

## メモリーの超高密度化を目指す磁性材料そして記録方式

氏名 北上修 岡本聡 菊池伸明 島津武仁<sup>1,2</sup> 青井基<sup>1</sup>  
所属 東北大学 多元研<sup>1</sup> 通研<sup>2</sup> 学際センター

磁気メモリーの主役であるハードディスク(HDD)のデータ面密度は順調に増加し、数年内に1平方インチ当り1テラ(兆)ビットに達しようとしています。ビット面積に換算すれば20 nm 四方程度です。高い SN (記録分解能)を維持するには、記録媒体を構成する粒子がビットより十分に微細でなければなりません。しかし粒子の微細化に伴いその磁気異方性エネルギーは減少し、遂には熱エネルギーを無視できず情報が消失するようになります。この問題を防ぐには、記録材料の磁気異方性  $K_u$  を高める必要がありますが、一方そうした材料では通常の磁気ヘッドで記録を行うことができません。ここに述べた高記録分解能、熱安定性、記録という相反する3つの要求(“trilemma”と呼びます)を如何に満足させるかが最重要の課題となっています。これまでに、この壁を乗り越えるために、 $L1_0$  FePt をはじめとする高磁気異方性材料、そしてそうした材料に対しても記録できる新しい記録方式が幾つか提案されています。その代表例がエネルギーアシスト記録と呼ばれるもので、単純にはヘッドの磁場だけでは記録できないので、記録時に近接場に過熱をしたり、あるいはスピントルク発振器から発生したマイクロ波を共鳴吸収させたりして、記録をサポートする方法です。どのような原理で記録媒体を励起して記録するか、その方法に応じて媒体に要求される特性も異なってきます。例えばマイクロ波励起の場合にはスピン緩和定数が小さいこと、あるいは近接場による加熱の場合には Curie 温度を低減しなければなりません。

私達のグループでは、マイクロ波や歳差運動を積極的に利用した磁化反転プロセスに関する基礎的な理論・実験検証、また trilemma 問題にひとつブレークスルーを与える新型積層構造記録媒体の提案・実用化を進めてきましたが、講演では本シンポジウムの主旨を考慮して、上記の各種新記録方式に適した高磁気異方性記録材料に関する私達の様々な試みを中心にお話ししたいと思います。また時間が許せば、私達が現在最も力を入れて研究を進めている単一ナノ磁性体の振る舞い、そしてサブナノ秒領域におけるスピンドYNAMIXSに関する研究についても紹介させて頂きたいと思ひます。

1  
多元研-九州SRセンター合同シンポ  
2012年7月30日

## メモリーの超高密度化を目指す磁性材料そして記録方式

北上 修 岡本 聡 菊池 伸明 (東北大 多元研)

2

### Purpose of our lab

- Synthesis of new functional magnetic materials
- static & dynamics of single nanomagnet
- Ideas for new recording & spintronic devices  
joint with Storage Research Consortium

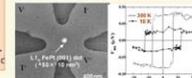
#### New Materials

e. g.

- ✓ Lattice deformation  
⇒ giant MAE
- ✓ Co-5d alloy  
⇒ negative K
- ✓ L1<sub>2</sub> CoPt phase  
⇒ giant MAE & low T<sub>c</sub>

#### Characterization

- ✓ Phase stability in nm regime  
⇒ Co, L1<sub>0</sub>FePt
- ✓ Behavior & Dynamics of Single Nanomagnet



#### Ideas for New Recording

- ✓ Hard/Soft stack media  
⇒ practical use
- ✓ Precessional Switching
- ✓ Microwave-Assisted Switching



3

### Contents

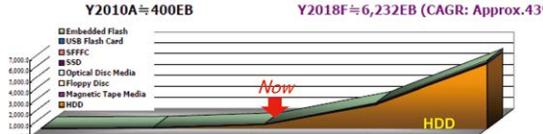
- Background**  
*Ultra High Density Recording* ⇒ *Trilemma*
- New Recording Schemes & New Materials**  
*What is required for magnetic materials?*
- Intuitive Picture of Magnetic Anisotropy**  
*What is difficult for controlling MAE?*
- Some Attempts toward Large MAE**  
*How do we understand the behavior of MAE?*
- Behavior of Single Nanomagnet**
- Summary**

