

# 光磁気における磁気増幅再生技術将来展望

栗野博之

書き換え型光ディスクの記録密度は、記録および再生に用いる光スポットサイズで制限される。したがって、レーザー光の短波長化あるいは対物レンズの高NA化による高密度光ディスクの研究が盛んに行われている。しかし、光磁気記録(MO)の場合には、他の光ディスクとは違って、光スポットを小さくしたあとでさらに高密度化が可能である。すなわち、垂直磁気記録や磁気超解像再生あるいは磁気増幅再生といったさらなる高密度化技術が控えている。

一方、記録に要する磁化反転時間は1 ns程度と通常の光ディスクよりも圧倒的に早い。したがって、高転送レート実現が可能である。このような背景から、MOは高密度、高転送レート光ディスクとしてきわめて有利なポジションにある。ここでは、上述したMO高密度化要素技術である磁気増幅再生技術を中心に解説する。また、MOでは、体積記録への展開も提案されている。すなわち、磁性層が薄い場合には、光の干渉効果を利用した多層記録、あるいは多値記録も可能である。通常、多層記録は文字通り、各層を十分離して製膜し、焦点位置を変えて記録再生する方法であるが、MOの場合にはこの波形干渉を利用して、同一焦点内に多層記録することが可能である。このほか、2種類の波長を用いて各層を独立に再生する波長多重再生も可能である。このようにMOには多数の高密度化要素技術が存在している。

## 1. 光熱垂直磁気記録技術

通常、光ディスクにデータを記録する場合には、データ列にしたがって記録光強度を変調する。記録マーク形状は

円形である。したがって、微小マークは筆先記録になるため、安定記録が困難になる<sup>3)</sup>。しかし、MOの場合には、光の筆の太い部分で垂直磁気記録(データ列を記録磁界の極性で変調して記録する方法)を行うため、微小磁区記録が容易に行える。このようにMOの記録スピードは熱ではなく磁界変調の速さで決まるため、高速転送も可能になる。光変調記録と磁界変調記録の原理を図1に示した。磁界変調記録では、磁界極性反転による記録磁区境界部の乱れが記録ノイズを増大する。そこで、これを回避するために、記録磁区境界部付近で光照射をカットする光パルス磁界変調記録<sup>1-3)</sup>が提案され、現在では磁界変調記録の主流になっている。

## 2. 磁気超解像再生技術

通常の光ディスクでは、再生可能なマークサイズは光スポット径の約半分である。しかし、光パルス磁界変調記録により高密度記録された磁区は、光スポット内に複数存在することになるため、これを再生することはできない。しかし、MOの場合には、磁気的に超解像効果を起こしてこの高密度記録磁区を再生することができる。これを磁気超解像(MSR: magnetic super resolution)と呼ぶ。例えば、図2に示したように、記録層の光入射側に新たに磁気超解像用再生層を設け、光スポット内にレーザー光照射による温度差を作る。光スポット内低温部分では再生層の磁化は面内を向いており記録層の磁区は再生層に磁気転写できない。しかし、再生層の高温部分では磁化は垂直を向くようになり、記録層の磁区を転写できるようになる。すなわち、実効的な開口部(アパーチャー)を狭くできることから磁気超解像と呼ばれている<sup>4,5)</sup>。これにより赤色レーザーと対物レンズの開口数(NA)0.55の光学ヘッドで、0.2 μmの微小磁区再生が報告されている<sup>6)</sup>。

日立マクセル(株)筑波研究所(〒300-2496 茨城県筑波郡谷和原村綱の台6-20-1)  
E-mail: hiroyuki-awano@maxell.co.jp

