

電子線ホログラムの実時間再生法の研究

八木晴久^{*1} 陳 軍^{*2}

Real-time electron hologram reconstruction system using a liquid crystal panel

Haruhisa Yagi^{*1} and Jun Chen^{*2}

A real-time electron hologram reconstruction system which enables us to observe the dynamics of microscopic electromagnetic field has been developed. In this system, a liquid crystal panel is used as a rewritable hologram medium. The interference pattern formed in an interference electron microscope is detected using a CCD camera and then sent to the liquid crystal panel. Experimental results for reconstructing electron holograms at the video rate are presented.

1. はじめに

電子線ホログラフィ¹⁾は微小な電磁場観察の有効な手段である。これは電子線ホログラフィの持つ位相情報を巧みに活用した方法で、この方法では、電磁場の等電位線や磁力線を干渉縞の形で可視化し、基礎物理学の分野だけでなく、高温超伝導体のミクロな磁氣的挙動の究明などにも応用されている。²⁻⁵⁾しかし、電子線ホログラフィはホログラムの記録と再生の2段階結像法で、ホログラムから位相情報を抽出するには、レーザ光を用いた光学再生¹⁾あるいは計算機を用いたデジタル再生⁶⁻⁸⁾の処理をしなければならない。光学再生の写真処理や、デジタル再生の数値計算に時間がかかるため、従来の電子線ホログラフィは電磁場の動的な観察が困難であった。ビデオに記録したホログラムからのデジタル再生や電子顕微鏡内の縞走査法^{9,10)}の開発により、処理時間が大幅に短縮されたが、その場での実時間観察はまだ実現されていない。一方、液晶素子には、透過する光の強度や位相分布を変調する特性がある。¹¹⁻¹³⁾このような液晶素子を電子線ホログラムの記録媒体として利用すると、電磁場の動的な挙動を実時間で観察できる¹⁴⁻¹⁶⁾。本研究では、液晶パネルを用いた実時間観察法の原理とシステムを述べ、さらに、この方法による磁束量子の動きを記録した電子線ホログラムの実時間再生実験の結果を述べる。

2. 電子線ホログラフィによる電磁場観察

2.1 電子線を用いた磁場観察の原理¹⁾

一様に磁化した磁性薄膜を通過した電子線の変化を図1に示す。磁場と垂直に入射された平行電子線は磁場に垂直にローレンツ力を受けて偏向する。電子の運動量を p 、磁性薄膜の厚さを t 、磁束密度を B 、電荷を e とすると磁性薄膜を通過した電子線の偏向角は $\alpha = eBt/p$ となる。この磁場の影

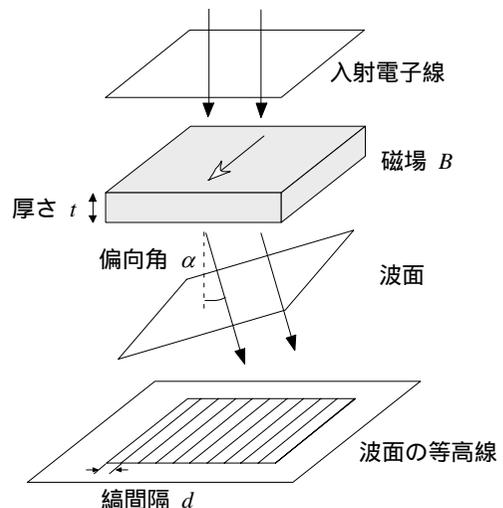


図1 磁場による電子線波面の変化

^{*1} 東京工芸大学大学院工学研究科光工学専攻

^{*2} 東京工芸大学工学部光情報メディア工学科助教授

2003年9月10日 受理

響で傾いた波面に、波面が観察面に平行な平面波を重ね合わせると、図1に示すような直線状の干涉縞が現れる。この干涉縞の方向は磁性薄膜内の磁場方向と一致する。一方、電子線を波として考えたとき、磁場を通過した間隔 d の2本の電子線間の位相変化 φ は

$$\varphi = -\frac{2\pi e}{h} \int_s B ds = -\frac{2\pi}{h} e B t d \quad (1)$$

となる。ただし、 h はプランク定数である。隣り合う2本の干涉縞間には、位相が 2π 変化するので、隣り合う干涉縞で挟まれた部分には、 h/e だけの磁束が流れていることになる。従って、観察される干涉縞は磁場分布の磁力線と見なせる。この干涉縞パターンを干涉顕微鏡像という。