4

### Explosive Increase in Information Data

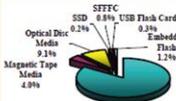
#### 3 Gross Capacity of Digital Media/Storage Outlook

Y2010A ≈ 400EB      Y2018F ≈ 6,232EB (CAGR: Approx. 43%)



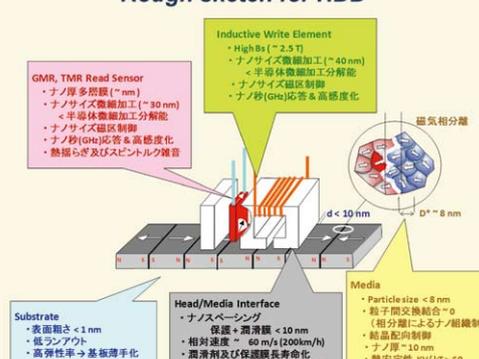
[ TechnoSystem 2011.5 ]

10 <sup>3</sup>	10 <sup>6</sup>	10 <sup>9</sup>	10 <sup>12</sup>	10 <sup>15</sup>	10 <sup>18</sup>
キロ (k)	メガ (M)	ギガ (G)	テラ (T)	ペタ (P)	エクサ (E)
			1兆	100兆	100京



5

### Rough sketch for HDD



#### GMR, TMR Read Sensor

- ナノ厚多層膜 (~nm)
- ナノサイズ微細加工 (~30 nm)
- 半導体微細加工分解能
- ナノサイズ磁区制御
- ナノ秒 (GHz) 応答 & 高感度化
- 熱揺らぎ及びスピントルク雑音

#### Inductive Write Element

- High Bs (~2.5 T)
- ナノサイズ微細加工 (~40 nm)
- 半導体微細加工分解能
- ナノサイズ磁区制御
- ナノ秒 (GHz) 応答 & 高感度化

#### Head/Media Interface

- ナノスペーシング
- 保護 + 潤滑膜 < 10 nm
- 相対速度 ~ 60 m/s (2000 rpm)
- 潤滑剤及び保護膜長寿命化
- トライボケミカル反応抑制

#### Media

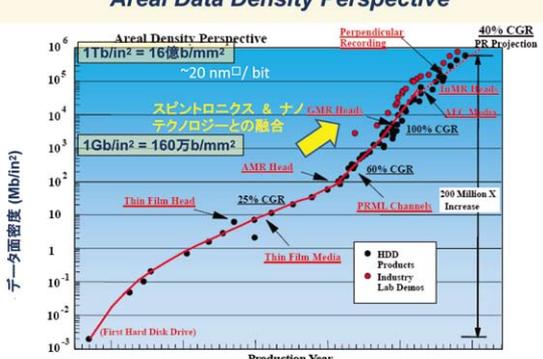
- Particle size < 8 nm
- 電子間交換結合 ~ 0 (相分離によるナノ組織制御)
- 結晶配向制御
- ナノ厚 ~ 10 nm
- 熱安定性 KV/T = 60
- ナノ秒 (GHz) 応答 & 高感度化