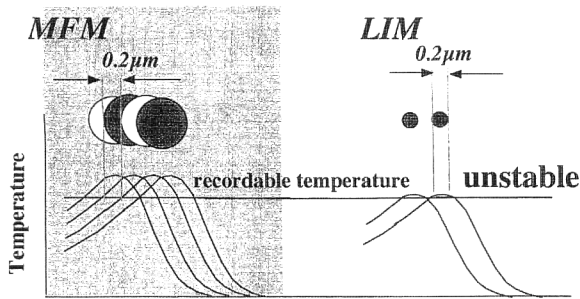


図1 光強度変調記録 (LIM) と光熱垂直磁気記録 (MFM) の記録原理図。

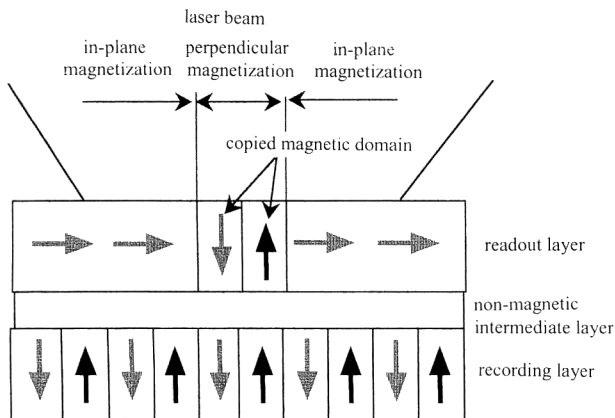


図2 磁気超解像 (MSR) 再生原理図。

### 3. AS-MO

この磁界変調記録技術と磁気超解像技術 (MSR) を用いて、日米欧の MO メーカーが集まって面記録密度約 5 Gb/in<sup>2</sup> の MO (advanced storage MO: AS-MO<sup>7,8)</sup> 規格を策定した。これくらいの面記録密度になると、CD サイズ片面で 6 GB の記憶が可能になり、動画圧縮技術 MPEGII を用いて 2 時間強 (135 分) の高画質動画記録再生も可能になる。デジタルカメラ用 MO ディスク (iD photo<sup>9)</sup>) もこの技術を使っている。

### 4. 磁気増幅再生技術

MSR では再生分解能を高めることはできるが、磁界変調で書かれた磁区をすべて再生できるわけではない。すなわち光スポットに対して記録磁区サイズが小さすぎて十分な再生信号量を得ることができないためである。この問題を克服する手段が磁気増幅再生である。図 3 にその概念図を示した。磁気増幅再生には、図 4 に示したようなさまざまなタイプがある<sup>10-23)</sup>。どれも記録層と拡大再生層で構成されていることがわかる。一例として、図 5 に磁気増幅再生技術 (magnetic amplifying magneto-optical system: MAMMOS) の概念図を示した。上図には、情報記録層に光のスポット径よりも小さな磁区 (0.1~0.3 μm) が記

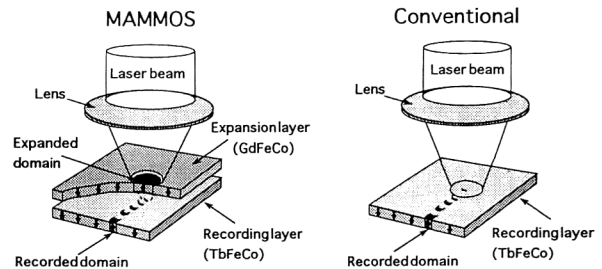


図3 磁気増幅再生技術原理図。

Type	A	B	C	D	E	F
Drive	RF Pr	RF Hr	Conventional			
Media	R	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓
	I	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓
W	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓
From	Maxell	Maxell Sanyo	Maxell Sanyo	Canon	Tosoh	Sanyo Maxell
C/N	—	50 (0.2)	30(0.125)	40 (0.1)	47 (0.5)	—
Laser : 680nm	—	50 (0.4)	39 (0.2)	42.5 (0.2)	—	—
NA : 0.55	—	—	—	—	—	—
Readout field (Hr)	—	± 200	+80	- 0	-110	- 0
Readout power (Pr)	1.5 ~ 3.5	2.0	1.2	1.6	3.4	2.4
Recording area	L/G	L/G	L/G	L	L/G	L/G

図4 さまざまな磁気増幅再生技術。

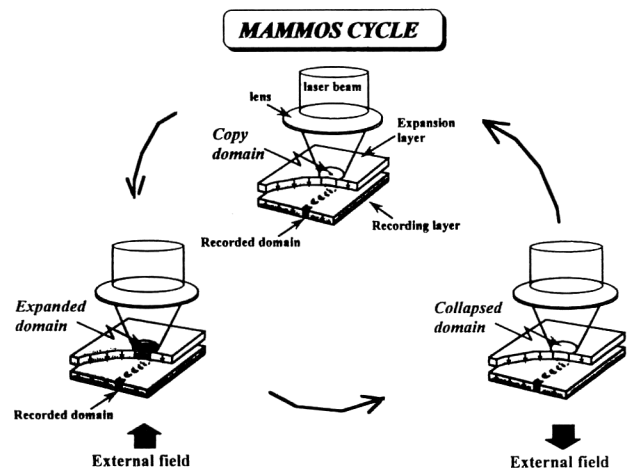


図5 MAMMOS 再生原理図。

録されている状態を示した。この部分に光ビームを照射して局部的に加熱すると、ある温度以上の領域で情報記録層の磁区 1 個だけが拡大再生層に磁気転写できる。このとき、左下図のように転写磁区を広げる方向に外部磁界を与えると、転写磁区の拡大に比例して再生信号振幅が増大する。拡大磁区が光スポットいっぱい広がった状態が飽和信号となる。