2.2 電子線ホログラムの形成

電子線ホログラムの記録光学系を図2に示す。

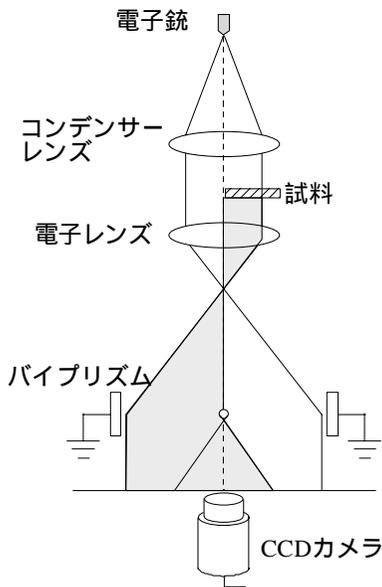


図2 電子線ホログラムの形成

光と違って、電子光学では干涉計を構成するミラーや半透鏡などの電子光学部品が存在せず、干涉実験のほとんどでは、電子線バイプリズムを用いる。電子線バイプリズムは2枚の接地電極と中央のワイヤー状の電極から構成されている。ワイヤーの両側に入射した電子線はワイヤーに印加された100V程度の正電位によって中央に引き寄せられて下方で

重なり合って干涉縞する。

図2において、試料を入射電子線の右半分領域に置き、左半分は参照波を通過させるのに用いる。試料を透過した物体波と真空領域を透過した参照波を重ね合わせて干涉させる。この干涉縞パターンを写真乾板に記録すれば、従来の電子線ホログラムになるが、実時間再生するためには、干涉縞パターンを蛍光板を介して CCD カメラで撮影し、カメラからのビデオ信号を再生部に送る。

簡単のため、物体波が観察面に対して垂直に入射し、参照波だけが斜め方向から入射したとすると、物体波と参照波はそれぞれ

$$u_o(x, y) = a_o(x, y) \exp[i\varphi(x, y)] \quad (2)$$

$$u_r = \exp(i\frac{2\pi}{\lambda} \sin\theta) \quad (3)$$

となる。ただし、 $a_o(x, y)$ は物体波の振幅、 $\varphi(x, y)$ は被検物体による位相変調、 λ は電子線の波長で、 θ は物体波と参照波の成す角である。また、参照波は真空中を通過するので、その振幅を1とした。形成される干涉縞の強度分布は

$$I(x, y) = a_o^2(x, y) + 1 + 2a_o(x, y) \cos[2\pi f x + \varphi(x, y)] \quad (4)$$

となる。ただし、 $f = \sin\theta/\lambda$ は干涉縞の空間周波数である。バイプリズムを用いた干涉計で形成される干涉縞パターンは、試料による位相分布が直線状のキャリア縞に変調され、電磁場の分布を示していない。本研究では、このような干涉縞パターンをビデオ信号として液晶パネルに送り、一定の角度を持った二本のレーザー光で照射し、その場・実時間で、電磁場分布を表す干涉顕微鏡像を形成することを目指している。

3. 液晶パネルの位相変調特性

まず、本研究のキーデバイスである液晶パネルの位相変調特性を計測した。実験に用いた液晶パネルは市販の液晶プロジェクター (EPSON VPJ-2000) から取り出したもので、26.88mm x 20.2mmの表示部に、480 x 440個のツイストネマティック液晶画素が配列されてある。

ツイストネマティック液晶素子の構造を図3に示す。液晶分子は2枚の透明電極と配向膜がついたガラス基盤の間に封入されていて、液晶素子に電圧

が印加されていない時には2枚のガラス基板の間で90度ねじれている。しかし、透明電極を通して電圧を印加すると、液晶分子は光軸と平行になる方向に回転する。液晶プロジェクターや液晶ディスプレイでは、透過光の偏向方向を回転させる旋光性が利用されている。一方、液晶分子の持つ複屈折性により、印加電圧によってその屈折率が変わり、透過光の位相を変調できる。