#### Substrate

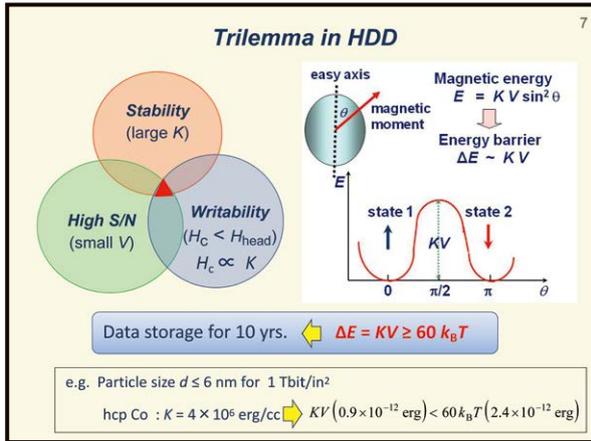
- 表面粗さ < 1 nm
- 低ランアウト
- 高弾性率 → 基板理手化

6

### Areal Data Density Perspective



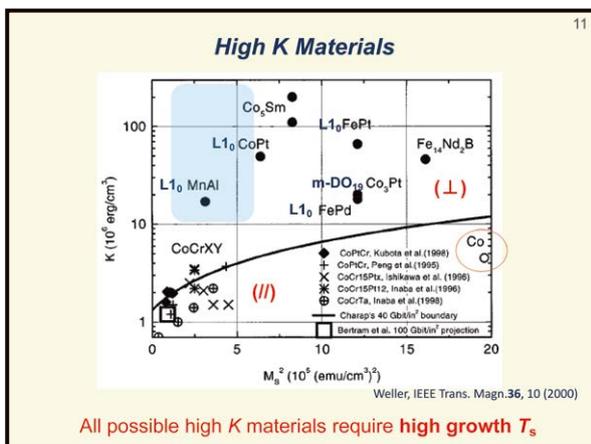
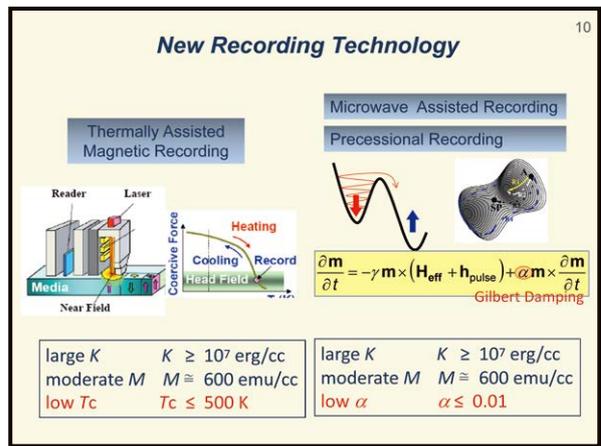
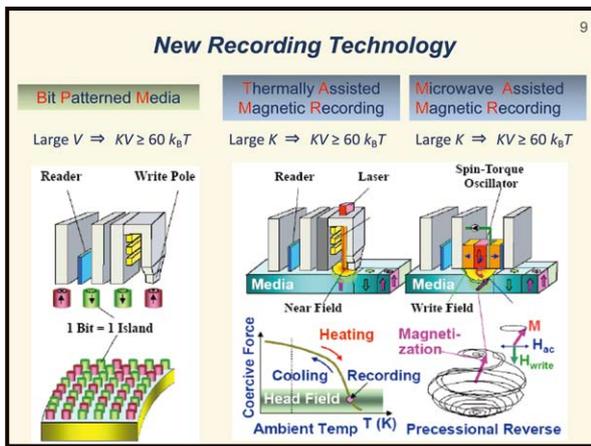
[ Western Digital 2011 ]



### Shingle 2Tb/in<sup>2</sup> Macrospec almost final

Outline	DSA / TFC	Channel	4K LDPC
BPI	2400	UD (T50/Tb)	1.15
TPI	860	Tot. 2TSN	12.1
Shingled TP	30	Med 2TSN	12.5
Erase band	5.0	Jitter-3 $\sigma$	4.2
Mag spacing	5.0	Nm ratio	90
sTMR-3 $\sigma$	3.6	Medium	Super ECC
Surface loss	2	Soft-layer	10
Head	Edge writer	Hard-layer	6.0
PhysWW	60	S/H coupling	10
Thrt. height	10	IML	1.0
Write gap	10	grain pitch	5.5
Field perp.	15	grain core	4.6
DT gradient	400	Hk-hard	90
CT gradient	400	Hco	13
MRW	18	SFD	5
Read gap	20	KuV/kT	60
Hd IsoSN	28.1	Hn-hard VSM	3.0?

