

微細磁区観察のためのコロイド-SEM法

後 藤 公 美

山形大学工学部 〒992 米沢市城南 4-3-16

(1992年8月26日受理)

Colloid-SEM Method for Observations of Fine Magnetic Domains

Kimiyoshi Goro

Department of Basic Technology, Faculty of Engineering, Yamagata University
4-3-16 Jonan, Yonezawa, Yamagata 992

(Received August 26, 1992)

光学顕微鏡を用いる磁区観察の分解能より優れた分解能をもつ観察法として、従来の粉末磁区図形（ビッター図形）を乾燥して走査電子顕微鏡（SEM）により観察する方法を考案し、コロイド-SEM法と名付けた。本方法は磁性体に付着した Fe_3O_4 微粉末を媒介とするものであるが、コロイド溶液の損傷により200nm程度の磁区観察の分解能をもつ。この方法を用いて、結晶磁気異方性の大きな硬質磁性材料 $\text{BaO} \cdot 6\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 MnBi 化合物、 Sm-Co 系化合物、 $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 化合物などについて単磁区微粒子像を初めて明らかにし、代表的な観察例を示した。さらにそれらの単磁区微粒子臨界直径の実測結果も示した。また、垂直磁気記録材料であるCo-24 wt% Cr薄膜に記録した高密度磁気記録の観察にこの方法を適用した結果、記録図形の細部まで観察が可能となり、記録密度50 kBPIおよび100 kBPIの場合の観察例を示した。

1. 緒 言

物体の性質を可視化することは、その奥にひそむ現象の洞察や理論形成上もきわめて重要なことである。強磁性体の磁区を眼で見る——磁区観察は、磁区が美しいことのほかにこのような意味から多くの人々の注目を引き、古くから研究が行われてきた。その中で、Williams, Bozorth および Shockley¹⁾によるFe-Si単結晶の粉末磁区図形法による磁区観察の成功は、歴史に残る見事なものであった。以来、この粉末磁区図形法（ビッター図形法ともいう）を中心として光学顕微鏡、透過電子顕微鏡などを用いる種々の方法が考案され、磁区研究が行われてきた^{2,3)}。しかしながら、近年は物質のきわめて微小な部分や微粒子、超微粒子などの磁区観察が望まれ、ミクロン・サブミクロン領域の磁氣的挙動の解明が重要視されている。これは、より高度な磁性材料への発展と未知の磁氣的性質解明のためである。このような要求から、電子線ホログラフィ法⁴⁾、スピン-SEM法⁵⁾など電子線の干渉や2次電子線の特殊な検出法を用いた磁区観察法が開発され、多くの成果を生み出しつつあ

る。これらの方法は磁区図形に対し、100nmあるいはそれ以下の分解能をもつ観察法であるが、装置の特殊化、高級化を必要とし、通常の研究者には容易に利用できないのが現状である。

著者らは約15年ほど以前になるが、国産の走査電子顕微鏡（SEM）の高性能化に着目し、乾燥した粉末磁区図形をSEMの凹凸像として観察することにより、分解能の向上を期待して研究を始めた。以来、この方法をコロイド-SEM法^{6,7)}と略称し、主に硬質磁性体微粒子や磁気記録に適用してその改善を図ってきた。この方法は他の微細磁区観察法に比較して、(1)実験技術が容易なこと、(2)SEMに改造を加えないで使用できること、(3)バルク、薄膜、微粒子などの試料に適用できることなどが特徴である。