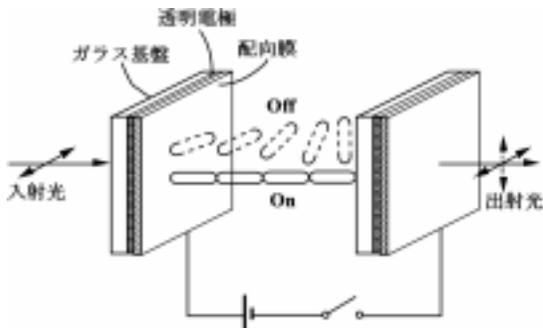


図3 液晶素子の構造

図4に示すマッハ・ツェンダー干渉計を用いて液晶素子の位相変調特性を計測した。位相変調を計測する際、液晶パネルには、パソコンで形成したグラデーションパターンを入力して、透過光の位相分布を計測した。干渉縞パターンをCCDカメラで撮像してパソコンに取り込み、フーリエ変換法を用いて位相分布を導出した。

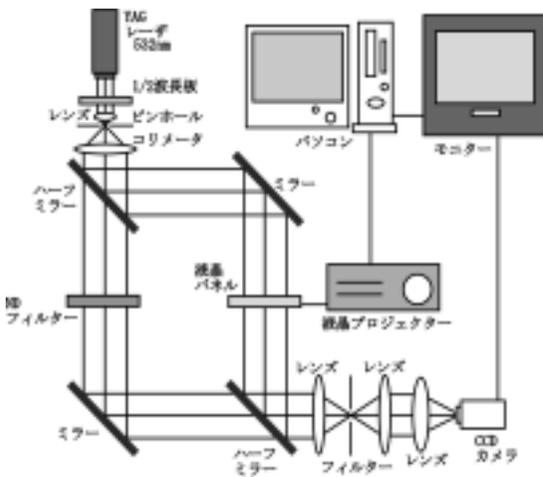


図4 位相変調特性の測定システム
液晶パネルに入力した画像を図5に示す。計測で

得られた位相分布のラインプロファイルを図6に示す。最大の位相変化量は1.55rad程度であった。印加電圧を増やしていくと位相の変化量は小さくなっていくことがわかる。とくに、200~400ピクセルの範囲では、ある程度、線形的に位相が変化している。実時間再生に用いるにはある程度、線形的に変化する領域を使う必要がある。

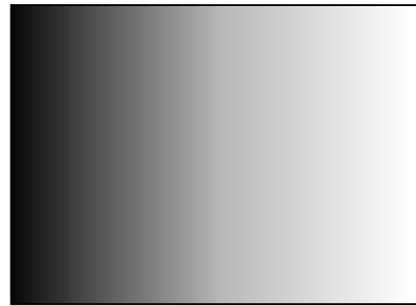


図5 入力画像

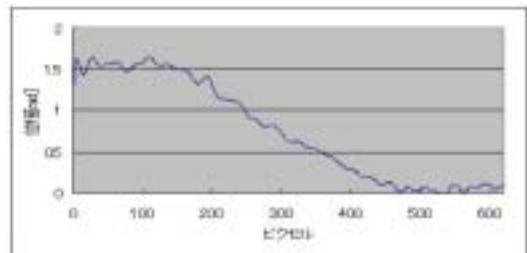


図6 液晶素子の位相変調特性

4. 液晶素子を用いた電子線ホログラムの実時間再生の原理とシステム

4.1 原理

液晶素子に電子線ホログラムの画像信号を入力すると、液晶素子の各画素にホログラムに対応した電圧が印加され、液晶分子の向きが変化する。そのため、液晶素子は位相型ホログラムとして使用できる。また偏光板を併用すれば、振幅型ホログラムとしても機能するが、位相型は光の吸収が少なく回折効率が高いため、再生像が明るい。そのため、本研究では位相型を用いた。(4)式のホログラムの信号を入力した時の液晶素子の複素透過率は虚数単位 i を使用して

$$t(x, y) = \exp\{i[1 + a_0^2(x, y) + 2a_0(x, y)\cos[2\pi f_0 x + \phi(x, y)]]\} \quad (5)$$

