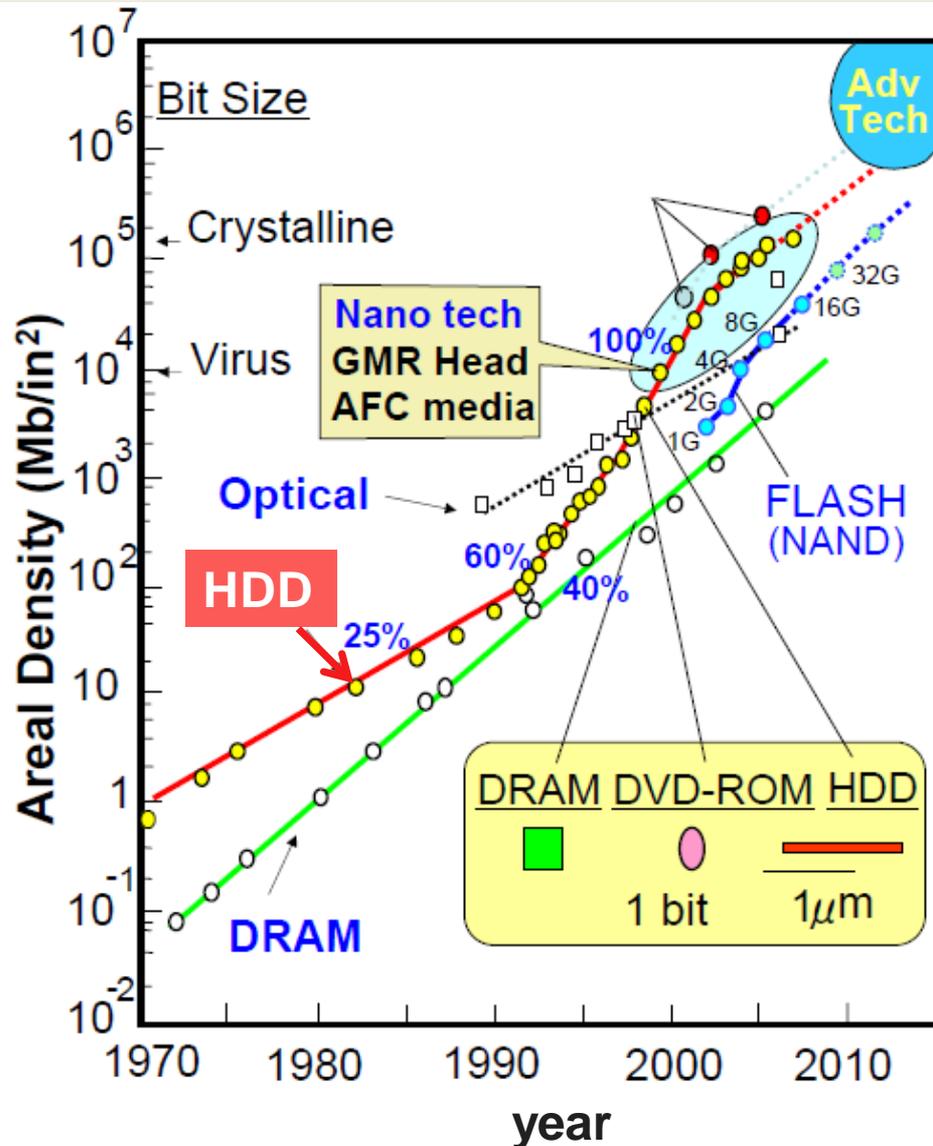
L1₁-Co₅₀Pt₅₀

Table I Values of K_u , K_u/M_s and S , for L1₁-type Co-Pt and Co-Ni-Pt films having M_s of 500-600 emu/cm³.

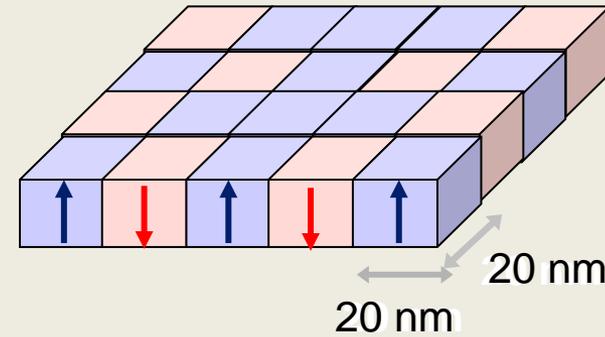
Composition (at%)			M_s	K_u	K_u/M_s	S
Co	Ni	Pt	(emu/cm ³)	($\times 10^7$ erg/cm ³)	(kOe)	
50	0	50	940	3.7	39.5	0.5
30	0	70	600	1.2	19.4	0.19
25	0	75	510	0.7	14.4	0.13
20	30	50	570	1.8	31.4	0.45
15	60	25	520	0.8	14.6	0.3

[H. Sato, T. Shimatsu et al. J. Appl. Phys. **103**, 07E114 (2008); *ibid* (in press)]

ナノ磁性体研究の必要性



1 Tbits/in²



Bit size is comparable to characteristic length, such as

exchange length

$$L_{\text{ex}} \approx \sqrt{A / M_s}$$

or

domain wall width

$$\delta_w \approx \pi \sqrt{A / K_u}$$



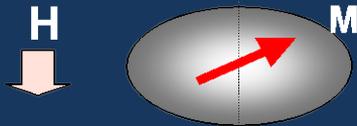
How does such a tiny magnet behave in response to H , T , etc ?