2. コロイド-SEM法

2.1 実験方法

コロイド-SEM法は、磁性コロイド溶液を用いて粉末磁区図形を作り、それを乾燥するまでの過程と、この乾燥磁区図形をSEMの2次電子モード（凹凸像モード）

により観察する過程とからなっている。

まず準備された試料表面（研磨面，劈開面，作製面，焼結面など）にマグネタイト（ Fe_3O_4 ）コロイド溶液を滴下して，表面固有の磁区図形を形成させる。つぎに，この試料表面を適当に傾けつつエタノールを滴下して余分なコロイド溶液を洗い流すと，乾燥した粉末磁区図形が得られる。ここまでの操作は，約100倍以上の倍率で光学顕微鏡下で観察しながら行う。乾燥を完全にするためと SEM の機能を低下させないために，この試料を 10^{-3} Pa 程度の真空中に引き数時間脱ガスを行った後，SEM により試料表面の磁区図形を観察する。試料が絶縁体のときは，SEM の電子照射による帯電を防ぐために，Au，Alなどを磁区図形上にスパッターして薄い金属薄膜を作製してから観察する。磁界中の磁区図形を観察する場合は，コロイド溶液の滴下と乾燥を，目的とする磁界中において行い，乾燥が完了したことを光学顕微鏡により確かめてから，試料を磁界から取り出して脱ガス以後の過程を行う。目的の磁界中で乾燥された粉末磁区図形は，試料表面に固着され，試料をこの磁界から取り出して，その磁化状態が変化しても変わらないことが確認されている。

使用する SEM としては一般に用いられている熱電子放射型でよいが，低加速電圧の場合，電子レンズの漏洩磁界により試料が着磁され（粉末磁区図形は不変），照射電子線が乱される場合がある。このようなときは観察面積を $1/2 \sim 1/3$ に減らすことが有効である。一般的には試料位置での漏洩磁界の小さな電解放射型 SEM が望ましい。著者らは通常は日立 S-310 卓上型 SEM を使用している。その性能は分解能 10nm，加速電圧 4~6kV，拡大倍率 $\times 50 \sim \times 45000$ であり，磁区図形の分解能としては約 200nm を得ている。

2.2 磁性コロイドの改善

磁区図形を形成させる磁性コロイド溶液としては，従来使用されてきた光学顕微鏡観察用の溶液³⁾や水ベースの磁性流体⁹⁾でよいが，より分解能を上げるため主に結晶磁気異方性の大きな強磁性体を対象として，著者らは本方法に適するように改良を行った⁹⁾。その結果を Table 1, 2 に示す。まず Fe_3O_4 微粉末を Table 1 に示した A 液，B 液を用いる共沈法により作製する。この際，磁界中で共沈させると Fe_3O_4 微粉末集合体の磁気モーメントが増加するので，約 200 kA/m の磁界中共沈を行う。この反応により作製された Fe_3O_4 微粉末の個々の粒度は，透過電子顕微鏡測定により 6~16 nm 程度であるが，数個の粒子が磁氣的に吸引し合って 1 個の集団として挙動し，磁区図形のコントラストを良くする原因となっている。商用の磁性流体を使用した場合は，

Table 1 Preparation of Fe_3O_4 powders.

Solution A	$(\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O } 1.54 \times 10^{-3} \text{ kg})$ $+(\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O } 3.0 \times 10^{-3} \text{ kg})$ $\div (\text{Distilled water } 150 \times 10^{-6} \text{ m}^3)$
" B	$(\text{NaOH } 2.5 \times 10^{-3} \text{ kg})$ $+(\text{Distilled water } 50 \times 10^{-6} \text{ m}^3)$

All chemicals: special grade.

Table 2 Fe_3O_4 colloidal solutions suitable for the colloid-SEM method.

Colloid A	Fe_3O_4 slurry $0.6 \sim 0.9 \times 10^{-3} \text{ kg}$, Sodium oleate $0.02 \times 10^{-3} \text{ kg}$, Driwel* $1.0 \sim 1.5 \times 10^{-6} \text{ m}^3$, Distilled water $30 \times 10^{-6} \text{ m}^3$
" B	Fe_3O_4 slurry $0.6 \sim 0.9 \times 10^{-3} \text{ kg}$, Sodium stearate $0.1 \times 10^{-3} \text{ kg}$, Driwel* $1.0 \sim 1.5 \times 10^{-6} \text{ m}^3$, Distilled water $30 \times 10^{-6} \text{ m}^3$
" C	Fe_3O_4 slurry $0.6 \sim 0.9 \times 10^{-3} \text{ kg}$, Sodium laurylbenzenesulfonate $0.1 \times 10^{-3} \text{ kg}$, Distilled water $30 \times 10^{-6} \text{ m}^3$
" D	Fe_3O_4 slurry $1.0 \sim 1.2 \times 10^{-3} \text{ kg}$, Powder soap** $0.1 \times 10^{-3} \text{ kg}$, Driwel* $1.0 \sim 1.5 \times 10^{-6} \text{ m}^3$, Distilled water $30 \times 10^{-6} \text{ m}^3$
" A'	Fe_3O_4 slurry $0.6 \times 10^{-3} \text{ kg}$, Sodium oleate $0.02 \times 10^{-3} \text{ kg}$, Distilled water $30 \times 10^{-6} \text{ m}^3$

* Driwel: Fuji Photo Film Co. Ltd.

