

## ローレンツ電子顕微鏡法による 強磁性体の磁区観察

津 野 勝 重・井 上 雅 夫

日本電子(株) 196 東京都昭島市武蔵野 3-1-2

(1992年6月30日受理)

### Lorentz Electron Microscopy for Observing Magnetic Domains of Ferromagnetic Materials

Katsushige TSUNO and Masao INOUE

JEOL Ltd.

1-2 Musashino 3-chome, Akishima, Tokyo 196

(Received June 30, 1992)

ローレンツ電子顕微鏡の三つのモード、ローレンツ-TEM (フレネルおよびフーコー法)、DPC ローレンツ STEM (位相差電子顕微鏡法) および、ローレンツ-SEM (タイプ-II 磁気コントラスト) について概略を述べる。これら3方法を同一装置において実現するダブルギャップ対物レンズを作製した。このレンズによってこれまで装置の問題から利用されることの少なかったフーコー法が見直され、また、タイプ-II 磁気コントラストは微小領域の磁区観察に応用が広がった。

#### 1. はじめに

電子が強磁性体試料を透過する際に、試料の自発磁化によって偏向されることをコントラストの起源とする磁区観察法はローレンツ電子顕微鏡法と呼ばれている。この方法は、電子顕微鏡の三つのモード、すなわち透過電子顕微鏡 (TEM)、走査透過電子顕微鏡 (STEM) および走査電子顕微鏡 (SEM) に応じた三つの方法がある。TEM 法には、対物レンズをデフォーカスして磁壁上に白または黒のコントラストを生じさせるフレネル法と、対物絞りをを用いてビームを一部さえぎり磁化の向きに応じて磁区に白黒のコントラストを生じさせるフーコー法がある。前者は Hale ら<sup>1)</sup>、後者は Boersch と Raith<sup>2)</sup> によって同じ 1959 年に実現された。SEM 法を用いた磁気コントラスト形成法にも二つあり、いずれも 1969 年に開始された。ひとつは試料の外にふき出した漏洩磁界による2次電子の偏向を観察するもので、Banbury と Nixon<sup>3)</sup> によって始められ、タイプ-I 磁気コントラストと呼ばれている。他は Philibert と Tixier<sup>4)</sup> によって始められ、傾斜した試料から放出される反射電子の量

が磁化の向きに依存して変化することを利用した方法でタイプ-II 磁気コントラストと呼ばれている。タイプ-I 磁気コントラストは、試料の自発磁化に直接には依存していないので、ここではタイプ-II 磁気コントラストだけをローレンツ SEM 法としてとりあげる。STEM 法は、TEM 法と同じコントラストを与えるが、1977 年に Chapman ら<sup>5)</sup> によって始められた4分割検出器を用いて、信号の差を画像として形成させる位相差 (Differential Phase Contrast: DPC) ローレンツ STEM 法は磁化の定量的測定が可能な方法である。以下ではこれら3方法の概略を説明し、続いて1台の装置において3方法を実現する電子顕微鏡レンズを紹介する。

#### 2. ローレンツ TEM

##### 2.1 フーコー法

電子が厚さ  $t$ 、磁束密度  $B$  の薄膜試料を垂直に透過したとすると、電子は、

$$\beta = (e/2mV^*)^{1/2} Bt \quad (1)$$

の角度だけ偏向される<sup>9,11,15,19,22)</sup>。ここで、 $e, m$  は電子の電荷と質量、 $V^*$  は相対論補正を行った加速電圧 (100

kV で 109 kV, 200 kV で 239 kV) である。 $\beta$  は加速電圧 200 kV で  $\beta = 606.4 Bt$  ( $B$  と  $t$  の単位はそれぞれ T および m), したがって厚さ 100 nm の鉄膜では  $\beta$  はわずか 0.01 mrad しかない。この角度は結晶格子からのブラグ反射によって起こる電子回折に比べて著しく小さい。 $B$  は試料内の磁化が膜面内に平行でかつ試料の外に漏洩磁束がない場合には、 $\mu_0$  を真空の透磁率として、自発磁化  $M_s$  と  $Bt = \mu_0 M_s t$  として結びつけられ、偏向角が自発磁化と厚さの積に比例することになる。

電子顕微鏡の対物レンズの作用は、図 1 の破線に示すように、試料に垂直に入射した電子ビームを対物レンズの後焦点面に収束させる。結晶の場合、この面上に電子回折像ができる。強磁性体試料では、ローレンツ力によって試料から出るビームは  $\beta$  だけ偏向される (実線)。磁区内の磁化の向きによって偏向の方向が異なっている。この結果として、後焦点面上の回折図形は磁区の向きに応じて分裂する。この図形は偏向図形と呼ばれている<sup>19)</sup>。図の破線は実は磁壁に入射したビームの軌道である。おのおのの電子の軌道を延長すると、試料上の同じ点から出たビームが再び同じ点に集まる面がある。これが像面である。焦点が合った像では電子ビームの偏向の影響が出ないので磁区は見えない。しかし今、後焦点面上で対物絞りを動かして偏向図形のひとつのスポットをさえ切ったとしよう。このとき、図の斜線で示した電子線は像面に達することができず、写真上暗くなる。残ったスポットに対応する磁区の像が明るく写し出される。このようにして、おのおのの磁区は磁化の向きに応じて明暗のコントラストを得る。この方法は、フーコー法と呼ばれている<sup>19)</sup>。通常の電子顕微鏡における暗視野法に対応した方法と考えることができる。

