

## 実時間（リアルタイム）ステレオ透過電子顕微鏡の開発

### Real-Time Stereo Transmission Electron Microscope

丹 司 敬 義  
Takayoshi Tanji

<sup>a</sup>名古屋大学

**要 旨** 透過電子顕微鏡を操作しながら、実時間でステレオ観察が可能なシステムを開発したので紹介する。システムは、電子線をNTSCビデオ信号と同期させて1/60秒毎に左右2方向から試料に照射し、同時に像をシフトする機構を備えている。得られたビデオ信号を左右の画像に分割し、ステレオモニターを用いることにより特別なメガネを使用せずに裸眼で立体感のある画像が得られる。ここでは、システムの概要と得られた結果を紹介する。

**キーワード**：TEM, ステレオ観察, 実時間立体観察, ステレオモニター

#### 1. はじめに

元来、2次元投影像しか得られない透過電子顕微鏡（TEM）を使って、3次元の情報を得たいという思いから、1930年代には既にステレオ観察が行われていた<sup>1)</sup>。現在でもステレオ観察は用いられているが、通常の方法では試料ステージを傾斜させ、試料を異なる方向から見た2枚の像を撮影しなければならない。その上で、2枚の写真焼き付けて専用のビューアーで観察する。一方、最近では、TEM用試料傾斜システムの精度向上と使いやすい再生ソフトウェアの開発により、コンピュータトモグラフィー（CT）も盛んに試み出されている。CTでは傾斜時の試料の位置ずれを試料ステージを微動したり、得られた像の相関をとったりして補正しながらバックプロジェクション法等で再構成する。試料ステージを機械的に傾斜するため、ステレオ法でも撮影から像観察まで数十分を要し、CTに到っては数時間から十数時間かかることも多い。高角度範囲で数多くの像を利用するCTはステレオ法よりも定量性に優れているが、試料が時間的に変化する場合などには対応できない。近年、多視点テレビの開発が進み、特殊なメガネ等が無くとも立体画像を見る事が出来るよ

うになってきた。これを機会にTEMでも実時間でステレオ観察が出来るシステムを開発したので報告する<sup>2,3)</sup>。通常、多視点テレビでは視点の数だけカメラを設置するのだが、TEMの場合、試料を透過してきた電子の散乱角が極めて小さく、像はほとんど一方向からの投影である。従って、仮に見込み方向の異なる2台以上のカメラを観察室に設置しても、互いのなす角度が大きければ電子が散乱されず十分な像強度が得られない。そこで、試料を照射する電子線の入射角を変え、正焦点付近で観察することにより、1台のカメラで視点の切り替えを行う。

#### 2. NTSC信号とビーム偏向信号

日本や北米、中南米で従来から使われているアナログ式テレビやビデオの方式がNTSC（National Television Standards Committee）信号で、インターレース方式である。これは525本の走査線のうち奇数番目だけを使った像と偶数番目だけを使った像とを1/60秒毎に交互にフィールド画像として取り込み1/30秒毎につくる1枚のフレーム画像が滑らかに変化するシステムである。カメラから出力された信号を図1に示す。この出力信号に、映像信号と、水平同期信号、垂直同期信号が図中に示すように含まれている。そこで、垂直同期信号と同期させて照射電子線を左右に振れば左右のステレオペア画像を1つのフレームとして取り込むことが出来る。ただし、電子線を振るのは1つのフィールドを記録し終わって垂直同期信号を検出してから次のフィールドを取り込み始めるまでに完了しなければならない。この間およそ1ミリ秒である。

#### 3. 偏向と照射・結像レンズシステム

かつて、テレビと同期して照射電子線を偏向しようとする試みがなされたことはあったが、実現していなかった<sup>4,5)</sup>。その理由は、もともと電子顕微鏡に組み込まれていた電磁式偏向系を用いようとしたことにある。本研究では、高速で電子線を偏向するために静電偏向器を導入した。傾斜電子線を照射する際、次の3点に留意しなくてはならない。

- ①電子線をできるだけ大きく傾斜すること。
- ②左右からの電子線が試料上の同じ点を照射すること。
- ③左右の像が混合しないこと。

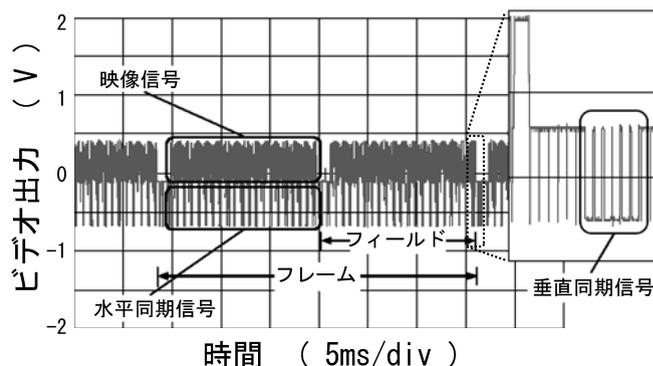


図1 NTSCビデオ信号

<sup>a</sup> 〒464-8603 名古屋市千種区不老町  
TEL: 052-789-4436; FAX: 052-789-3155  
E-mail: tanji@esi.nagoya-u.ac.jp  
2008年2月18日受付