となる。ただし、簡単化のため、比例係数は省略した。この式を変形すると

$$t(x, y) = \sum_{-\infty}^{\infty} i^n J_n(2a) \exp\{in[\phi(x, y) + 2\pi f_0 x]\} \quad (6)$$

となる。ただし、 J_n はベッセル関数である。各項は対応する回折光を意味し、 $\pm n$ 次の回折光を干渉させれば、 $2n$ 倍位相増幅した干渉顕微鏡像

$$I_{-n, n} = 2J_n^2(2a) \{1 + 2\cos[2n\phi(x, y)]\} \quad (7)$$

が得られる。

4.2 実時間再生システム

実時間再生に用いた光学系の構成を図7に示す。

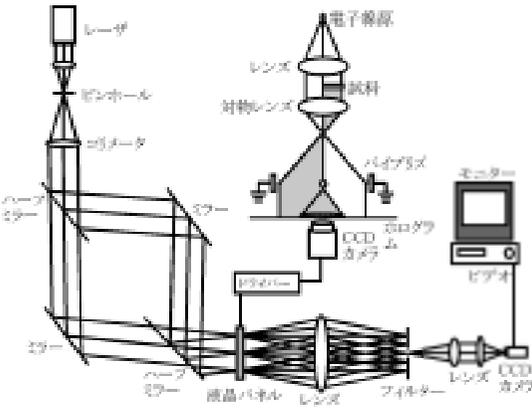


図7 実時間ホログラフィシステム

このシステムは図2の電子線ホログラム形成部と再生部の2つで構成される。ホログラム形成部は電界放射型電子銃を装備した透過型電子顕微鏡(HF-2000、加速電圧200kV)とTVカメラからなる。再生部はマッハ・ツェンダー干渉計と2重回折光学系からなる。ホログラム形成部から送られてきたビデオ信号を液晶パネルに入力すると液晶パネルには干渉縞の強度分布に対応する電圧が印加される。マッハ・ツェンダー干渉計から出射する2平面波で液晶パネルを照射すると、それぞれの入射光に対応する回折光が得られる。これをレンズでフーリエ変換して空間フィルターで再生光を選択し、逆フーリエ変換して像を得る。この時フィルターで一

方の再生物体光ともう一方の透過光を選ぶと干渉顕微鏡像が得られる。また、高次の再生光と共役再生光を選ぶと位相増幅干渉顕微鏡像が得られる。CCDカメラで撮影しモニタに表示して動的な観察をした。

4.3 磁束量子の観察

開発したシステムの有効性を確かめるため、日立基礎研究所外村グループで記録した磁束量子のホログラム⁴⁻⁵⁾を用いて再生実験を行った。通常超伝導体に磁場を加えるとマイスナー効果により磁力線は超伝導体を迂回する。しかし強い磁場を掛けた場合や超伝導体が非常に薄い場合には磁力線が超伝導体を貫き表面から磁力線がでる。これが磁束量子である。磁束量子は超伝導体中で現れる磁束の最小単位で、その磁束量は $2 \times 10^{-15} \text{Wb}$ と極めて小さい。そして、その形状は直径 $0.1 \mu\text{m}$ の細い糸状をしている。記録の実験では4.5Kに冷やした鉛薄膜を使用した。その観察原理図を図8に示す。4.5Kに冷やした鉛薄膜に磁場を印加して薄膜表面から生じた磁束量子に電子線をあてる。このような形