フーコー法はその原理的な単純さから本質的にはきわめて有力な磁区観察法でありながら、主として装置にか

かわる問題によって利用されることが少なかった。特に、後焦点面近くに対物絞りを入れることが装置の構造上困難であった。また、偏向角  $\beta$  が小さいことによる対物絞り面上での偏向図形のシフト量の少なさもこの方法による定量的測定を妨げるものであった。偏向量  $r_i$  は

$$r_i = (1 - b/f)r_0 + (a + b - ab/f)\beta \quad (2)$$

と書くことができる。ここで、 $r_0$  は試料面上におけるビームの位置である。また、 $a$  と  $b$  はそれぞれ、試料とレンズまでの距離およびレンズと絞り面の距離である。 $b$  が後焦点面であれば  $b = f$  (焦点距離) なので最初の項は消え、たとえば  $a = 10$  mm,  $b = f = 15$  mm,  $\beta = 0.01$  mrad とすると、 $r_i$  はわずか  $r_i = 0.15 \mu\text{m}$  である。フーコー法によって磁区像を定量的に決めるためにはサブミクロンの位置精度が必要になる。

図 4 の下の写真は多結晶 Co のフーコー法による磁区像の例である。上の写真はあとで説明する DPC ローレンツ STEM 法による同一視野の磁区像である。フーコー法では結晶のコントラストが同時に観察されている。

## 2.2 フレネル法

古典論ではローレンツ力による電子ビームの偏向として解釈したことを量子論的には磁性体試料は入射電子波に対して位相変化を引き起こすとして説明する。生ずる位相の勾配は  $\hbar$  をプランクの定数として

$$V\phi = 2\pi e B t / \hbar \quad (3)$$

である<sup>22)</sup>。たとえば、50 nm の幅をもつ磁壁の両側の磁区間での位相差は  $\pi$  より大きい。つまり、結晶構造像観察の場合における位相変化に比べて非常に大きく、強磁性体は強位相物体ということになる。高分解能電子顕微鏡像のコントラスト解析で前提とされる弱位相物体近似が強磁性体については成立せず、このことが結局はフレネル法による磁壁コントラストの定量的解釈をさまたげた。

位相変化はそのままでは像コントラストを生じない。すなわち、焦点が合った状態では像が観察できない。これは結晶構造像の場合も同じで、位相のずれを生じさせる試料 (位相物体) の観察に共通している。結晶構造像の場合、電子波が結晶中を通過するとき、結晶を構成する原子核をとり巻く電子雲の作る静電ポテンシャルによって偏向を受け電子波の位相を前進させる。正焦点ではコントラストを生じないが、フォーカスをずらす (デフォーカス) ことによって初めてコントラストが生じ、結晶構造を反映した像を見ることができる。自発磁化によるコントラストもこれとまったく同様で、デフォーカスによって磁壁構造が観察される。これがフレネル法と呼ばれる磁壁の観察法である。電子線の位相がそろっている場合には、電子同志の干渉によって干渉縞を生ず

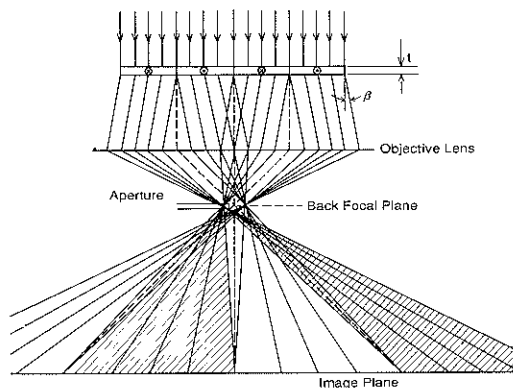


図 1 ローレンツ TEM における光線図

る。電子雲の静電ポテンシャル分布に比べて磁壁内の磁化分布の変化は巨視的で観察が容易であるが、先に述べたように位相変化量が多い。電子顕微鏡による磁区観察法に期待されたのは高倍率観察だけでなく磁壁内の磁化回転の定量的測定<sup>11)</sup>であった。1969年に磁壁の2次元構造が提案され、その場合フレネル法による磁壁のコントラストに非対称性が現れるはずであった。この非対称性は1971年に塚原らによって1000 kVの超高压電子顕微鏡を用いて実証された<sup>6)</sup>。しかしながら、その後の多くの努力にもかかわらずフレネル法によっては磁化の定量的測定が困難であった。