しかし、この状態のままでは次の磁区の有無が判別できない。そこで、この拡大した磁区を再生するやいなや右下図のように外部磁界の極性を反転して拡大磁区を収縮、消滅させる。これを繰り返すことで順次記録磁区を拡大再生

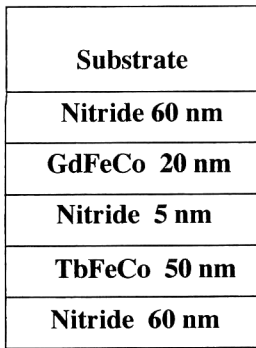


図6 MAMMOS ディスク構造.

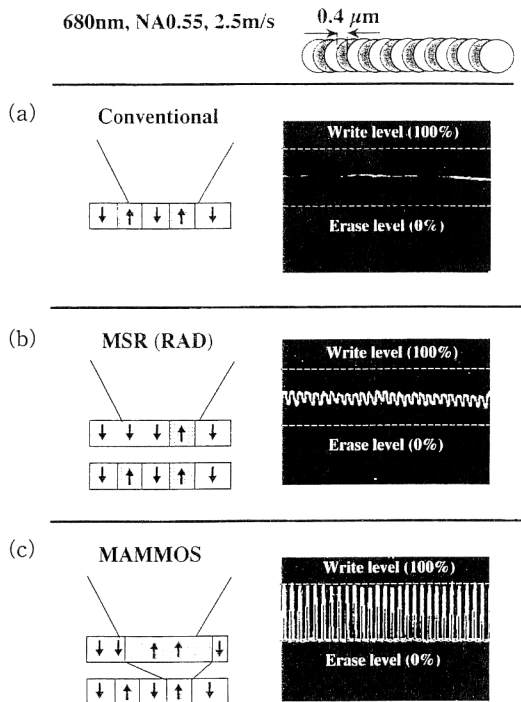


図7 (a) 通常ディスク, (b) MSR (RAD), (c) MAMMOS の再生信号例 (0.4 μm 最密記録磁区), 波長 680 nm, 対物レンズの NA は 0.55, 光のスポットサイズは約 1.2 μm.

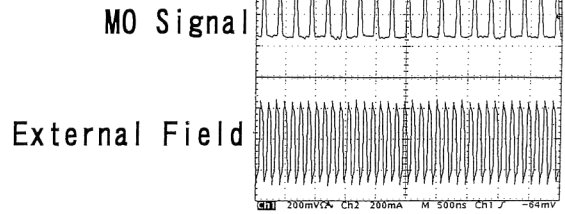
することが可能になる。情報記録層の保磁力は外部磁界 (数百 Oe) よりも 2 桁大きいので、データ破壊することはない。

このように、再生時に印加する外部磁界を記録のクロックに同期して単一周波数で交番することにより、このような磁区拡大再生が可能になる。再生交番磁界も単一周波数で駆動する共振回路を用いることで、信号処理速度を高めることができる。クロックはディスクにあらかじめ埋め込んであるため、クロック精度よい再生が可能になる。

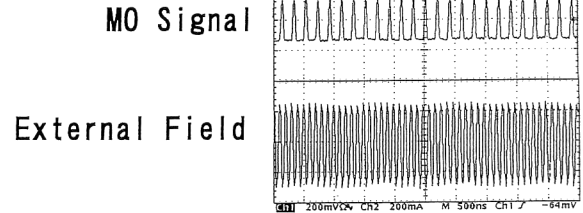
## 5. 磁気増幅再生実験方法および実験結果

図6に、従来媒体と今回実験に用いた MAMMOS ディ

0.20 μm



0.15 μm



0.12 μm

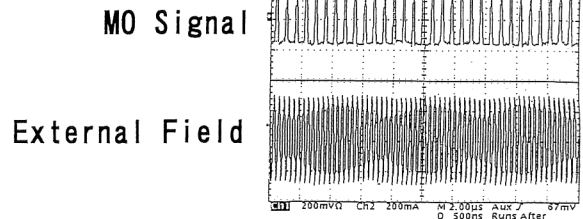


図8 0.20~0.12 μm 最密微小磁区再生波形。波長は 680 nm, 対物レンズの NA は 0.55, スポットサイズは約 1.2 μm.