SRC Biannual Technical Review    May-26, 2009    p8



- ### Contents
- Background  
Ultra High Density Recording  $\Rightarrow$  Trilemma
  - New Recording Schemes & New Materials  
What is required for magnetic materials?
  - Intuitive Picture of Magnetic Anisotropy  
What is difficult for controlling MAE?
  - Some Attempts toward Large MAE  
How do we understand the behavior of MAE?
  - Behavior of Single Nanomagnet
  - Summary

**Magnetic anisotropy** 13

Kanamori, Jisei (Baifu-kan, Tokyo, 1969)  
Morrish, Physical Principles of Magnetism (John Wiley & Sons, Inc., New York, 1965)

**Spin-Orbit coupling**

without SO coupling

SO coupling  
 $H_{LS} = \xi \mathbf{L} \cdot \mathbf{S}$   
 $\sim \text{meV}$

Orbital current

**Anisotropic exchange interaction (Spins can feel the crystal lattice !!)**

Spin rotation

Coulomb energy depends on the spin direction !!

**Magnetic anisotropy** 14

P. Bruno, PRB 39, 865 (1989)  
D. Wang et al. PRB 47, 14932 (1993)  
J. Stohr, JMMM 200, 470 (1999)

Due to spin orbit interaction

$$m_o^{\parallel} = \frac{\xi \mu_B}{2V_{\parallel}} \left( \frac{3}{R} + \frac{2}{R+1} \right)$$

$$m_o^{\perp} = \frac{\xi \mu_B}{2V_{\parallel}} 4, \quad R = V_{\perp}/V_{\parallel}$$

Magnetic anisotropy energy

$$\Delta E_{so} = \frac{\xi}{4\mu_B} (m_o^{\parallel} - m_o^{\perp}) = \frac{\xi^2}{8V_{\parallel}} \left( \frac{3}{R} + \frac{2}{R+1} - 4 \right)$$

Element of large atomic number Z (large  $\xi$ ) is indispensable for large MAE

**Contents** 15

1. Background  
*Ultra High Density Recording*  $\rightarrow$  *Trilemma*
2. New Recording Schemes & New Materials  
*What is required for magnetic materials?*
3. Intuitive Picture of Magnetic Anisotropy  
*What is difficult for controlling MAE?*
4. Some Attempts toward Large MAE  
*How do we understand the behavior of MAE?*
5. Behavior of Single Nanomagnet
6. Summary

**Can lattice deformation enhance MAE?** 16

Co<sub>99</sub>Pt<sub>1</sub>/Ru

Thickness of CoPt layer,  $\delta$  (nm)

Pure Co

Lattice constant ratio, c/a

Thickness of CoPt layer,  $\delta$  (nm)

Co-Pt

Lattice constant ratio, c/a

Shimatsu et al. J. Appl. Phys. 103, 07F524 (2008)

**Can lattice deformation enhance MAE?** 17

(Co<sub>90</sub>Cr<sub>10</sub>)<sub>80</sub>Pt<sub>20</sub>

Lattice constant ratio, c/a

$K_{u1} = e^2 S_{22} Z_c A / (4v) - (12/7) K_{u2}$

$K_{u2} = (35/18) e^2 S_{40} (3A^2 - Z_c D) / v$

$e$ : the electron charge  
 $Z_c$ : the effective charge on an ion core  
 $v$ : the atomic volume  
 $A$  and  $D$ : effective multipole moments due to the spin-orbit coupling defined by Carr.

W. J. Carr, JR., Phys. Rev., 108, 1158 (1957).

Lattice sums for hcp ( $\gamma=c/a$ )

$S_{22} = 0.00507 - 5.42(\gamma - 1.633)/1.633$

$S_{40} = 0.33815 + 2.9594(\gamma - 1.633)/1.633$

L. W. McKeehan, Phys. Rev., 52, 18 (1937),  
F. Ono, J. Phys. Soc. Jpn., 50, 2564 (1981).

hcp-Co

Lattice constant ratio, c/a

Classical single ion anisotropy model & first principles calculations can explain experiments qualitatively but not quantitatively.

J. Appl. Phys. 103, 07F524 (2008)

**Can valence electron number enhance MAE?** 18

c/a

Concentration X

a-axis (Å)

Concentration X

$E(\theta) = -\frac{1}{2}(K_1 + K_2) \cos 2\theta + \frac{1}{8} K_2 \cos 4\theta$

$= -A_2 \cos 2\theta + A_4 \cos 4\theta$

for  $n < 9$

for  $n = 9$

Why?