フレネル法の最大の利点はコントラストが高いことである。したがって、たとえば、リップル構造観察のように、わずかな磁化の変動を感度よくとらえることができる。また、飽和磁化の小さい試料でも容易に観察できる。さらに、手法が簡単なので、まず、磁区の確認するためにフレネル法を用い、その後、他の方法でもっと定量的に、あるいはもっときれいに写真を作っていくのが観察の順序と考えられるようになってきた。

### 3. DPC ローレンツ STEM 法<sup>19, 21, 22, 27~37)</sup>

ローレンツ TEM 法が磁化の定量的測定において困難があったのに対して、DPC ローレンツ STEM 法 (DPC 法と省略する) ではこれが可能である。定量化を可能にしたのは電子ビームの走査と分割型検出器による信号の加減算である。位相コントラストによる像を作るうえで、DPC 法では回折像面上のビーム強度を取り出すだけでよいのに対して、TEM 法 (フーコー法) では回折像面において対物絞りによる操作を加えた後拡大像を作らなければならない。後者の場合、回折像面での操作を容易にするため回折像を拡大すると像が縮小する点に矛盾があった。

図2はDPC法における電子軌道の模式図である。STEMでは試料に細く絞ったビームを当てるので、試料上のビームは $2\alpha$ の角度をもつ。磁性体試料によって $+\beta$ または $-\beta$ だけビームが偏向されると、図3のように偏向図形は左右にシフトする。偏向図形のおおのが円板状になっているのは $\alpha$ によるもので、(2)式から求められる。円の直径 $2r$ が $2\alpha$ によって決まり、円の相互のシフト $2d$ は $2\beta$ ((1)式参照)によって生ずる。この偏向図形を図3のように4分割した検出器にあて、各検出器で受けた信号を $(A+D)-(B+C)$ のように加減算してブラウン管上に表示すれば磁化に比例した明暗のコントラストを得ることができる。図2に示したようにDPC法では4分割検出器を対物レンズの後焦点面上に置く必要はなく、焦点面を後段の中間レンズと投影レ

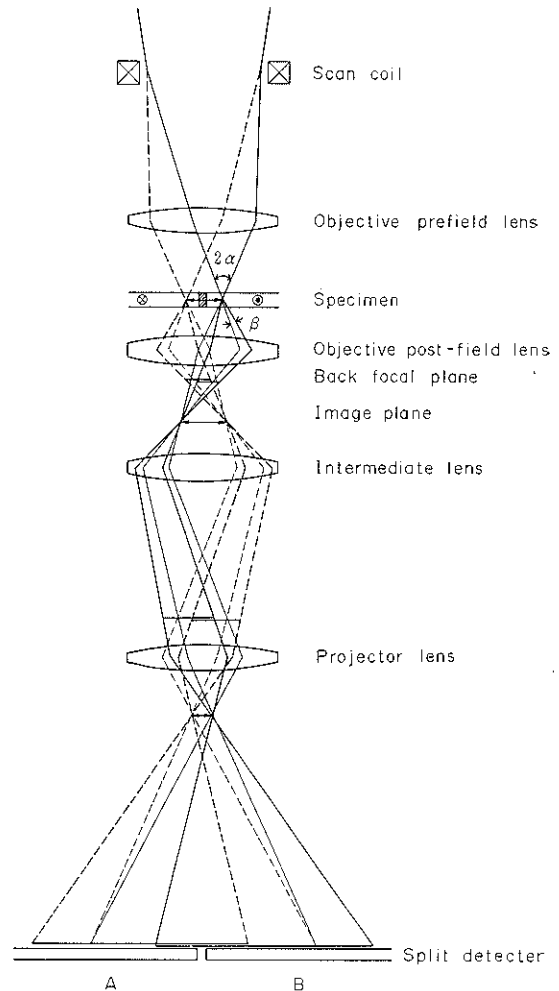


図2 DPC ローレンツ STEM における光線図

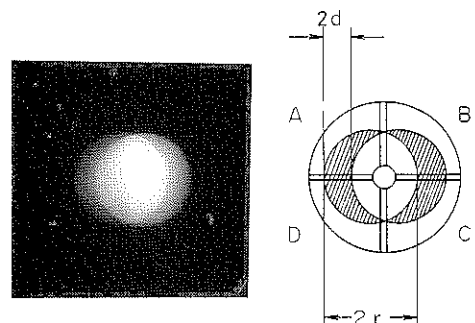


図3 DPC ローレンツ STEM 条件における偏向図形の分離を示す写真とその検出器上の模式図

ンズによって検出器上に拡大投影する。このときこれらのレンズの倍率を適当に選んで、検出器の大きさとほぼ等しい大きさに偏向パターンを拡大することができる。偏向図形が検出器上にフォーカスしていれば、ビームを