スクの構成を示した。情報記録膜には現行 MO ディスクでも高い信頼性の得られている TbFeCo を用い、拡大再生層には垂直磁化膜で保磁力の小さな GdFeCo を用いた。情報記録層および拡大再生層は非磁性層を介して静磁的に結合する構造とした。

記録再生装置の波長は 680 nm, NA は 0.55, このときの光スポット径は約 1.2 μm である。用いたポリカーボネイト基板のランド幅, グループ幅はほぼ同等で, その幅は 0.40~0.60 μm である。面白いことに MAMMOS では再生信号はどの溝幅でも光スポットいっぱい磁区が転写拡大し, それはランド, グループどちらにおいても同様である。

図7には、通常ディスク、磁気超解像 (MSR-RAD) ディスク、MAMMOS ディスクにおける 0.4 μm 最密磁区を光パルス磁界変調記録したときの再生波形を示す。この最密記録パターンは光スポット径の半分以下、すなわち回折限界を超えているため、通常ディスクでは、わずかな再生信号振幅しか得られない。しかし、MSR ディスクでは

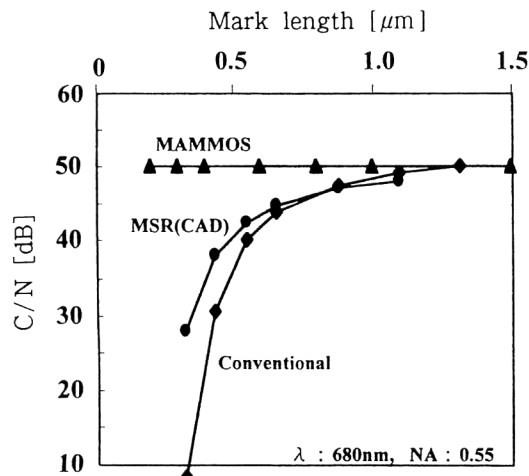


図9 MAMMOS ディスクにおける C/N のマーク長依存性。波長 680 nm, 対物レンズの NA 0.55, スポットサイズ約 1.2  $\mu\text{m}$ 。

再生分解能が向上した分だけクリアな再生信号が得られている。ただし、信号強度は飽和振幅の 4 分の 1 程度である。ところが、MAMMOS ディスクではすべての記録磁区が最大信号レベルにまで拡大している。また、記録磁区間には同じ長さのスペースがあり、この部分にも拡大再生磁界を印加したが再生信号は現れない。すなわち、記録磁区が存在している場合には最大信号を示し、記録磁区がない状態では信号は現れない。

次に、MAMMOS の再生分解能を調べるために 0.20, 0.15, 0.12  $\mu\text{m}$  最密記録磁区の再生波形を図 8 に示した。どのマーク長でもすべての磁区が拡大再生できており、再生信号強度はすべて最大信号振幅になっている。この信号品質を調べるため、信号対雑音比 (C/N) の記録マーク長依存性を測定した。結果を図 9 に示した。どのマーク長でも C/N は 50 dB<sup>14)</sup> であり、MAMMOS の再生信号品質のよさを示している。

この再生波形をみてわかるように再生信号の立ち上がり、立ち下がりはいきわめて速い。ジッターの値も 3% 程度ときわめて小さい。

そこで、MAMMOS 現象について調べるために、ランダウ・リフシッツ・ギルバート (LLG) の式を用いたマイクロマグネティクスコンピューターシミュレーションを行った<sup>11)</sup>。結果を図 10 に示す。初期値は再生層のスピンをすべて下向きにしてある。さて、124°C では時間が経過しても再生層に何ら反転現象をみることはできなかったが、130°C になるとわずか 1 ns 程度で拡大する。