マイクロマグネティクスの予測

マイクロマグネティクス理論の予測

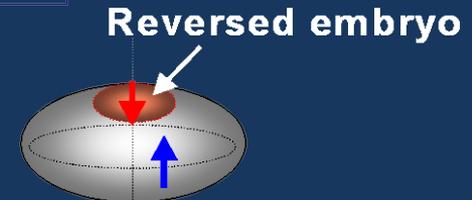
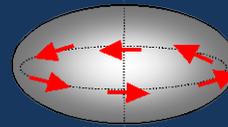
Diameter $D \leq$ Exchange length L_{ex}

Easy axis



coherent rotation
(Stoner-Wohlfarth model)

$D \geq L_{ex}$



incoherent (curling or nucleation)

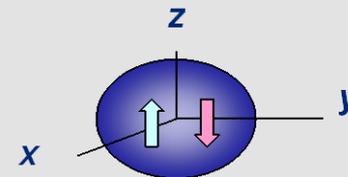
Critical boundary for coherent/incoherent rotation

$$L_{ex} = \frac{2q}{M_s} \sqrt{\frac{2A}{N_x}} \sim \underline{\underline{35 \text{ nm}}}$$

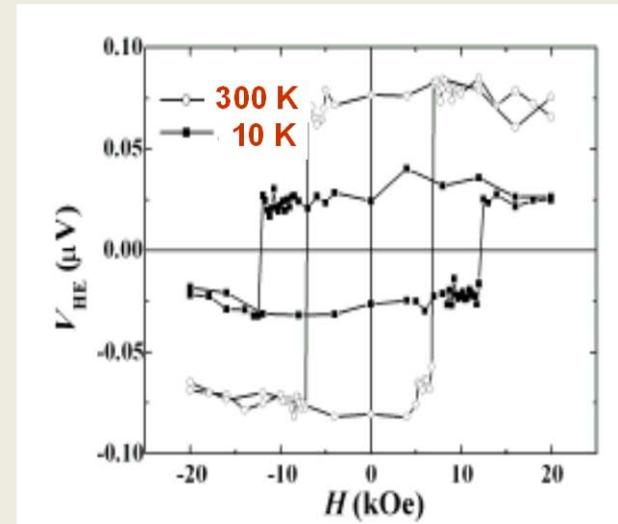
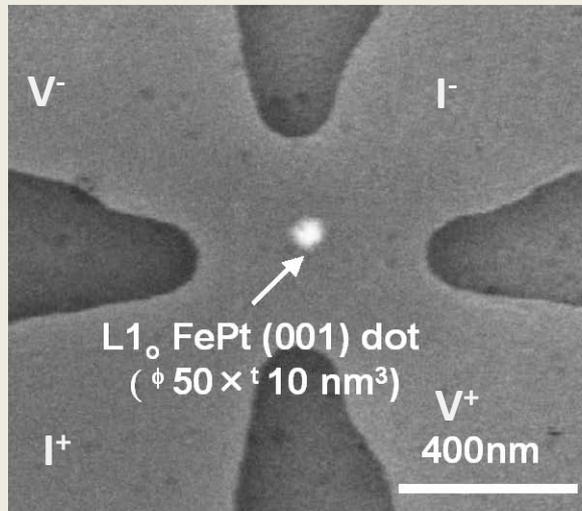
for L_{10} FePt particle with aspect ratio of 1/5

for $D \leq L_{ex} \rightarrow$ coherent rotation

for $D > L_{ex} \rightarrow$ incoherent rotation
(curling or nucleation)



単ドットの超高感度磁化検出



$$M_s V \sim 1 \times 10^{-14} \text{ emu}$$

Developed AHE method



$\sim 10^{-15} \text{ emu (Co: 10 nm)}$

	VSM	SQUID	micro SQUID (Neel lab.)	AHE (present method)
Sensitivity	$\sim 10^{-4} \text{ emu}$	$\sim 10^{-7} \text{ emu}$	$\sim 10^{-15} \text{ emu}$	$\sim 10^{-15} \text{ emu}$
Max Field Max Temp	$H_{\text{max}} = 20 \text{ kOe}$	$H_{\text{max}} = 50 \text{ kOe}$	$H_{\text{max}} = 90 \text{ kOe}$ $T_{\text{meas}} < 9 \text{ K}$	$H_{\text{max}} = 90 \text{ kOe}$