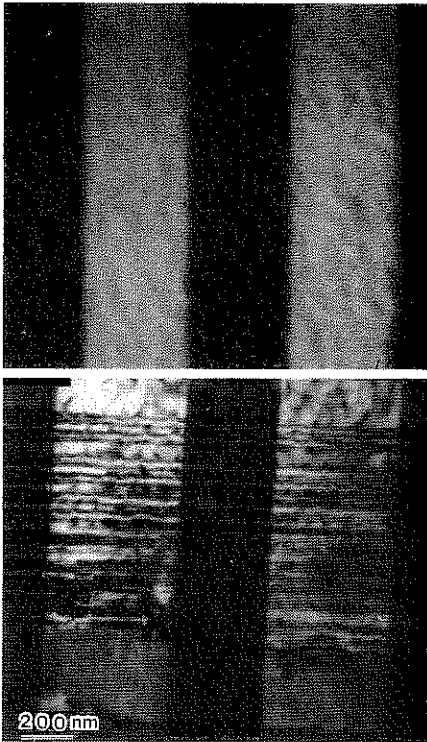


図4 DPC ローレンツ STEM 法とローレンツ TEM (フーコー法) による磁区模様と比較  
試料はコバルト多結晶

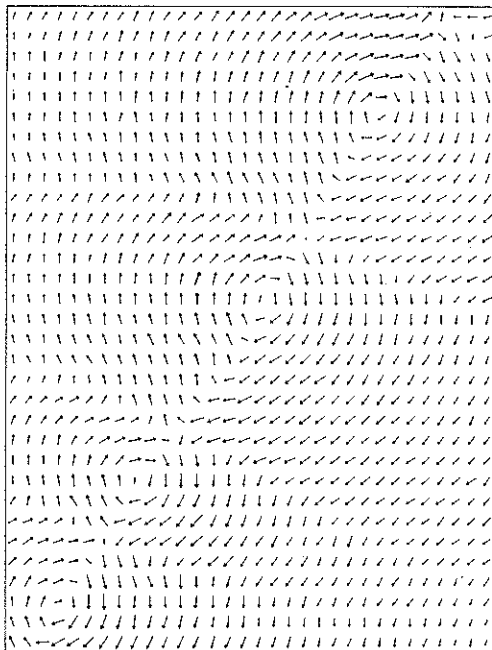


図5 図6に示す4枚の磁区模様から合成した磁化のベクトル図 (J. Appl. Phys. の好意による)

試料上に走査しても検出器上の偏向図形は振動しない。これは(2)式において、 $b=f$  のとき、 $r_0$  を変化しても  $r_i$  は変わらないということで説明される (STEM専用機を用いた DPC 法の解説においてデスキャンコイルによって偏向図形の振動を止めることが DPC 法による像観察のポイントとして書かれているが、TEM ベースの装置においてはデスキャン・コイルは不要である)。このフォーカスは、TEM の蛍光板上において確認することができる。

図4はコバルト多結晶の磁区構造を DPC 法(上)とフーコー法(下)で比較したものである。DPC 法による像では試料表面の凹凸が観察される。分解能の点では明らかにフーコー法による像が優っている。DPC 法では、空間分解能を高めるためビームを細くすると、開き角が大きくなり、結果として  $2\alpha$  に対する  $2\beta$  が小さくなり、コントラストが減少する。レンズの改良によって 10nm 以下の分解能は得られるが、きれいな磁区像を得ることが困難になる。しかし、この問題は電界放射型電子銃

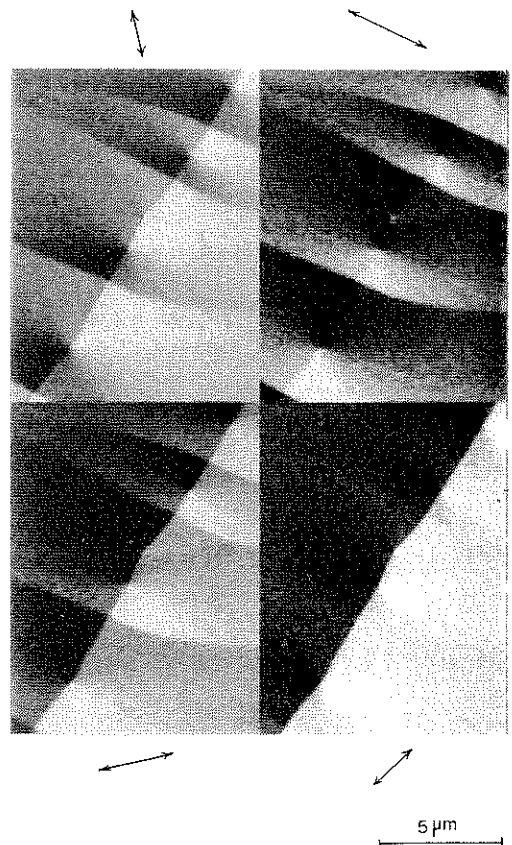


図6 DPC ローレンツ STEM 法による NiFe 膜のクロスタイ磁壁 (J. Appl. Phys. の好意による)