** Powder soap: "Rinso", Extra-soapy, R.S. Hudson Ltd., London.

Fe_3O_4 微粉末の分散が良すぎるため磁区図形のコントラストが低下する傾向を示す。

作製した Fe_3O_4 微粉末スラリーに，蒸留水，界面活性剤などを加えてコロイド溶液とする。コロイド-SEM 法に適した溶液 A, B, ..., A' の 5 種類を Table 2 に示してあるが， Fe_3O_4 微粉末およびコロイド溶液作製の際に使用するガラス器具などのすべてを，正しい洗浄法によって注意深く洗浄すること⁹⁾が重要と思われる。著者らの経験によれば，この洗浄操作を忠実にやるか否かが，完成したコロイド溶液の使用壽命を左右する。

3. 本方法を適用した例

3.1 単磁区微粒子の存在とその臨界直径の測定

強磁性体はその試料寸法を減少させて微細化すると，試料（微粒子）内ではエネルギー的に磁壁の存在が困難となり，微粒子全体が磁壁のない単一磁区となることが古くから理論的に計算されている^{10,11)}。このような微粒子は単磁区微粒子といわれ，その微粒子直径の最大値

D_c (臨界直径または臨界寸法) は一軸結晶磁気異方性をもち場合、

$$D_c = 9\sigma_w / 2\pi M_s^2 \quad (1)$$

によって計算される¹¹⁾。ここに σ_w , M_s はそれぞれ 180° 磁壁エネルギー、飽和磁化である。すなわち D_c 以下の微粒子はすべて単磁区を示し、 D_c 以上では2磁区を示すことが期待される。 D_c の値は磁性体の種類により変化するが、数 μm ~ 数十 nm の大きさと計算されている。実験的には微粒子集合体の保磁力の粒度依存性を測定し、保磁力が極大値を示すことから単磁区微粒子の存在が肯定され、またこの極大値を示す粒度が D_c であるとされてきた。粒子1個が単磁区であれば、当然磁区観察法によりそれが確認されるべきであるが、数 μm 以下の個々の微粒子に対する磁区観察は実験技術的に困難が多く、見るべき成果は得られなかった。

著者らはコロイド-SEM法により、この問題の解決を目指して実験を行ってきた。(1)式により比較的大きな D_c が期待される種々の強磁性体を試料とし、観察面の工夫や磁性コロイド溶液の改善などにも努力した。その結果、試みたすべての強磁性体について単磁区状態の磁区観察に成功し、またそれらの臨界直径 D_c の実測も行うことができた¹²⁾。研究対象とした強磁性体は $\text{BaO} \cdot 6\text{Fe}_2\text{O}_3$ ^{13,14)}, MnBi ^{15,16)}, Sm-Co 系化合物^{17,18)}, $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ ¹⁹⁾ などである。以下にはこれらの中から代表的な観察例を示そう。

コロイド-SEM法では粉末磁区図形の凹凸像を観察するのであるから、 Fe_3O_4 微粉末の集積 (磁壁や磁極をもつ表面) が白色に示されることが特徴である。Fig. 1 はフェライト磁石として多くの電子機器に使用されてい

るバリウムフェライト ($\text{BaO} \cdot 6\text{Fe}_2\text{O}_3$) 焼結面上の微粒子の磁区図形である。Fig. 1(a), (b) に見られるように、各微粒子は比較的整った六角形の表面をもっている。この表面は六方晶系の C 面であることがX線回折によってわかっており、また磁化容易軸は Fig. 1 の説明図に示したように、この表面に垂直である。各微粒子の最大の C 面の平均直径を D として図に示した。Fig. 1(a) の中央の大きな粒子 ($D=8.4\mu\text{m}$) では、湾曲してはいるが3本の白色の磁壁が見られるから4磁区粒子である。Fig. 1(b) では $D=2.3\mu\text{m}$ と粒子が小さいために磁壁が消失し、 Fe_3O_4 微粉末が表面のほぼ全面に付着して単磁区微粒子であることを示している。空間にはほぼ孤立した $\text{BaO} \cdot 6\text{Fe}_2\text{O}_3$ 微粒子について、(b) のように明瞭な単磁区像を示したことはこれが初めてである。これらの磁区図形は、別の実験により磁氣的に安定であることが確かめられている。