## 6. 光磁気ディスクの磁気増幅再生技術に対する将来展望

現行 DVD パラメーター (波長 650 nm, NA 0.60) に

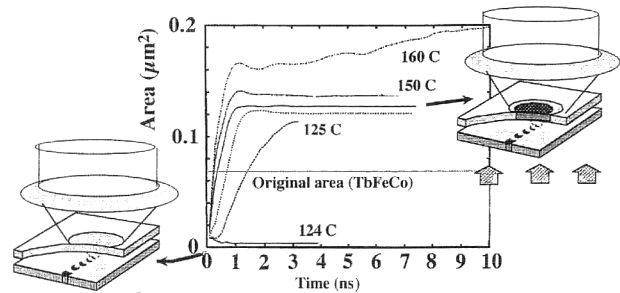


図 10 MAMMOS の磁区拡大現象コンピューターシミュレーション。

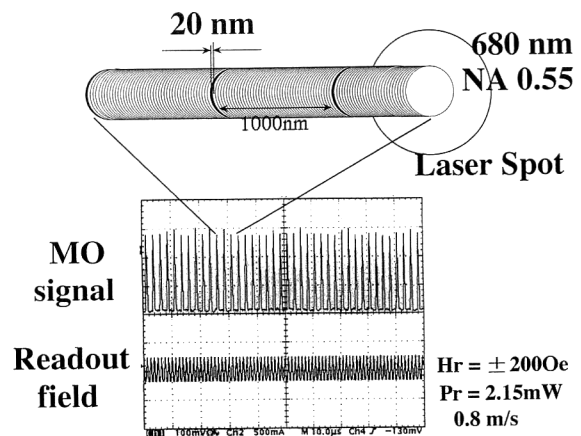


図 11 MAMMOS ディスクでの 0.02  $\mu\text{m}$  (20 nm) 孤立磁区の再生波形。

における MAMMOS の再生可能な最密記録磁区長は 0.10  $\mu\text{m}$  だったので、これを青色レーザー、NA 0.85, あるいは NA 1.4 でスケールングしてみると、最短マーク長は 20~30 nm となる。そこで、20 nm の孤立磁区記録を波長 680 nm, NA 0.55 の光学系で試みてみた。図 11 にはその再生波形を示した。どの 20 nm 相当の長さの磁区も飽和値に達していることがわかる<sup>22)</sup>。さらに、この微小磁区に対して再生加速試験を行った結果、良好な再生耐久性を示す結果が得られた<sup>23)</sup>。したがって、必要十分な結果ではないが、磁気増幅再生方式の将来展開として 100 Gbit/in<sup>2</sup> を大幅に超える微小記録磁区記録再生の可能性が期待される。また、MAMMOS は信号強度が十分に大きいので、多値記録<sup>24)</sup>、波長多重記録<sup>25)</sup> への展開も期待される。

昨今のハードディスクの記録密度向上にはめざましいものがある。しかし、記録材料の微結晶サイズが室温付近で磁性を失うサイズ (スーパーパラマグネティズム) に近づいており、このままでは記録密度向上にブレーキがかかることが懸念されている。実は、現行 MO 材料はこのスーパーパラマグネティズムの問題解決の一候補と考えられている。実際、富士通では TbFeCo を純粋磁気記録再生した結果、450 kFCI (最短マーク長 56 nm) まで記録し、

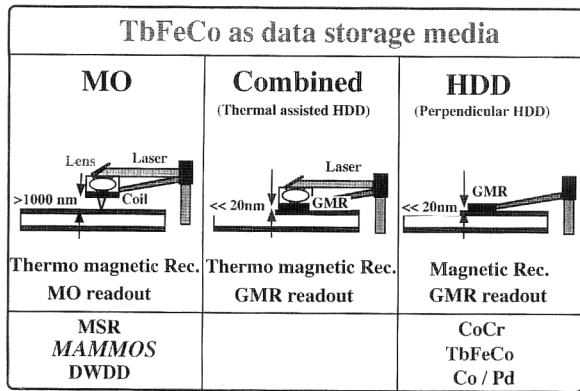


図12 磁気増幅再生技術の将来進展予想。

GMRヘッドでこれを再生した結果が報告<sup>26)</sup>されている。一方、記録は光磁気で、再生はGMR再生といったハイブリッドメディアの研究も盛んになりつつある<sup>27,28)</sup>。一般にNAの増加とともに基板厚みは薄くなり、対物レンズ近傍に再生層が存在するようになる。したがって、コイルを小さくして対物レンズ側に配置することが可能になる。こうなると磁気ヘッドのいっそうの高速駆動が可能になる。高転送レートとしては180 Mbit/sの報告もなされている<sup>29)</sup>。以上の内容を図12にまとめた。この図からわかるように浮上ヘッドとディスクとの距離はMOの場合のほうが圧倒的に高く、信頼性の面で有利であるといえる。最近、半導体青色レーザーも入手しやすくなっていることから、青色での評価および高NAレンズを用いた研究が盛んになってきており、MSR<sup>30)</sup>、MAMOS<sup>31)</sup>、DWDD<sup>32)</sup>の結果が報告されている。