(FEG)を用いれば容易に解決するので、その方面での新しいデータが今後期待される。

今のところ定量的測定で成功しているのは図5に示す磁化分布のベクトル表示である。矢印の長さは磁化の膜面成分を表わしているの、短い矢印の所では磁化が膜面に対し角度をもっている。この図は図6に示す4枚の像をコンピュータに取り込んでそれから計算によって作成したもので、IBM アルマデン研究所の McFadyen<sup>31)</sup>の仕事である。DPC 法による像は、四つの検出器の信号の加減算のやり方によって矢印に示した方向の磁化成分に対して強いコントラストをもっている。この磁区は45nm 厚さの NiFe 膜からのものであるが、クロスタイ磁壁のベクトルマップは、あたかもコンピュータ・シミュレーションによって生成された像のようである。

#### 4. ローレンツ SEM (タイプ-II 磁気コントラスト)<sup>12,13,16,17,38~42)</sup>

高加速電圧でバルク試料に打ち込まれた電子は試料の中で原子に衝突を繰返すうち、一部は反射電子となって真空中に放出される。磁性体試料の場合には電子は試料内でローレンツ力を受け、電子の軌道が変化する。図7の上図のように試料を傾斜した場合には放出される反射電子の量が磁化の向きによって変化するの、側面に置

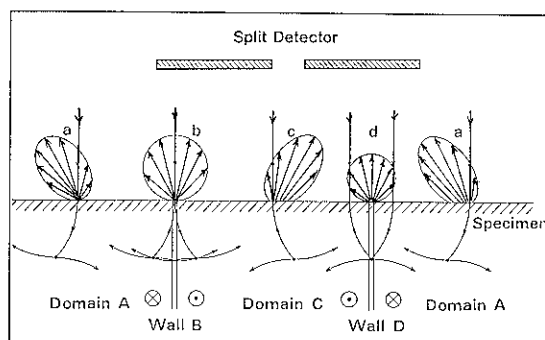
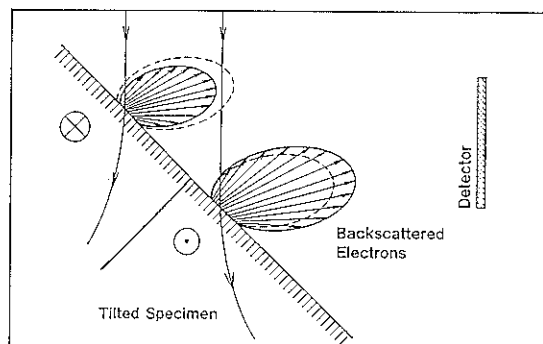
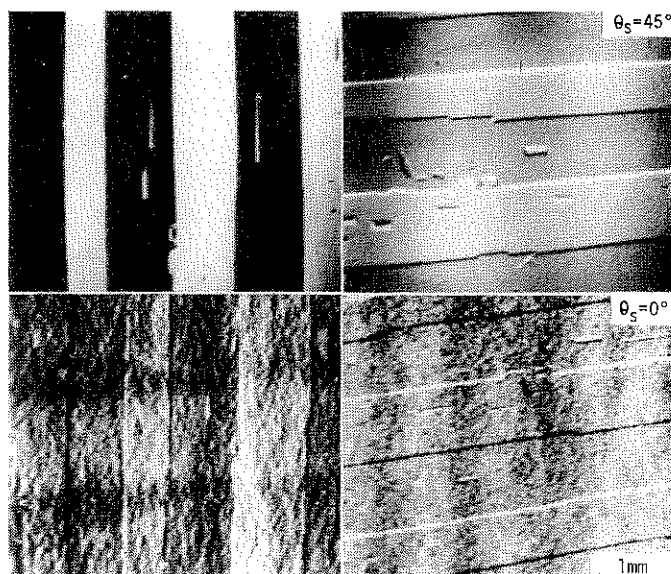


図7 ローレンツ SEM(タイプII磁気コントラスト)の二つの実験法とそれぞれのコントラストの起源の説明



写真左側：試料の磁化方向を試料傾斜軸に平行に置いた場合

写真右側：試料の磁化方向を傾斜軸に垂直にした場合

図8 ローレンツ SEM 法による磁区

いた検出器によってこの反射電子放出量の差がコントラストとしてとらえられる。図8左上はこのようにして得られたケイ素鋼板の磁区像である。しかし、試料を90°回転して置いてみたところ、右上に示すような磁壁の像が観察された。大阪電通大の生田によればこの磁壁コントラストは図7下のようにして説明される<sup>21)</sup>。すなわち、垂直入射した電子ビームに対して磁区は反射電子の放出量に影響しない。しかしながら、磁壁Bと磁壁Dで示すように磁壁1個おきに差が生ずる。実際、図8下の2枚は試料を水平に置いたときの像であるが、右下の図でははっきりとした磁壁像が観察されている。左下図では磁壁像のほかに磁区コントラストも観察されているが、これは検出器が試料に対して非対称に設置されているため、磁化の向きによる反射電子の放出方向の違いがコントラストとして生じたものである。WellsとSavoy<sup>7)</sup>は、図7の下図のように水平に置いた試料の上部の対称な位置に2枚の検出器を置き、両検出器の差分信号によって磁区像を、また加算信号によって磁壁像を観察することに成功している。Poganyら<sup>42)</sup>は試料傾斜した場合や水平試料の場合の磁壁像を吸収磁気コントラスト、水平試料の差分信号による磁区像を偏向磁気コントラストと呼んだ。偏向磁気コントラストによる磁区像はDPC法によるそれとときわめて類似しているが、反射電子像では偏向図形が形成されないため、DPC法の場合に検出器上に偏向図形をフォーカスしないで観察した場合に相当する。すなわち、検出器上の信号強度は試料位置によっても変化する。Ferrier<sup>39-41)</sup>は、Wells<sup>9)</sup>の提案したロックインアンプを用いたコントラスト増幅法を利用して薄膜磁気ヘッドの磁壁観察を幅広く行っている。彼の方法は、磁気ヘッドのコイルに弱い高周波電流を流して磁壁を振動させ、反射電子信号のうちの振動数に等しい信号のみで像を形成している。