Fig. 2 および Fig. 3 には、 Sm-Co 系化合物のうちで現在高性能永久磁石として使用されている SmCo_5 および $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ 微粒子の例を示した。 Sm-Co 系および Fig. 4 に示す $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 化合物の場合は酸化作用が激しいため、 $\text{BaO} \cdot 6\text{Fe}_2\text{O}_3$ のような立体的な粒子についての磁区図形を得ることは容易ではなかった。このため、ボールミル粉砕した微粒子をポリエステル系樹脂中に分散、固化し、これを金相学的に研磨してその表面に現れた微粒子のうち、 C 面をもつものについて磁区観察を行った。Fig. 2(a) は5磁区粒子 ($D=7.0\mu\text{m}$)、(b) は2磁区

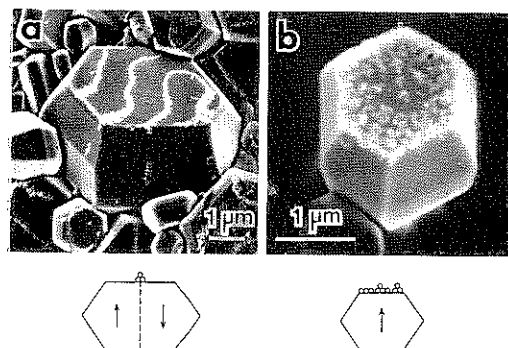


Fig. 1 Magnetic domain patterns of small particles of $\text{BaO} \cdot 6\text{Fe}_2\text{O}_3$ on the surfaces of sintered blocks. (a) a four-domain particle, $D=8.4\mu\text{m}$. (b) a single-domain particle, $D=2.3\mu\text{m}$. Schematic illustrations show the magnetization directions in the particles, and small circles represent Fe_3O_4 powders.

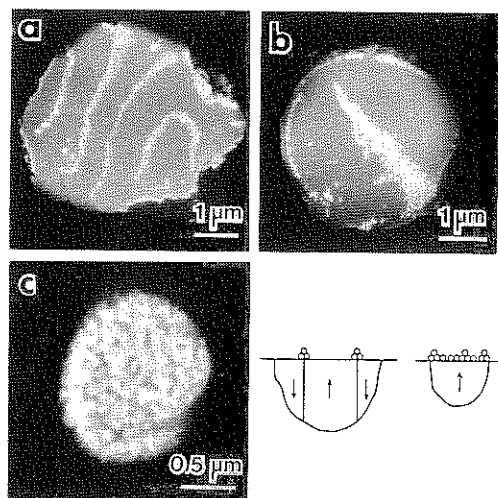


Fig. 2 Magnetic domain patterns of small particles of SmCo_5 . (a) $D=7.0\mu\text{m}$, (b) $D=4.5\mu\text{m}$, (c) $D=1.7\mu\text{m}$. The particle in (c) shows the single-domain state. Magnetizations of domains are illustrated below the right-hand side, where small circles are Fe_3O_4 powders.

粒子 ($D=4.5\text{ }\mu\text{m}$) である。粒径が減少した (c) ($D=1.7\text{ }\mu\text{m}$) では磁壁が観察されず, Fig.1(b) と同様に Fe_3O_4 微粉末が表面にほぼ均一に付着し, SmCo_5 単磁区微粒子であることを示している。これらの磁区図形の磁化容易軸は Fig. 2 の右下に図示してある。

Fig. 3(a), (b), (c) は $\text{Th}_2\text{Zn}_{17}$ 菱面体構造の 2-17 化合物 $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}(\text{t})$ の磁区観察例である。多磁区粒子の (a) は $D=3.7\text{ }\mu\text{m}$ であるが, (b) ($D=2.5\text{ }\mu\text{m}$) では 2