④対物レンズの収差の影響を出きるだけ小さくすること。

以上の要請から、我々は図2の様な電子光学系を作製した。静電偏向器Aを第1集束レンズの手前、電子銃側に入れ、偏向器面と試料面が集束レンズ系の共役面(物面と像面)になるように焦点を調整する。これにより、電子線を傾斜しても同じ試料上の領域を照射することができる。ただし、偏向器1で実際に200 keVの電子線が受ける傾斜角は、印加電圧450 Vに対し0.08度であり、このままでは十分な立体感が得られない。そこで、対物レンズの前磁場を含む照射系を図3(a)のように約1/30の縮小系として使用することで、角倍率を30倍にし、±2.3度(40 mrad)の傾斜照射が得られることを電子回折像から確認した。ただしこれだけ傾斜すると、図3(b)のように、対物レンズの球面収差のため試料上の一点がガウス像面上では $\delta=2Cs\alpha(3\theta^2+\alpha)$ だけ広がってしまう。ここで、Cs、 $\alpha$ 、 $\theta$ はそれぞれ球面収差係数、試料への照射広がり角、中心ビームの傾斜照射角であり、結像系の倍率は1倍としている。しかし、対物レンズの焦点を $\Delta f=-Cs(3\theta^2+3/4\alpha^2)$ (アンダーフォーカス)にあわせると、最小錯乱円の位置で観察することができ、収差による広がりの影響をほぼ $\delta_s=1/4Cs\alpha^3$ にまですることができる。通常の観察

でよく用いられる $\alpha$ の小さな中倍率では問題にならない。しかしこの場合は、回折収差の影響が無視できなくなる。例えば $\alpha=5$  mradに対して回折収差は $\delta_d=\lambda/\alpha\approx 0.5$  nmとなる。そこで、Cs=1.6 mmの我々の装置で得られる横分解能は $\delta=\delta_s+0.61\delta_d\approx 0.35$  nmが期待される。また、振り角±2.3度の時、高さ分解能は5 nm以下になる。しかし、 $\Delta f$ の位置で得られる像はそのままでは光軸から外れてしまう。左右の像が画面の中でかけ離れてしまうと、画像を立体視する事が容易ではなくなる。そこで、図2に示すように、左右の画像を近づけるため静電偏向器Bを第1中間レンズの後ろ、制限視野絞りの位置に設置し、像の位置を調整できるようにした。この偏向器も偏向器Aと同様、記録用のテレビの垂直同期信号と同期させる必要がある。イメージインテンシファイアで増幅し、CCDカメラで取り込んだ信号は、左右のフィールドに分けて3Dステレオモニタに表示する。

#### 4. 3Dステレオモニタ

近年立体テレビの研究が進み、多視点表示モニタも格段の進歩を遂げている。既に市販されている3Dステレオモニタにもいくつかの方式があるが、我々が用いた方式の1つ、パララックスバリアタイプの原理を図4に示す。バックライトで照らされた左右のフィールドの像がその前面にあるバリアで片方がさえぎられ、モニタから適当な位置に立つ人の左右それぞれが対応した目にもみ入射するように設計されている。これらのモニタを用いることにより、アナグリフ(赤青像方式)や偏光法のように特殊なめがねを用いることなく裸眼で立体感のある画像をリアルタイムで観察できる。現在では、2視点のステレオ画像のみでなく、4視点、8視点とどんどん多視点のものが開発されている。

#### 5. 立体観察

立体感を感じるのに酸化亜鉛は適当な試料である。針状の突起部が1 $\mu$ m程度のテトラポット状のその結晶は金属亜鉛を空气中で燃焼させて作られる。図5は酸化亜鉛の微粒子を本システムで観察した例である。図5(a)は左右両方の像を混合した1フレームで、拡大してみると走査線ごとに像が入れ替わっているのがわかる(b)。このフレーム像から左右のフィールドを分離して取り出し、並べて表示したのが