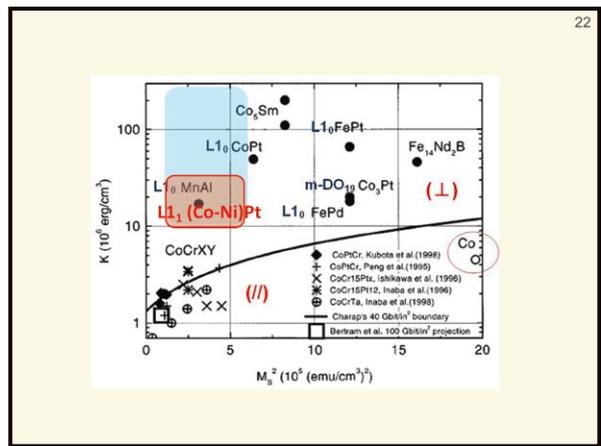
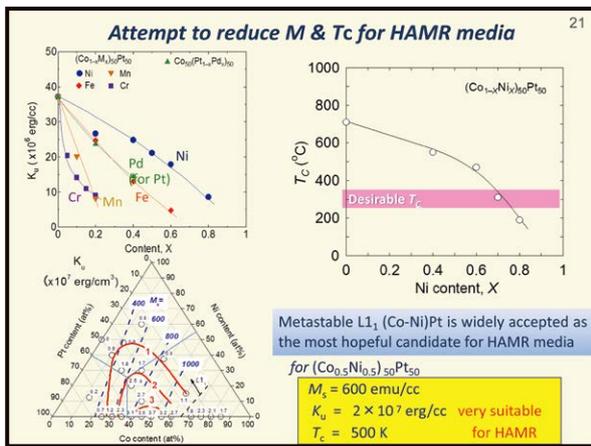
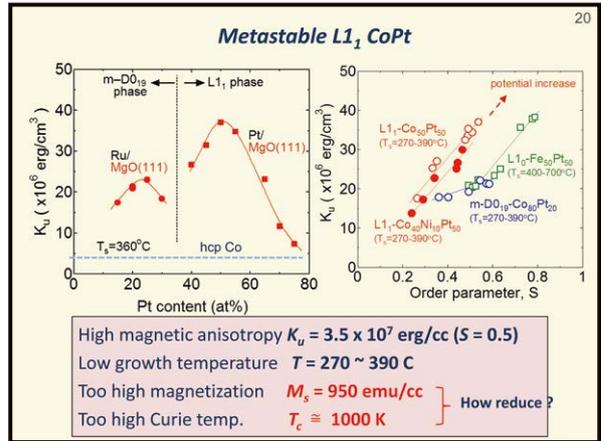
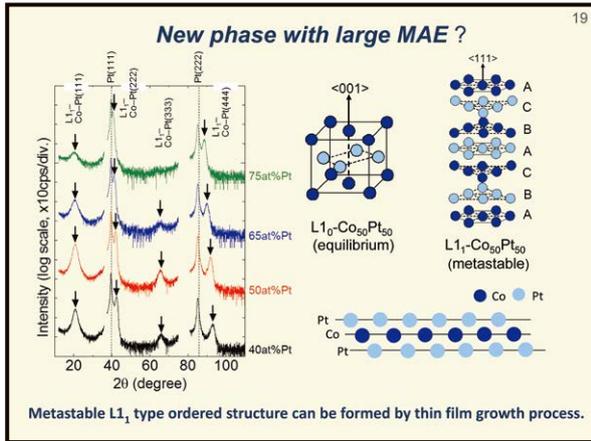
2-fold symmetry component  $A_2$  ( $\times 10^5$  erg/cm<sup>3</sup>)

Number of valence electrons of 5d elements

4-fold symmetry component  $A_4$  ( $\times 10^5$  erg/cm<sup>3</sup>)

Number of valence electrons of 5d elements

J. Phys.: Condens. Matter 11, L485 (1999)



### Summary

It is found that the MAE is crucially enhanced by **lattice deformation, unit cell volume, valence electrons**, and so on. For further improvement (or enhancement) of MAE, more quantitative & deeper understanding on MAE is indispensable.

More intensive first principles and XMCD studies will promote and deepen our understanding on MAE of magnetic materials.