L1₀FePt 単一ドットの磁化挙動

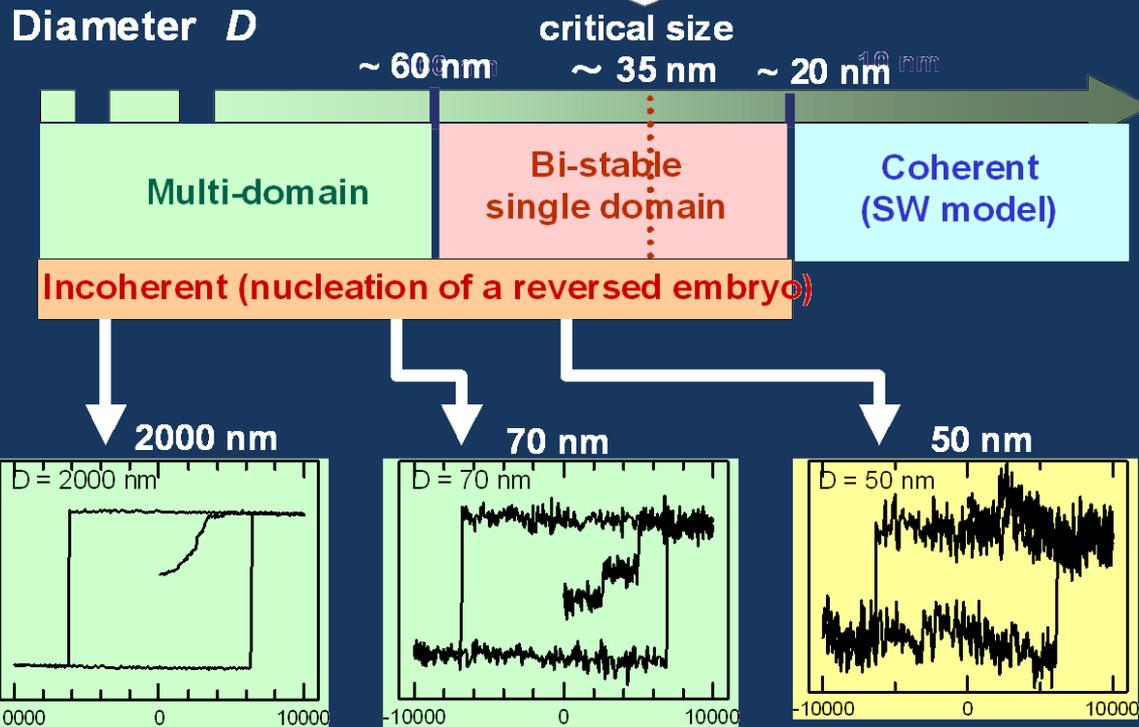
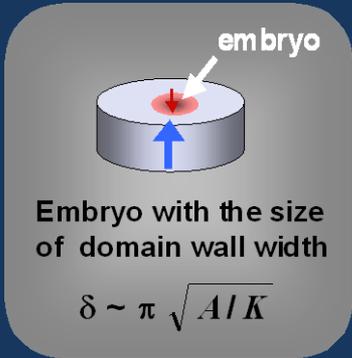
Critical size for coherent / incoherent switching

$$D_c = \frac{2q}{M_s} \sqrt{\frac{2A}{N_x}} \sim 35 \text{ nm} > \text{Experiment } 20 \text{ nm}$$

for aspect ratio of 5

$$M_s = 1250 \text{ G}$$

$$A = 1 \times 10^{-6} \text{ erg/cm}$$



For the first time, we have clarified that FePt dot behaves in a coherent manner when the dot size is smaller than nearly half the exchange length. ($D < L_{ex}/2$)

BPM用ナドット格子の問題

A. Interdot dipolar interaction

→ degradation of thermal stability
broadening of effective SFD

reduction of $\langle M \rangle$, V_{dot} , L/W is necessary

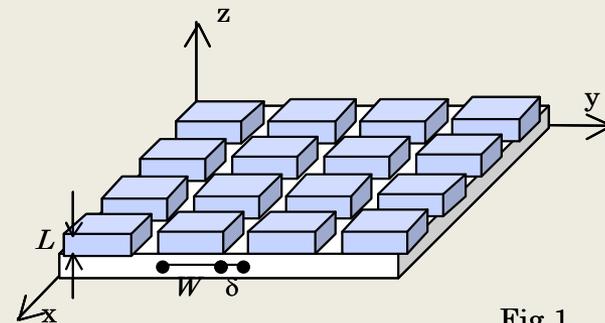


Fig.1

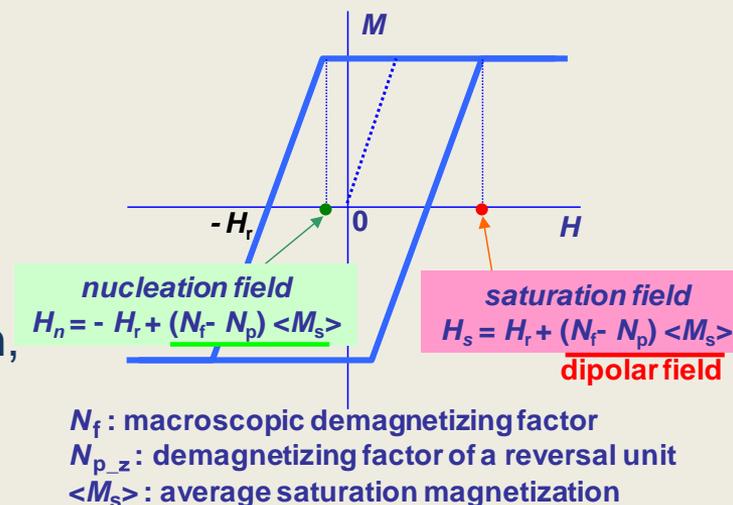
B. Switching Field Distribution

extrinsic factors :

size dispersion, etching damage etc.

intrinsic factors :

structural defects, such as c-axis dispersion,
lattice defects, layer imperfection, etc.