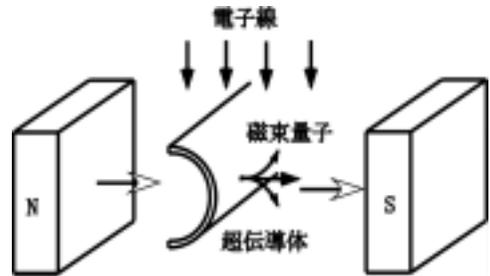


図8 磁束量子観察実験の概念図

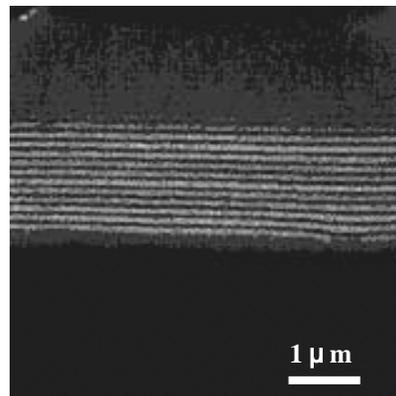
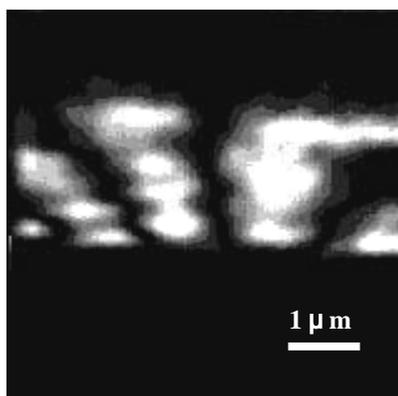
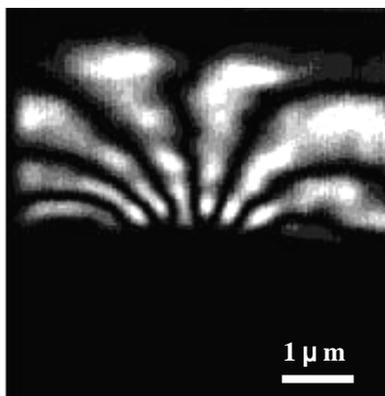


図9 電子線ホログラム

で記録された動的に変化するホログラムの映像の1コマを図9に示す。キャリア干渉縞が存在するため、図9のホログラムからは磁束量子の様子は観察できない。ホログラムのビデオ信号を液晶素子に表示すると動的に変化する干渉顕微鏡像が得られる。この干渉顕微鏡像の1コマを図10に示す。図(a)はホログラム再生時に0次光と+1次光を重ねて干渉させて得られた像で、図(b)は±1次光を用いて得られた2倍位相増幅像である。画面下部の黒い部分は鉛薄膜である。図10の再生像を見てみると薄膜を貫いた磁力線が表面から湧き出ている様子が見える。また位相増幅像では縞の間隔が半分になり縞の本数が増えていて、小さな領域から空間に広がっているのがわかる。



(a) 干渉顕微鏡像

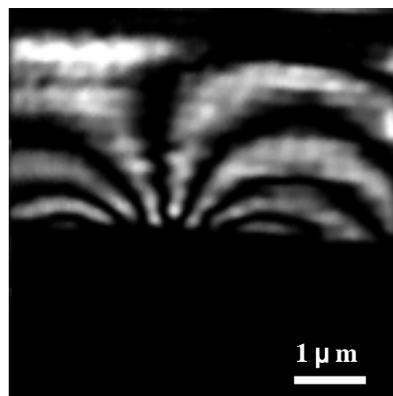


(b) 2倍位相増幅像

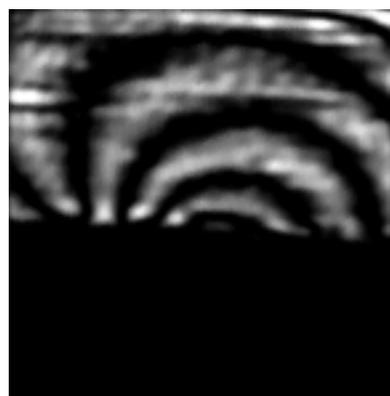
図10 干渉顕微鏡像

さらに同じシステムで4.5Kに冷やされ超伝導状態の鉛薄膜に強い磁場をかけて臨界温度まで上げていった時のホログラムビデオを再生し、一連の干渉顕微鏡像をビデオ映像として記録した。その干渉

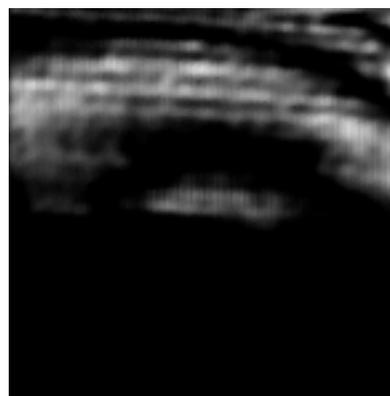
顕微鏡像の動的な変化の3コマを3秒間隔で図11に示す。図(a)は4.5Kで超伝導状態のもので、(b)はその3秒後で温度を上げていく中間状態で、(c)は臨界温度まで上げた時のものである。超伝導状態に