## 5. 磁区観察用電子顕微鏡

電子顕微鏡で磁区を観察する場合の最大の問題は、電子顕微鏡の試料は普通対物レンズの作る強い磁界(1~2.5T)にさらされているので、試料にかかる磁界をいかにして避けるかということである。方法は四つある<sup>10)</sup>。ひとつは電界レンズを用いることであるが、最近では電界レンズを用いた電子顕微鏡がない。第2の方法は、試料位置を数十mm持ち上げて試料に磁界がかからないようにすることである。試料位置をレンズから遠ざけると、フォーカスに必要な電流も減少し都合がよい。電子顕微鏡への試料挿入方法がトップエントリー型であった頃は、この方法が主流で試料ホルダーの先端を短く切ったものが使われたが、最近ほとんどの電子顕微鏡

がサイドエントリー型に変わったため、この方法も使えなくなった。

第3の方法は、対物レンズ電流をオフにすることである。幸い、最近の電子顕微鏡には対物レンズの直上にコンデンサミニレンズ、直下に対物ミニレンズをそなえているものがあり、対物レンズをオフにしても、これらのミニレンズを対物前方磁界および後方磁界として利用するため有力な方法になりつつある。McFadyenのDPC法<sup>23,31,36,37)</sup>はこの方式を用いており、図6の写真がその例である。しかしこの方法の最大の難点はヨーク材料の残留磁化による試料位置での残留磁界である。この磁界は実際に測定してみると驚くべき値を示すことがあり注意が必要である。しかし磁界の方向が試料の厚さ方向であり、薄膜試料の大きい反磁界係数のため、試料を磁気飽和させるには不足である。しかし、試料をわずかも傾斜すると磁壁が動く場合があり、このときは垂直磁界の影響下での磁区を観察していることを忘れてはならない。

第4の方法は、対物レンズの磁界が試料にかからないようにシールドしたポールピースを用いることである。TEM用として試料の下方のみに磁界を生じさせるタイプとSEM用に試料の上方のみに磁界を作るタイプがあったが、DPC-STEMを行うため、試料の上方および下方に共に磁界を作るタイプが作られた。このタイプのポールピースではTEM法とSTEM法が同時に使えたが、図9に示すポールピースではさらにSEM法にも使えるように、試料上部に反射電子検出器を挿入した。この3方式が同一装置で利用できる対物レンズのアイデアは1987年にChapmanとFerrierによって出され、1988年に完成した。この装置の応用論文はすでに何編か出されており<sup>23-26,39-41)</sup>、装置もサンノゼのIBMや日

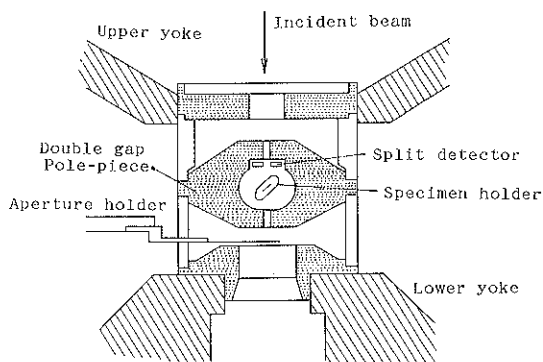


図9 三つのローレンツ法のすべてを実現できる対物レンズポールピースの断面  
反射電子検出器、試料ホルダ、対物絞りも示してある

本のメーカーでも使われ始めている。しかしながら、筆者はこの装置を製作しただけで応用データをもっていなかったため、装置についての論文を書かなかった（口頭発表もしたことがない）が、この装置に関する誤解が特にフーコー法に関して広がっていると思われるので、この機会に詳しく述べておく。

図 10 は、図 9 の対物ポールピースを用いたときの光軸上の磁界分布を示している。磁界は試料の前方（マイナス方向）と後方（プラス方向）にできるが、前方磁界は後方磁界に対して弱めである。また、試料位置（ $Z=0$  mm）での光軸方向すなわち膜面に垂直方向の磁界強度は約 0.3 mT ときわめて小さく押さえることができた。図 11 はレンズの光学特性を示している。 $Z_0$  と  $Z_c$  は各励磁強度（アンペアターン）でフォーカスする試料位置を示しており、 $Z_0=0$  のときに TEM 法での励磁強度を、