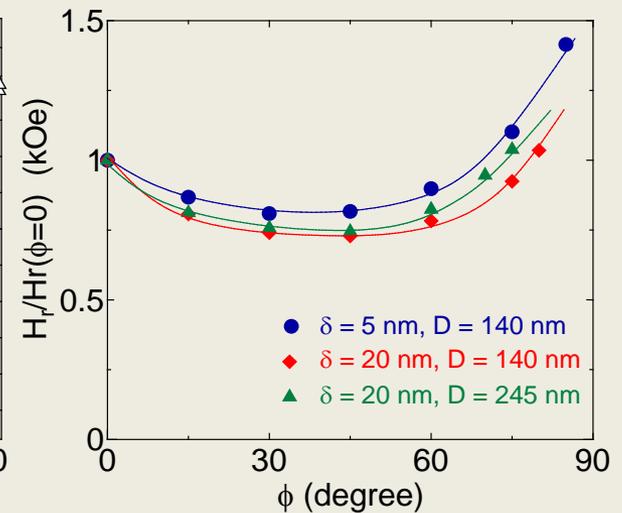
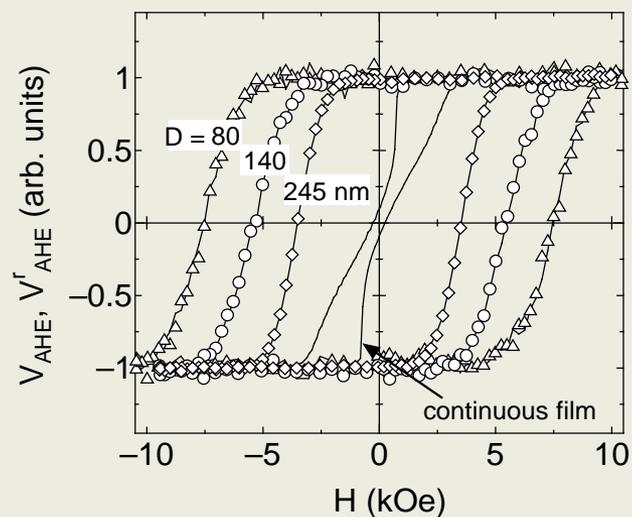
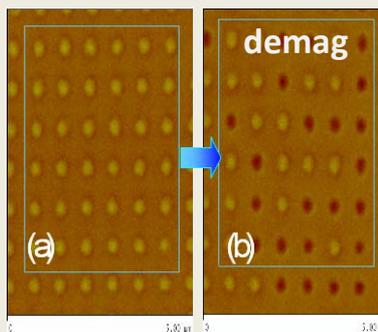
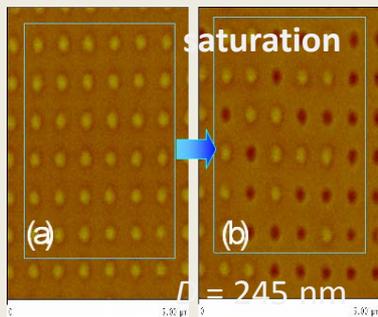
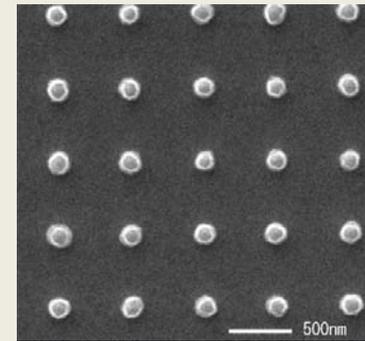


Materials being investigated :

- (1) hcp Co-Pt (2) Co/Pt (3) L1₁ CoPt (4) Hard/Soft stack

hcp Co-Pt ドット格子

Crystalline size : ~ 15 nm
 c-axis dispersion : $\Delta\theta_{50} = 2.8^\circ$
 Magnetization : $M_s = 1180$ emu/cc
 Magnetic anisotropy : $K_u = 1.24 \times 10^7$ erg/cc
 Anisotropy field : $H_K = 20$ kOe

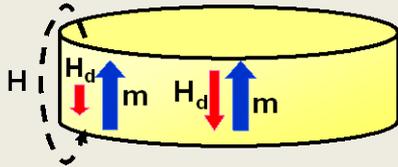


- Each Co-Pt dot is bistable
- Nucleation type reversal
- $H_r \ll H_K$ increases with reducing D
- Somewhat broad SFD