(a) 超伝導状態(0s)



(b) 中間状態(3s)



(c) 臨界温度の状態(6s)

図11 磁束量子の動的観察

あった時は表面の小さな領域から磁力線が空間に広がっていたが、臨界温度に近づくにつれて磁力線が左に動き出し臨界温度になった時には2本の磁力線つながって太くなっていることがわかる。

5. まとめ

空間的な位相変調特性を持つ液晶パネルを電子線ホログラムの書き換え可能な媒体として利用し、キャリア縞で変調される電子線ホログラムをビデオレートで再生し、干渉顕微鏡像を実時間で形成できるシステムを開発した。開発したシステムを用いて超伝導体を貫く磁束量子の動的な観察を行い、この方法の有用性を示した。今回の再生実験はビデオテープに記録したホログラムを使用した。電子顕微鏡に取り付けたTVカメラからの信号を直接再生部に送れば、その場での実時間観察が可能となる。

干渉顕微鏡像の画質と観察可能な磁力線の数は液晶素子の画素数やTV撮像系の走査線数に依存するため、高精細の液晶素子やハイディフィニション撮像システムを用いれば、システムの性能がさらに向上できる。

このシステムは、従来困難なその場での電磁場観察を可能にただけでなく、電磁場変化のダイナミックスの観察をも可能にした。磁性体観察を通して、材料科学などの分野で重要な役割を果たすものと期待される。

実験で使用した電子線ホログラムビデオは日立基礎研究所フェローの外村彰博士によるもので、外村彰博士にこころから感謝する。

参考文献

- 1) A. Tonomura, Rev. Mod. Phys. **59** (1987) 639.
- 2) A. Tonomura, H. Kasai, O. Kamimura, T. Matsuda, K. Harada, Y. Nakayama, J. Shimoyama, K. Kishio, T. Hanaguri, K. Kitasawa, M. Sasase, and S. Okayasu, Nature **412** (2001) 620.
- 3) T. Matsuda, O. Kamimura, H. Kasai, K. Harada, T. Yoshida, T. Akashi, A. Tonomura, Y. Nakayama, J. Shimoyama, K. Kishio, T. Hanaguri, K. Kitasawa, Science **294** (2001) 2136.
- 4) A. Tonomura, N. Osakabe, T. Matsuda, T. Kasawaki, J. Endo, S. Yano, and H. Yamada, Phys. Rev. Lett. **56** (1986) 792.
- 5) T. Matsuda, S. Hasegawa, M. Igarashi, T. Kobayashi, M. Naito, H. Kajiyama, J. Endo, N. Osakabe, and A. Tonomura, Phys. Rev. Lett. **62** (1989) 2519.
- 6) M. Takeda and Q. Ru, Appl. Opt. **24** (1985) 3068.
- 7) Q. Ru, T. Matsuda, A. Fukuhara, and A. Tonomura, J. Opt. Soc. Am. A **8** (1991) 1739.
- 8) T. Hirayama, J. Chen, Q. Ru, T. Tanji, and A. Tonomura, J. Electron Microsc. **43** (1994) 190.
- 9) Q. Ru, J. Endo, T. Tanji, and A. Tonomura, Optik **92** (1992) 51.
- 10) 遠藤潤二, 和田恭雄, 藤田博之, 陳軍, 電気学会論文誌 (E) 平成 12 年 6 月号(2000) 285.
- 11) T. H. Barnes, T. Eiju, K. Matsuda, and N. Ooyama, Appl. Opt. **28** (1989) 4845.
- 12) J. Amako and T. Sonehara, Appl. Opt. **30** (1991) 4622.
- 13) N. Hashimoto, S. Morokawa and K. Kitamura, Proc. SPIE, **1461** (1991) 291.
- 14) J. Chen, T. Hirayama, G. Lai, T. Tanji, K. Ishizuka, and A. Tonomura, Opt. Lett. **18** (1993) 1887.
- 15) J. Chen, T. Hirayama, T. Tanji, K. Ishizuka, and A. Tonomura, Opt. Commu. **110** (1994) 33.
- 16) T. Hirayama, J. Chen, T. Tanji, and A. Tonomura, Ultramicroscopy **54** (1994) 9.