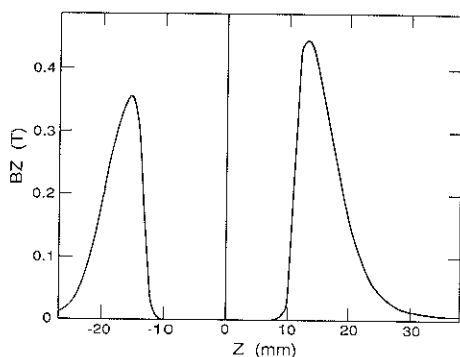


図 10 図 9 のポールピースを用いた場合の STEM フォーカスにおける軸上磁界分布

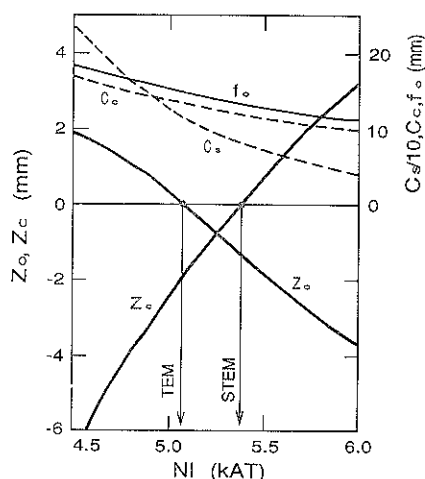


図 11 図 9 のポールピースの光学特性  
 $C_s$ : 球面収差係数,  $C_c$ : 色収差係数,  $f_0$ : 焦点距離,  $Z_0, Z_c$ : それぞれの励磁 NI における STEM および TEM フォーカスする試料位置

$Z_c=0$  のときに STEM, SEM 法での励磁強度を与える。このポールピースの場合、TEM モードと STEM モードとでフォーカスに必要な励磁電流が異なっている。STEM モードのみで使用する場合には、両者が一致したいわゆるコンデンサ・オブジェクトブのモードで使うほうが便利であるが、TEM モードのフレネル法ではできるだけ平行性の高いビームが望ましいので、あえてその条件を外した。また、結像系側（下側ギャップ）の光学特性も同時に示してあるが、 $f_0$  は焦点距離、 $C_s$  は球面収差係数、 $C_c$  は色収差係数である。このレンズで、0.7 nm の格子縞が撮影できた。

フーコー法で磁区を観察する場合、照射ビームが試料に対して平行入射のときはレンズ主面位置から焦点距離  $f$  だけ後方に絞りを入れることになるが、今の場合  $f=15$  mm 程度なので、正しい絞り位置は下側ヨークの中になっってしまう実現できない。しかしながら、この装置では対物レンズ前方磁界のため照射ビームは試料に傾斜して入る。今、対物後方磁界を無視したときに、対物前方磁界によってビームが収束する位置を前方磁界の中心から  $b_0$  とし、両磁界中心間の距離を  $L$  とすると、絞りを入れるべき位置  $b$  は、平行照射のときの  $f$  から

$$1/b = 1/f - 1/(b_0 - L) \quad (4)$$

にしたがって対物後方磁界の中心に近づく。 $b_0$  が小さいほど（すなわち対物前方磁界が強いほど）絞り位置は後方磁界中心に近づく。このポールピースでは前方磁界に対して平行照射した場合の  $b_0$  が  $f$  に近い値であるが、コンデンサミニレンズを使って  $b_0$  をさらに  $L$  に近い値に調節することができるので、正しい絞り位置をレンズギャップに入れることができる。このように、フーコー法を実現するためには、対物レンズ前方磁界の働きが必要である。

図 9 に示したポールピースを用いた場合、SEM 法のための 2 枚の反射電子検出器は十分試料位置にも近く、多くの反射電子を集めることができた。文献 39)~41) の薄膜ヘッドの磁壁像はこの装置を用いて吸収磁気コントラスト（信号の加算）を観察したものである。偏向コントラスト（信号の減算）による磁区模様も最近観察された。

#### 謝 辞

本解説の後半に述べたレンズの開発を指導された英国グラスゴー大学の Chapman 教授と Ferrier 教授に感謝します。また、写真の使用を快諾していただいた IBM アルマデン研究所の McFadyen 博士に感謝いたします。最後に本解説を書くことをすすめてくださった日本電子小島建治氏に感謝いたします。

## 文 献

(ローレンツ電子顕微鏡法の初期論文など)