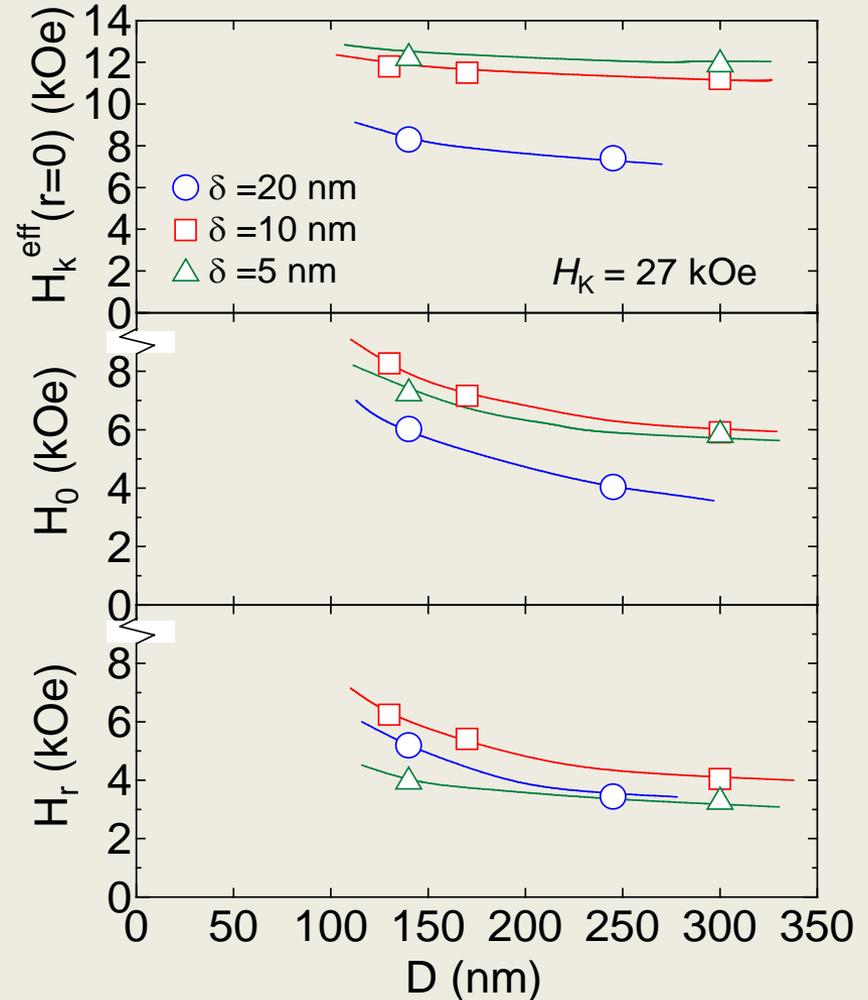
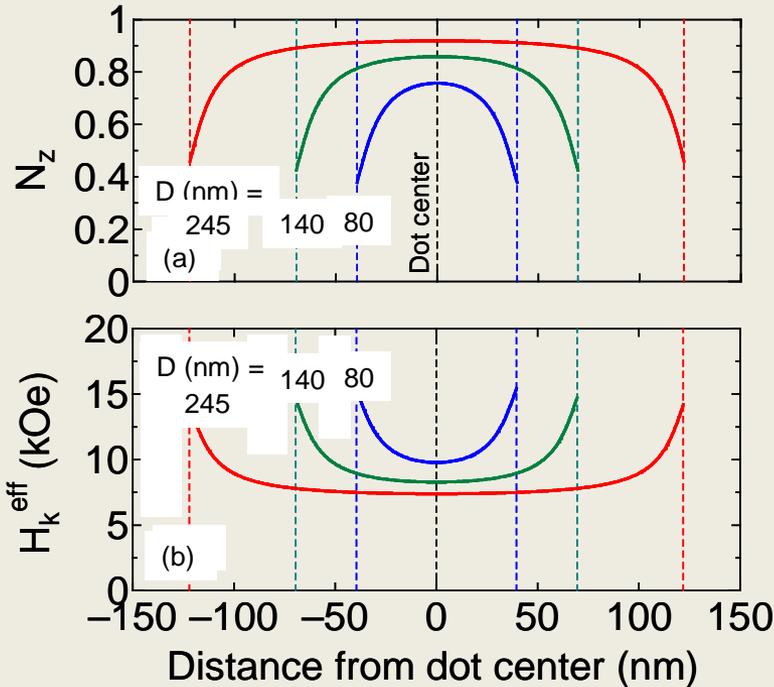
反転磁場のドットサイズ依存性

[K. Mitsuzuka, et al. J. Magn. Soc. Jpn, **30**, 100 (2006)]