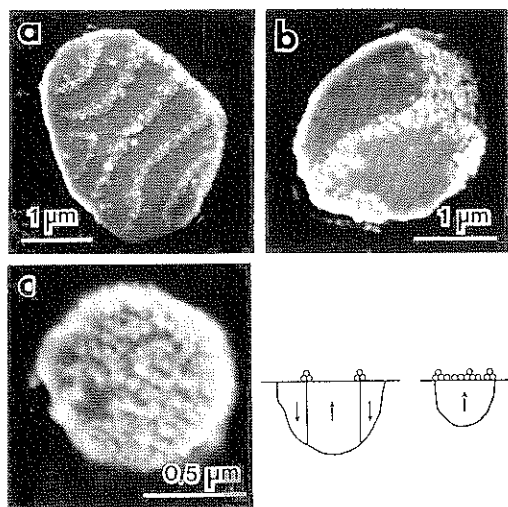


Fig. 3 Magnetic domain patterns of small particles of $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}(\text{t})$. (a) $D=3.7\text{ }\mu\text{m}$, (b) $D=2.5\text{ }\mu\text{m}$, (c) $D=1.2\text{ }\mu\text{m}$. The particle in (c) shows the single-domain. Magnetization of the single-domain particle is perpendicular to the observed surface to which Fe_3O_4 powders are attracted, as illustrated schematically in the figure.

磁区粒子となり, さらに粒径が減少した (c) ($D=1.2\text{ }\mu\text{m}$) の場合は磁壁が見られず, この微粒子が単磁区であることを示す。

Fig. 4 には, 現在最も性能の優れた Nd-Fe-B 系磁石の主相 $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 化合物の例を示した。すでに述べた $\text{BaO}\cdot 6\text{Fe}_2\text{O}_3$, SmCo_5 , $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}(\text{t})$ の場合と同様に, 粒径が減少するに従い微粒子内の磁区数が減少し, 遂には Fig. 4(c) に示した単磁区微粒子 ($D=1.2\text{ }\mu\text{m}$) の磁区図形となる。この図形は Fig. 4 の右下の模式図に示すよ

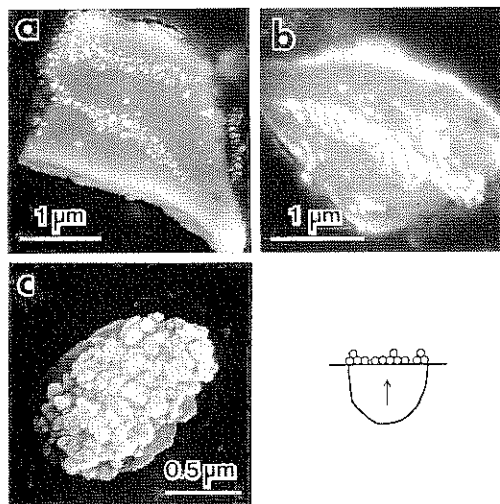


Fig. 4 Magnetic domain patterns of small particles of $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$. (a) particle size $D=2.8\text{ }\mu\text{m}$, (b) $D=2.6\text{ }\mu\text{m}$, (c) $D=1.2\text{ }\mu\text{m}$. (c) shows the single-domain particle, magnetizations of which is perpendicular to the observed surface where Fe_3O_4 powders are attracted, as illustrated in the figure.

Table 3 Values of the critical diameter D_c obtained in the present study and from the theory.

	$\text{BaO}\cdot 6\text{Fe}_2\text{O}_3$	SmCo_5	$\text{Sm}_2\text{Co}_{17}(\text{t})$	$\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$
Saturation magnetization $M_s(\text{G})$	380	768	912	1283
Wall energy density $\sigma_w(\text{erg/cm}^2)$	9	150	87	35
Critical diameter of polished surface $D_{0,\text{max}}(\text{ }\mu\text{m})$	—	5.2	2.2	≈ 1
Critical diameter $D_c(\text{ }\mu\text{m})$ (present study)	0.6~1.9	7.5	3.2	—
Critical diameter $D_c(\text{ }\mu\text{m})$ (theory)	0.9	3.6	1.5	0.3

うに C 面のものである。

各化合物について約 200 個以上の単磁区微粒子の粒度分布を測定し、その最大の値を研磨面上の単磁区臨界直径 $D_{0,max}$ と決定した。さらにこの $D_{0,max}$ を用いて球状粒子の場合の臨界直径 D_c を計算した。この結果を Table 3 に示す。BaO・6Fe₂O₃ の場合は SEM で観察された立体的粒子形状を球と見なし、単磁区微粒子の D の最大値を D_c としている。この Table における D_c の理論値は理論式 (1) から求めた値であり、本研究の結果の約 1/2 程度の値を示している。この D_c の実験値と理論値の不一致の原因は現在のところ不明である。