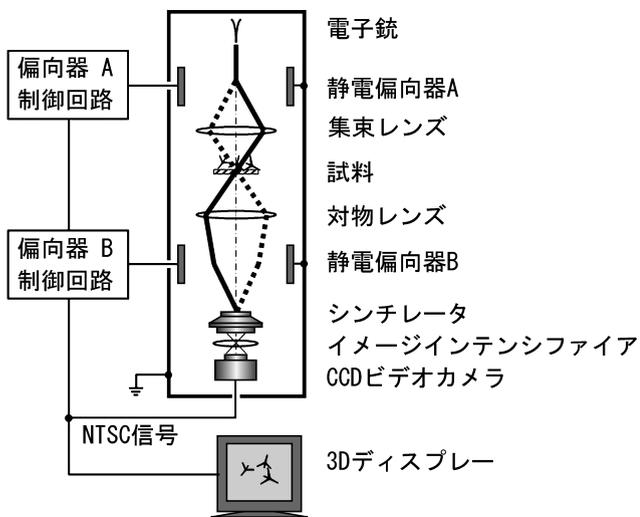


図2 実時間ステレオTEM光学系：集束レンズ上部と第1中間レンズ下部に装着された静電変更器はカメラの垂直同期信号と同期して電子線を偏向する。

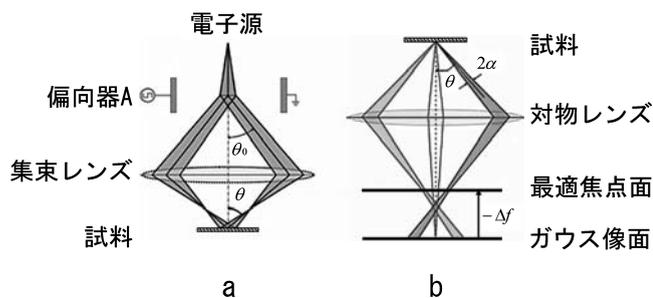


図3 照射光学系(a)と結像光学系(b)

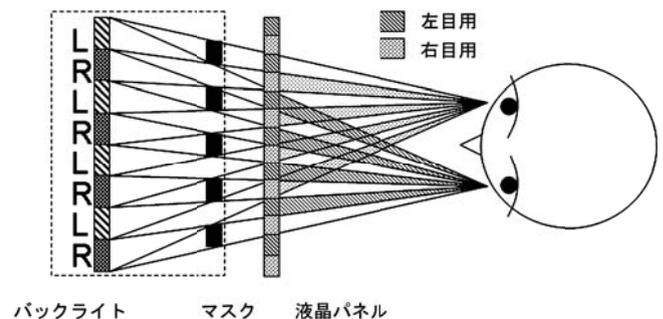


図4 パララックスバリア型ステレオモニタ

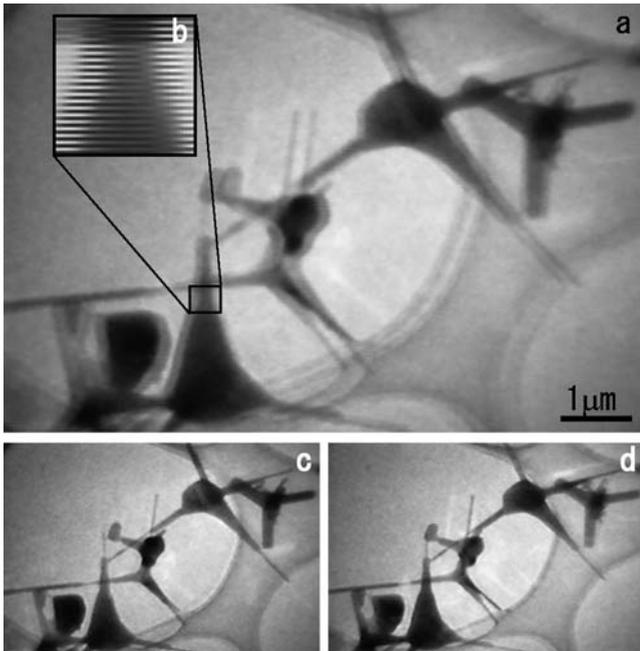


図5 酸化マグネシウムのステレオ画像。フレーム画像は、1ライン毎に左右の画像が混合することなく記録されている。分離された左右のフィールドを右目用(c)、左目用(d)として示す。

図5 (c, d) である。ここでは、交差法で立体感が得られるように、右目用を左(c)に、左目用を右(d)に配置している。裸眼立体視のできる方には、針状の突起が飛び出しているのが見えるであろう。この試料では、対物絞りを用いていないが、回折コントラストでの観察が中心となる格子欠陥等の研究では対物絞りは不可欠である。そこで、傾斜角に対応した位置に2つの穴を持つ対物絞りが必要となる。アルミニウム中の転位を本システムで観察した2組のステレオペアを図6 (a), (b) に示す。2組の撮影間隔は約1秒である。