Effective H_K



$$H_K^{eff} = H_K - 4\pi M_s N_z(r)$$



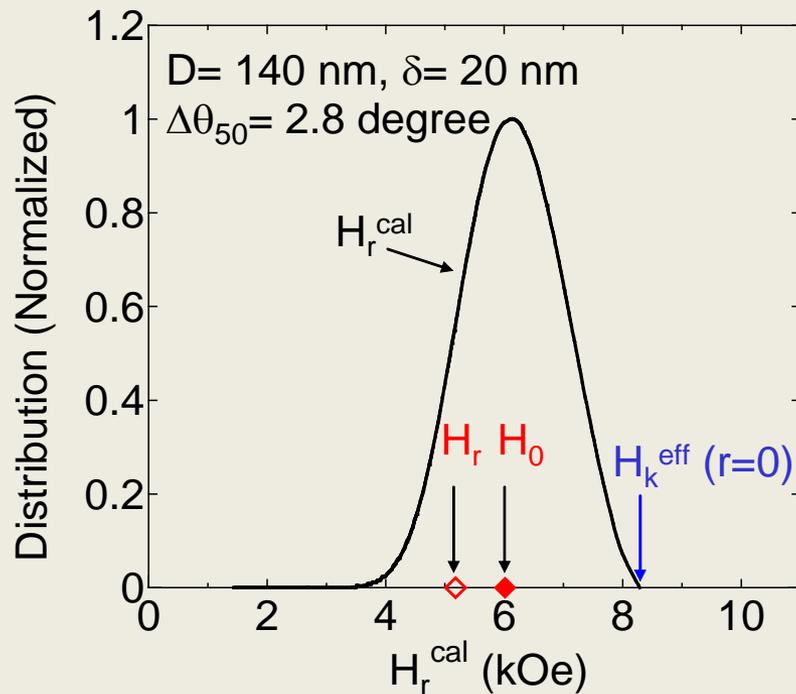
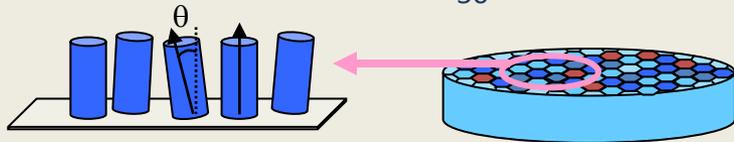
H_K^{eff} roughly explains the D dependence of H_0 , but H_0 decreases more rapidly than H_K^{eff} .

反転磁場, SFDに及ぼす c 軸分散の影響

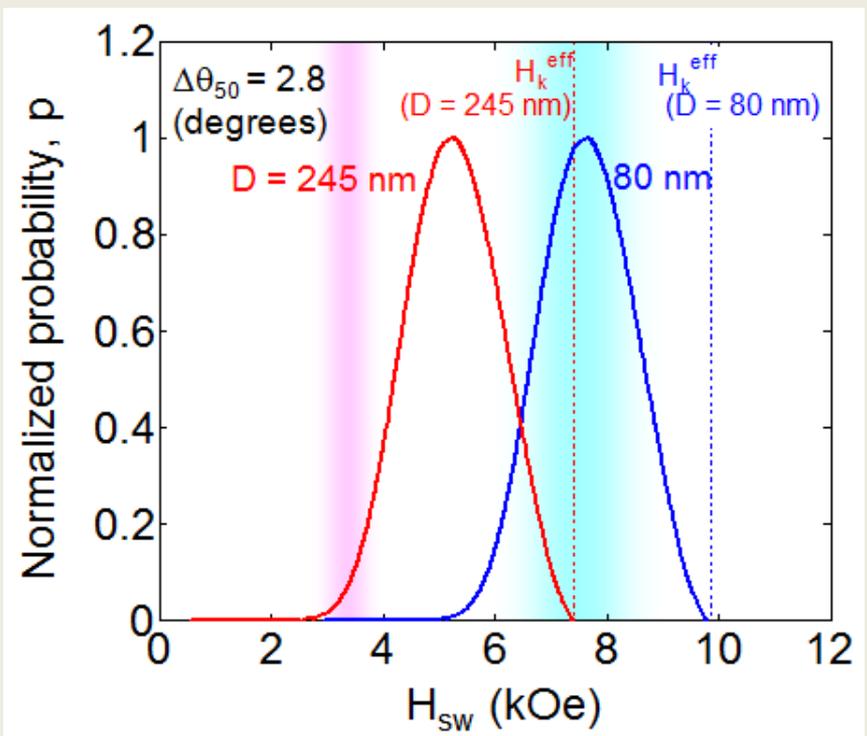
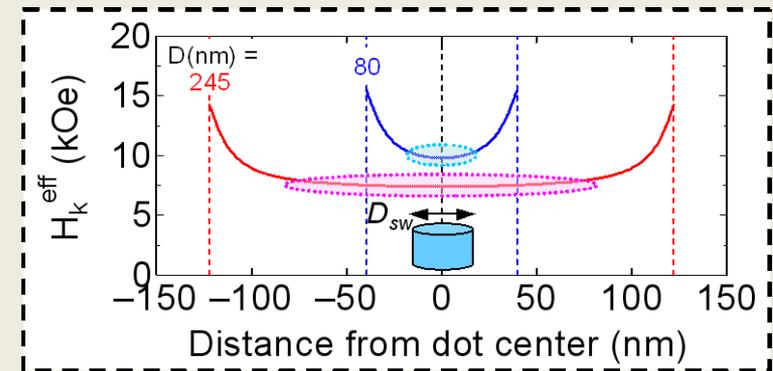
[K. Mitsuzuka, et al. J. Magn. Soc. Jpn, **30**, 100 (2006)]