- 1) M. E. Hale, H. W. Fuller and H. Rubinstein : J. Appl. Phys. **30**, 789 (1959).
- 2) H. Boersch and H. Raith : Naturwissenschaften **46**, 574 (1959).
- 3) J. R. Banbury and W. C. Nixon : J. Phys. E. Sci. Instrum. **2**, 1055 (1969).
- 4) J. Philibert and R. Tixier : Micron **1**, 174 (1969).
- 5) E. M. Waddell, J. N. Chapman and R. P. Ferrier : Inst. Phys. Conf. Ser. No. 36 (1977) p. 267.
- 6) S. Tsukahara, H. Kawakatsu and T. Taoka : Jernkont. Ann. **155**, 468 (1971).
- 7) O. C. Wells and R. J. Savoy : Microbeam Analysis, ed. D. E. Newbury, San Francisco Press 17 (1979).
- 8) O. C. Wells and R. J. Savoy : IEEE Trans. Magn. **MAG-17**, 1253 (1981).
- (解説)
- 9) 川勝久三 : 金属物理 **10**, 37 (1964).
- 10) W. J. S. Blackburn, G. H. Curtis and R. P. Ferrier : J. Sci. Instrum. (J. Phys. E) **2**, 570 (1969).
- 11) 鈴木孝雄 : 日本金属学会会報 **14**, 891 (1975).
- 12) 山本敏行 : 固体物理 **11**, 37 (1976).
- 13) R. P. Ferrier and J. N. Chapman : Inst. Phys. Conf. Ser. No. 36, 227 (1977).
- 14) J. P. Jakubovics : Magn. Solids. Scottish Universities Summer School in Physics, Edinburgh, 125 (1981).
- 15) 塚原園子 : 日本応用磁気学会誌 **5**, 12 (1981).
- 16) 山本孝明, 野沢忠生, 松尾征夫 : 日本応用磁気学会誌 **5**, 19 (1981).
- 17) 木下正治 : 日本応用磁気学会誌 **5**, 28 (1981).
- 18) 渡辺伝次郎, 関口隆史 : 電子顕微鏡 **19**, 10 (1984). (電子顕微鏡学, 塩尻ら編集, 学際企画 pp. 554-562 (1992)).
- 19) J. N. Chapman : J. Phys. D, Appl. Phys. **17**, 623 (1984).
- 20) J. Fidler : Inst. Phys. Conf. Ser. No. 93 **2**, 211 (1988).
- 21) K. Tsuno : Rev. Solid State Science **2**, 623 (1988).
- 22) I. R. McFadyen : EMSA Bulletin **22**, 64 (1992). (フレネル法応用論文は数が多いので集録していない。DPC 法と SEM 法に関する 1986 年までの論文は文献 21) に集録した。なお文献 21) の別刷は残部があるので請求されたい)。

(フーコー法)

- 23) S. J. Hefferman, J. N. Chapman and S. McVitie : J. Magn. Magn. Mat. **83**, 223 (1990).
- 24) S. McVitie and V. Hartmann : Proc. 49th EMSA, San Francisco Press, Ed. G. W. Bailey, 770 (1991).
- 25) J. N. Chapman, S. McVitie and S. J. Hefferman : J. Appl. Phys. **69**, 6078 (1991).
- 26) S. J. Hefferman, J. N. Chapman and S. McVitie : J. Magn. Magn. Mat. **95**, 76 (1991).
- (STEM 法)
- 27) S. McVitie and J. N. Chapman : Proc. XI Int. Conf. Electron Microscopy, Kyoto, 1735 (1986).
- 28) J. N. Chapman, S. McVitie and I. R. McFadyen : Scanning Microscopy Supplement **1**, 221 (1987).
- 29) S. McVitie and J. N. Chapman : IEEE Trans. Magn. **24**, 1778 (1988).
- 30) R. P. Ferrier, F. J. Mantin, T. C. Arnoldussen and L. L. Nummelley : IEEE Trans. Magn. **24**, 2709 (1988).
- 31) I. R. McFadyen : J. Appl. Phys. **64**, 6011 (1988).
- 32) J. N. Chapman : Materials Science and Engineering **B3**, 355 (1989).
- 33) K. Tsuno, M. Inoue and K. Ueno : Materials Science and Engineering **B3**, 403 (1989).
- 34) S. McVitie and J. N. Chapman : J. Magn. Magn. Mat. **83**, 97 (1990).
- 35) J. N. Chapman, I. R. McFadyen and S. McVitie : IEEE Trans. Magn. **26**, 1506 (1990).
- 36) I. R. McFadyen and I. A. Beardsley : J. Appl. Phys. **67**, 5540 (1990).
- 37) I. R. McFadyen and P. S. Alexopoulos : Science and Technology of Nanostructured Magnetic Materials, Edit. G. C. Hadjipanayis and G. A. Prinz, Plenum Press, New York, 99 (1991).
- (SEM 法)
- 38) L. Pogany, Z. Vertessy, Sz. Sandor and G. Konczds : Proc. XIth Int. Cong. Electron Microscopy, Kyoto, 1737 (1986).
- 39) R. P. Ferrier and S. McVitie : Proc. XIIth Int. Cong. Electron Microscopy, San Jose, San Francisco Press, 764 (1990).
- 40) R. P. Ferrier, S. McVitie and W. A. P. Nicholson : IEEE Trans. Magn. **26**, 1337 (1990).
- 41) R. P. Ferrier and S. McVitie : Proc. 49th EMSA, San Francisco Press, 766 (1991).
- 42) L. Pogany, K. Ramstock and A. Hubert : Scanning **14**, II-24 (1992).