転位をステレオ観察するには、ビームの傾斜に対し垂直方向に系統反射が起こるよう図6 (c) のような条件に結晶をおく必要がある<sup>6)</sup>。点線で囲まれた部分が回折像面上の同じ領域に対応する。試料の方位あわせが完全ではなく、一部左右の像で一致しないコントラストも見られるが、これらの像から、ステレオシステムが電子線照射によりドリフトしている試料にも適応し、その間に、転位の位置がわずかに変化していることがわかる。

## 6. おわりに

実時間で立体観察ができる透過電子顕微鏡システムを開発した。本システムは、CTの精度は持たないが、テレビレートで試料の変化を観察できる点、高速現象を観察する場合や、定量的精度は要求せず試料における前後関係のみがわかれば十分だという場合のみならず、試料のCTを実施したい場所の決定にも、電子顕微鏡を操作しながら立体感が得られるため極めて有効である。また、未だ実時間観察にはいたらないが、ステレオペアから高さを計測することにより得られる

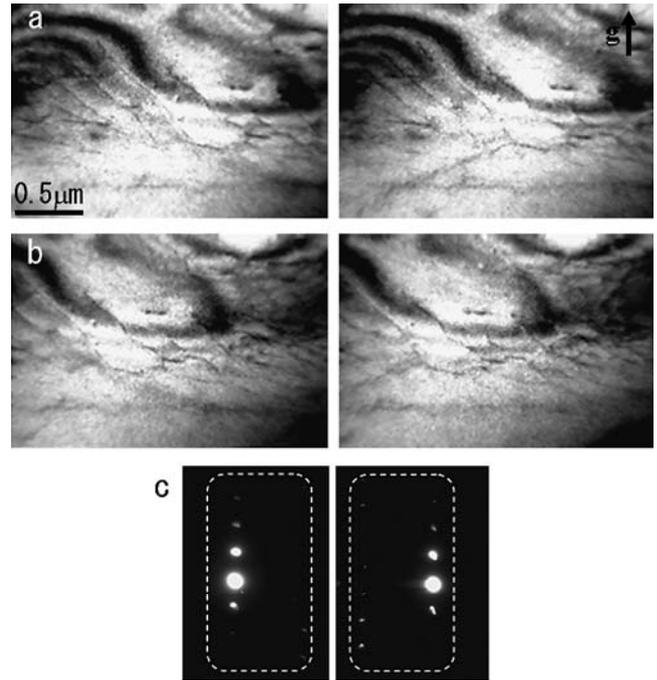


図6 Al薄膜の転位の観察：1秒間隔で撮影された2組のステレオペア (a), (b)、ステレオ照射時の回折像 (c)。

3次元プロットは、それぞれの時点におけるいろいろな角度からのイメージをビーム傾斜角の範囲で再生してくれる。現在のシステムは市販の電子顕微鏡を基に作製しているためビームの傾斜角が限定されているが専用の設計にすれば傾斜角は2倍程度にまで拡大することができ、さらに明瞭なステレオ画像が得られるシステムの構築が可能であると考えている。また、今回は、NTSC規格のインターレース方式をそのまま利用したが、ノンインターレース方式でも原理的には同じことなので、さらに高速度なカメラにより連続立体観察も可能である。ただし、高速度カメラ観察では、常に画像の明るさが問題となり、より高輝度の電子源と、より高感度なカメラの開発が不可欠である。本研究は文部科学省科学研究費補助金(課題番号14205008)の助成を受け、当時大学院学生であった田中展望、小島孝之両氏の協力のもと行ったものである。ここに記して感謝の意を表します。

## 文 献

- 1) von Ardenne, M.: *Electronen Ubermikroskopie*, Springer, Berlin, 1940, p. 281
- 2) Tanji, T., Tanaka, H. and Kojima, T.: *J. Electron Microsc.*, **54**, 215–222 (2005)
- 3) Tanaka, H., Kojima, T., Tsuruta, H., Chen, J., Tanji, T. and Ichihashi, M.: *J. Materials Science*, **41**, 2659–2665 (2006)
- 4) Typke, D., Hoppe, W., Sessler, W. and Burger, M.: *Proc. 6th Europ. Cong. on Electron Microsc.*, Jerusalem, 1976, p. 334–335
- 5) Fun, G.Y. and Ellisman, M.H.: *Ultramicroscopy*, **55**, 155–164 (1994)
- 6) 坂 公恭：結晶電子顕微鏡学，内田老鶴園，1997，194–197