c -axis dispersion

$$\Delta\theta_{50} = 2.8^\circ$$

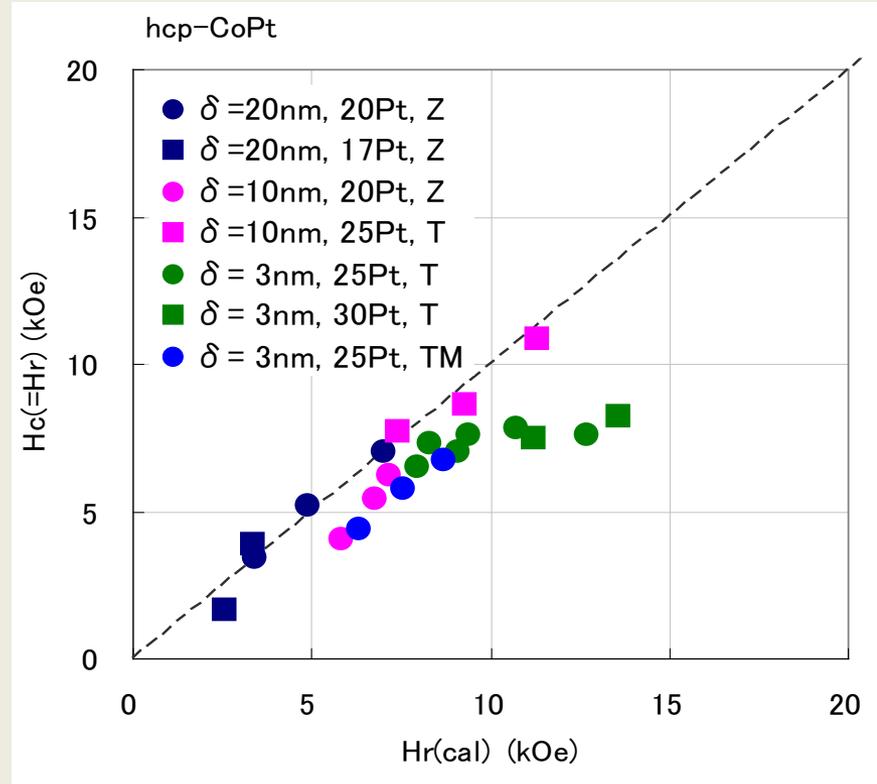
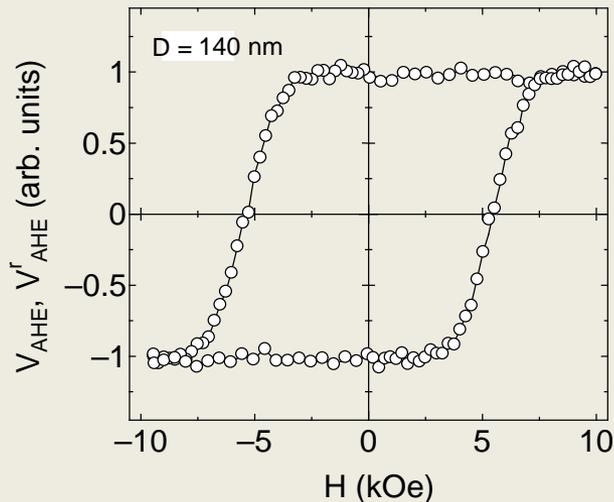
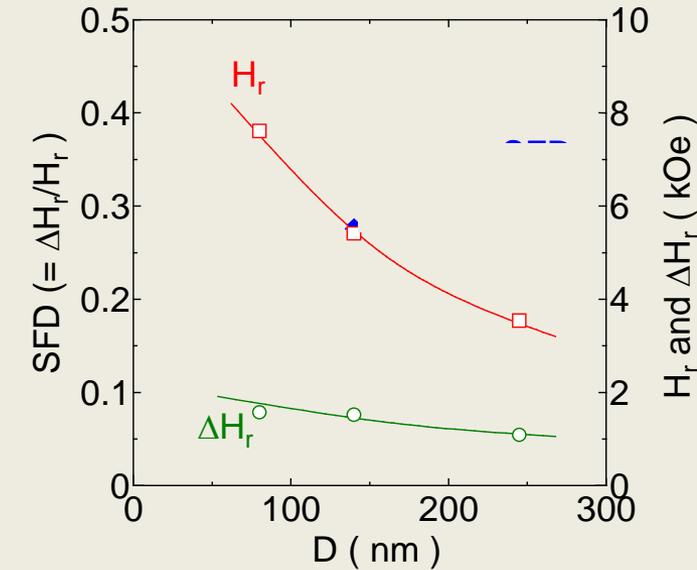


For smaller dots, $\max H_r^{\text{cal}} \sim H_0$



反転磁場, SFDに及ぼす c 軸分散の影響

[K. Mitsuzuka, et al. J. Magn. Soc. Jpn, **30**, 100 (2006)]