3.2 垂直磁化膜 Co-Cr の磁気記録の観察

Co-Cr 薄膜は、高密度の垂直磁気記録²⁰⁾を実現する有力な磁性薄膜として知られている。すなわち、結晶の C 軸方向に成長した微細な Co-Cr 柱状晶が、膜面に垂直に配向されて薄膜を形成するため、膜面に垂直な方向への着磁が容易となり、膜面と平行な方向に着磁するいわゆる長手磁気記録より、密度の高い磁気記録が可能となる。

一方、磁気記録は薄膜内に微小で安定な磁区を作ることであるから、作られた磁区を光学顕微鏡を用いた磁区観察によって観察し^{21,22)}、磁気記録法の改善に寄与してきた。緒言で述べた電子線ホログラフィ法やスピネ SEM 法も、磁気記録を観察することを主要な目的の

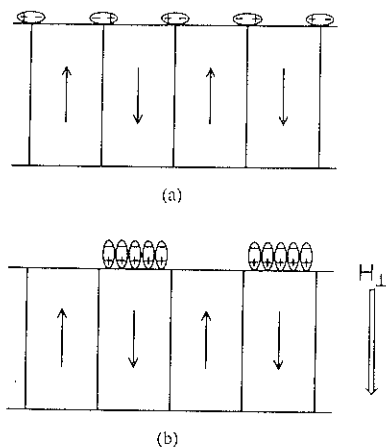


Fig. 5 Illustrations of depositions of magnetite particles. (a): $H_{\perp}=0$, (b): with $H_{\perp}$ downward.

一つとしていた^{23,24)}。著者らは 5~250 kBPI (キロビット/1 インチ) の記録密度で垂直記録された Co-24 wt% Cr 薄膜 (220 nm 厚さ) にコロイド-SEM 法を適用し、特に高密度の場合の膜表面の記録形状を観察した^{25,26)}。

実験の方法は 2.1 で述べた方法に若干の工夫を加えた。すなわち、Fig. 5(b) に示したようにコロイド溶液を膜面に滴下する場合、約 24 kA/m の磁界 $H_{\perp}$ を膜面に垂直方向に作用させ、磁区図形が乾燥してから $H_{\perp}$ を

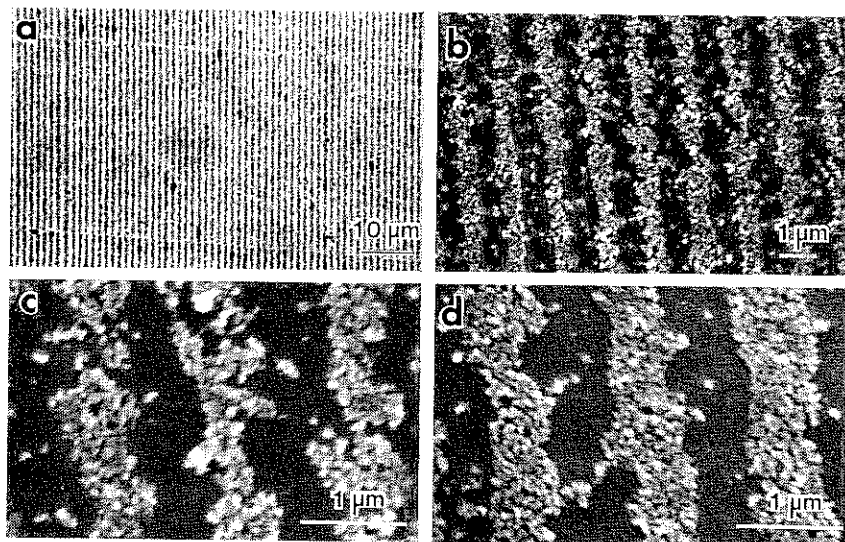


Fig. 6 Recorded patterns with a density of 50 kBPI (sample 2). The dried patterns were produced under downward $H_{\perp}$ in the preparation process. (a): by an optical microscope, $H_{\perp}=15.9$ kA/m. (b): by the colloid-SEM method with an instrumental magnification of $\times 10000$, $H_{\perp}=23.9$ kA/m. (c): on the same area and by the same method as (b) but with $\times 30000$, $H_{\perp}=23.9$ kA/m. (d): by the colloid-SEM method on a different area from (c) with $\times 30000$, $H_{\perp}=23.9$ kA/m.