光磁気の高密度化の一手法として期待の高い磁気増幅再生技術について概観した。MOでは、光記録以外に垂直磁気記録も行うことができ、筆先記録を回避した微小磁区形成が可能となる。再生においても磁気増幅再生技術を利用することで、光の回折限界による再生限界を打ち破り、かつ、小さなMO信号を増幅再生することができる。結果として、現行光ヘッドによる光スポット径の10分の1の微小磁区が記録再生可能である。これらの記録再生技術は、青色半導体レーザー、高NAレンズ光学系にも適用可能でよりいっそうの高密度化を可能にする。これらの技術を駆使することで、CDサイズ片面に100GB以上のデ

ータを保存できる時代が数年後にも実現することであろう。

## 文 献

- 1) T. Watanabe, *et al.*: *Proc. Symp. Opt. Mem.* (1988) p. 47.
- 2) K. Kataoka, *et al.*: *Proc. Symp. Opt. Mem.* (1988) p. 53.
- 3) T. Kohashi, *et al.*: *J. Magn. Soc. Jpn.*, **21**, Suppl. (1997) MT3.
- 4) K. Aratani, *et al.*: *Proc. SPIE*, **1499** (1991) 209.
- 5) Y. Murakami *et al.*: *J. Magn. Soc. Jpn.*, **17**, Suppl. (1993) 201.
- 6) M. Birukawa, *et al.*: *J. Magn. Soc. Jpn.*, **20**, Suppl. (1996) 103.
- 7) K. Torazawa, *et al.*: *ISOM&ODS Postdeadline Papers*, OTuA1-2 (1996).
- 8) J. Kwinchen, *et al.*: *Digest for ODS '97* (1997).
- 9) K. Shimazaki, *et al.*: *Digest of ODS 2000* (2000) WB1.
- 10) H. Awano, *et al.*: *Appl. Phys. Lett.*, **69** (1996) 4257.
- 11) N. Hayashi, *et al.*: *J. Magn. Soc. Jpn.*, **23** (1999) 151.
- 12) A. Yamaguchi, *et al.*: *IEEE Trans. Mag.*, **33** (1997) 3217.
- 13) H. Awano, *et al.*: *Proc. SPIE*, **3109** (1997) 83.
- 14) N. Takagi, *et al.*: *Digest for J. of MORIS/ISOM '97* (1997) p. 36.
- 15) K. Takahashi, *et al.*: *Digest for J. of MORIS/ISOM '97* (1997) p. 40.
- 16) K. Shimazaki, *et al.*: *Digest for J. of MORIS/ISOM '97* (1997) p. 42.
- 17) H. Awano, *et al.*: *Digest for J. of MORIS/ISOM '97* (1997) p. 262.
- 18) N. Takagi, *et al.*: *J. of INTERMAG/MMM '98 Digest*, GE-07 (1997).
- 19) H. Awano, *et al.*: *J. of INTERMAG/MMM '98 Digest*, GE-08 (1998).
- 20) K. Shimazaki, *et al.*: *J. of INTERMAG/MMM '98 Digest*, GE-10 (1998).
- 21) T. Shiratori, *et al.*: *Digest for J. of MORIS/ISOM '97* (1997) p. 38.
- 22) H. Awano, *et al.*: *Jpn. J. Appl. Phys.*, **39** (2000) 725-728.
- 23) H. Awano, *et al.*: *Digest of INTERMAG 2000*, HA03 (2000).
- 24) K. Shimazaki, *et al.*: *J. Magn. Soc. Jpn.*, **19** (1995) 429.
- 25) K. Nakagawa, *et al.*: *Digest of ODS 2000*, TuC5 (2000).
- 26) K. Matsumoto, *et al.*: *Digest of INTERMAG 2000*, HA04 (2000).
- 27) H. Saga, *et al.*: *J. Magn. Soc. Jpn.*, **23** (1999) 225.
- 28) H. Katayama, *et al.*: *J. Magn. Soc. Jpn.*, **23**, (1999) 233.
- 29) W. D. Huber, *et al.*: *Digest of ODS 2000*, P10 (2000).
- 30) M. Shinoda, *et al.*: *Digest of ODS 2000*, TuC4 (2000).
- 31) A. Itoh: *Digest of ODS 2000*, TuC2 (2000).
- 32) T. Sakamoto, *et al.*: *Digest of ODS 2000*, TuC3 (2000).

(2000年7月29日受理)