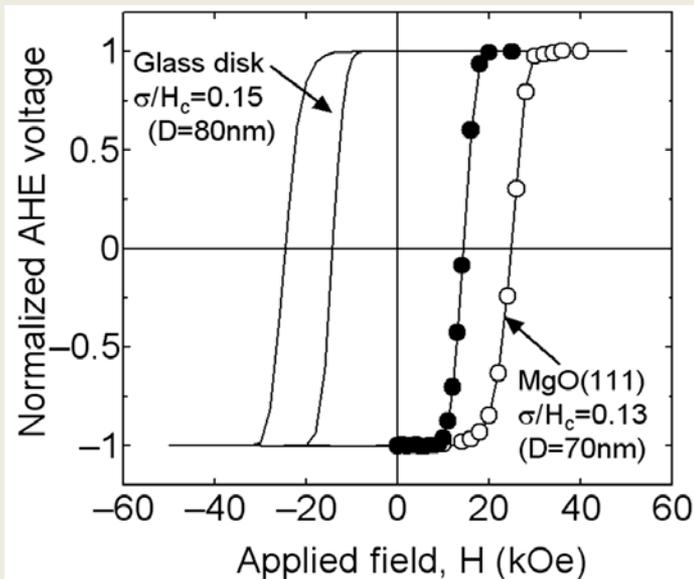
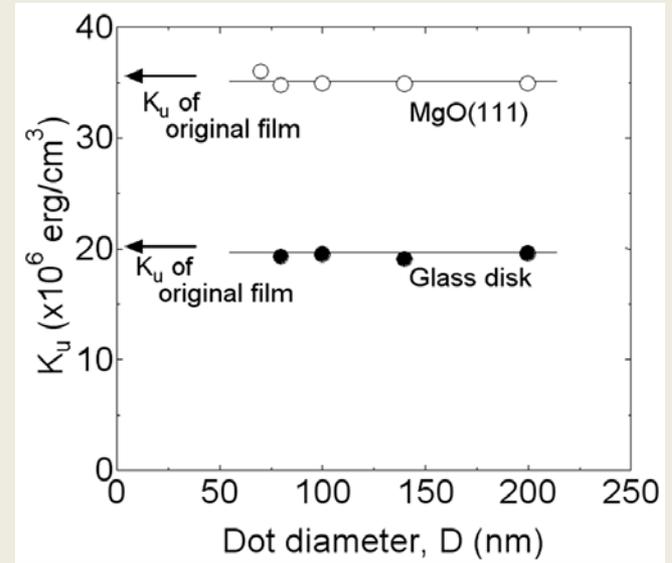
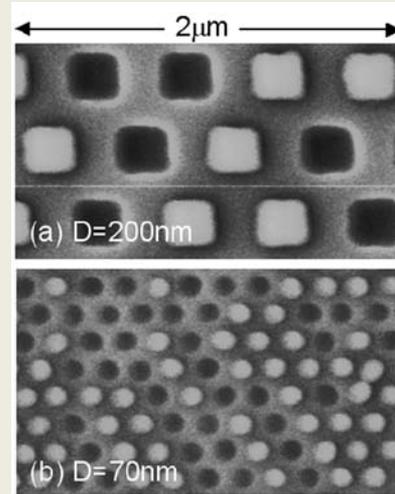
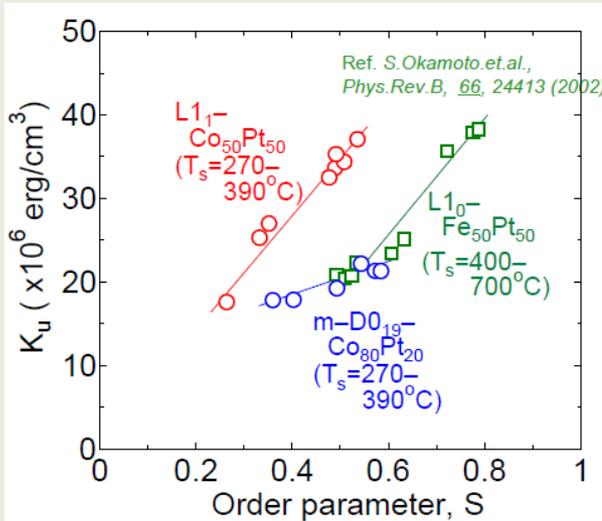


M-H loop shearing comes from SFD probably governed by c -axis dispersion

Reduction of c -axis dispersion would be crucial for lowering SFD

L₁ CoPtドット格子

[H. Sato et al. JAP **103**, 07E114 (2008) ; *ibid* (in press)]



$SFD \equiv \Delta H_c/H_c = 0.17$ for L₁ CoPt
 < 0.25 for hcp Co₈₀Pt₂₀



This lower SFD may be due to better c-axis dispersion.

まとめ

1. **BPM**を用いたテラビット記録の可能性について試算した結果, 少なくとも**5 Tbps**を越える高密度化は原理的に可能と予測される. ただし, ドット間相互作用の設計・制御が重要なポイントである.
2. **BPM**用材料として適当な磁化を有する**Co/Pd, Pt** や**L₁ Co(Ni)Pt**が現状では有望と考えられる.
3. サブミクロン**Co/Pt**ドットの磁化反転様式, 双安定条件を明らかにした. 高速パルス反転実験などから, その反転様式は磁壁厚程度の反転核生成→磁壁伝搬で進行することが実証された. 今後は, **BPM**サイズ領域 (~ 10 nm)にまで踏み込み, ナノ磁性体の振舞いを調べる必要がある.
4. **hcp Co-Pt, L₁ CoPt**ドット格子の実験から, **SFD**には個々の結晶粒の結晶軸分散が深く関与していることが示唆された. 今後は, 微細加工時のダメージ, バラつき, 材料中の格子欠陥も含め, より踏み込んだ調査が必要.