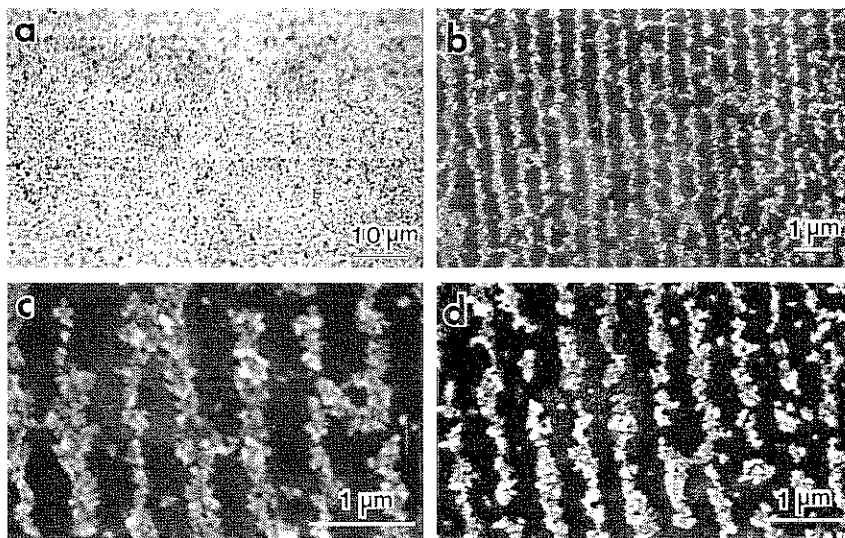


Fig. 7 Recorded patterns of 100 kBPI density (sample 2). The dried patterns were produced under downward $H_L = 23.9 \text{ kA/m}$ in the preparation process. (a): by optical microscope. (b): by the colloid-SEM method with an instrumental magnification of $\times 10000$. (c): on the same area and by the same method as (b) but with $\times 30000$. (d): by the colloid-SEM method on a different area from (c) with $\times 20000$.

零とした。 H_L を作用させないときは、 Fe_3O_4 微粉末は記録境界（磁区境界）に付着するが (Fig. 5(a)), H_L があるときは Fe_3O_4 微粉末が磁化されるため Fe_3O_4 微粉末は記録領域（磁区）に付着し、明瞭な記録図形が高密度まで観察される。

観察結果の代表例を Fig. 6 (50 kBPI 記録) および Fig. 7 (100 kBPI 記録) に示した。両図には比較のため光学顕微鏡による観察 (Fig. 6(a), Fig. 7(a)) も示してある。Fig. 6, Fig. 7 において、上下に走る白色の領域は Fe_3O_4 微粉末の付着した部分であり、白色、黒色の領域の磁化は観察面に垂直で、互いに反平行となっている。これらの図から記録領域の境界が直線的ではなく、きわめて不規則な形をもつことが明らかである。この不規則な形状は再実験によってかなり良く再現される。記録領域の境界のこれらの不規則性は、記録再生特性におけるノイズの一原因と考えられる。Fig. 6, Fig. 7 について記録幅の測定を行うと、50 kBPI の場合 $0.53 \sim 0.60 \mu\text{m}$, 100 kBPI の場合 $0.28 \sim 0.29 \mu\text{m}$ が得られ、計算上のそれぞれの値 $0.51 \mu\text{m}$ および $0.25 \mu\text{m}$ からわずかにずれている。本実験では、5~150 kBPI の垂直記録については明瞭な記録図形が得られたが、これ以上の高密度記録の場合は、 Fe_3O_4 コロイド溶液についての工夫が必要と思われる。

4. 結 論

コロイド-SEM 法は光学顕微鏡の代りに走査電子顕微鏡を使用する方法であり、実験技術が容易であることが大きな特徴である。また走査電子顕微鏡の焦点深度は通常 $10 \mu\text{m}$ 以上ときわめて大きいため、観察試料表面の準備が簡単であることも、もう一つの特徴である。これらの特徴を生かして、焼結磁石材料やボンド磁石などの磁区観察による粒度制御に有効であり、また光-磁気記録薄膜の記録ビットの形状観察などにも使用できる。欠点としては、著者らの使用しているコロイド溶液の Fe_3O_4 微粉末の磁気モーメントが比較的小さいことが指摘され、このため結晶磁気異方性の小さな軟質磁性材料へ適用した場合に良い結果が得られていない。より大きな磁気モーメントをもつ磁性コロイド溶液が利用できれば、その汎用性が拡大され则认为る。

謝 辞

本研究は東北大学科学計測研究所在職中の著者の指導により、桜井伴明技官、当時の東北大学大学院工学研究科学生の伊藤幹彦、宗像 誠、井上哲夫の諸君、当時の東北大学科学計測研究所研究生の北上 修、長谷川 寛の諸氏の協力によってなされたものであり、これらの諸氏に感謝の意を表します。また、本研究の一部は文部省科学研究費補助金によってなされたことを記し、謝意を表します。

文 献

- 1) H. J. Williams, R. M. Bozorth and W. Shockley : *Phys. Rev.* **75**, 155 (1949).
- 2) D. J. Craik and R. S. Tebble : "Ferromagnetism and Ferromagnetic Domains" (North-Holland Publishing Company, Amsterdam, 1965) p. 66.
- 3) 長島富雄, 榎藤靖夫 : "磁気", 実験物理学講座第 17 卷, 近角聡信編集 (共立出版, 1968) p. 349.
- 4) 外村 彰 : 応用物理 **52**, 290 (1983).
- 5) 小池和幸, 早川和延 : 応用物理 **54**, 980 (1985).
- 6) K. Goto and T. Sakurai : *Appl. Phys. Lett.* **30**, 355 (1977).
- 7) 後藤公美, 桜井伴明 : 東北大科研報告 **26**, 25 (1977).
- 8) 武富 荒, 近角聡信 : "磁性流体" (日刊工業新聞社, 1988) p. 109.
- 9) 桜井伴明, 後藤公美, 井上哲夫 : 日本金属学会誌 **51**, 774 (1987).
- 10) J. Frenkel and J. Dorfman : *Nature* **126**, 274 (1930).
- 11) C. Kittel : *Phys. Rev.* **70**, 965 (1946).
- 12) 後藤公美 : 粉体および粉末冶金 **36**, 761 (1989).
- 13) K. Goto, M. Ito and T. Sakurai : *Jpn. J. Appl. Phys.* **19**, 1339 (1980).
- 14) O. Kitakami, K. Goto and T. Sakurai : *Jpn. J. Appl. Phys.* **27**, 2274 (1988).
- 15) M. Munakata, K. Goto and T. Sakurai : *Phil. Mag.* **B 47**, 431 (1983).
- 16) 宗像 誠, 後藤公美 : 東北大科研報告 **31**, 15 (1982).
- 17) T. Inoue, K. Goto and T. Sakurai : *Jpn. J. Appl. Phys.* **22**, L695 (1985).
- 18) T. Inoue and K. Goto : MRS Int'l Mtg. on Adv. Mats. Vol. 11, 1989, Materials Research Society, p. 83.
- 19) H. Hasegawa, K. Goto, K. Haneda and T. Sakurai : *Phil. Mag. Lett.* **58**, 123 (1988).
- 20) S. Iwasaki and Y. Nakamura : *IEEE Trans. Magn.* **MAG-13**, 1272 (1977).
- 21) C. D. Mee : "The Physics of Magnetic Recording", ed. by E. P. Wohlfarth (North-Holland, Amsterdam, 1964) p. 87.
- 22) 大内一弘 : 学位論文 (東北大学, 1984).
- 23) N. Osakabe, K. Yoshida, Y. Horiuchi, T. Matsuda, H. Tanabe, T. Okuwaki, J. Endo, H. Fujiwara and A. Tonomura : *Appl. Phys. Lett.* **42**, 746 (1983).
- 24) T. Tanaka and A. Kokubu : *J. Magn. Soc. Jpn.* **8**, 89 (1984) (in Japanese).
- 25) K. Goto, T. Sakurai and O. Kitakami : *Jpn. J. Appl. Phys.* **25**, 1358 (1986).
- 26) K. Goto, O. Kitakami and T. Sakurai : *IEEE Trans. Magn.* **MAG-23**, 2365 (1987).