

試料中のポテンシャル分布計測のための要素技術開発

表界面構造・物性ユニット

三石 和貴

1. 背景・目的

電子線ホログラフィー法は、通常の電子顕微鏡観察では失われている透過電子の位相情報を取得し、試料の電位・磁場分布を計測可能な手法として広く用いられている。本研究では「試料中のポテンシャル分布計測のための要素技術開発」として、新しい電子線ホログラフィーの手法、試料走査電子線ホログラフィーの位相再生手法に関して検討をおこなった。試料走査電子線ホログラフィーでは、試料を保持するステージを微動しつつホログラムを取得するもので、ホログラム面を列状の検出器（もしくは CCD の対応する列）で検出しそれを並べることで、準実時間的に位相像を得ることが出来るほか、各試料位置でそれぞれ 2 次元のホログラムを取得することで、縞走査法と本質的には同様のデータを取得することが出来る<sup>1-4</sup> (図 1)。この手法では縞走査法と異なり光軸が固定であるためフォーカスずれによる像ずれの問題や収差の影響がなく高分解能への応用が期待される。本研究では得られるデータを縞走査法で得られるデータとの比較によりそのデータの違いと、試料走査によって得られたデータに適した位相再生法を検討する。

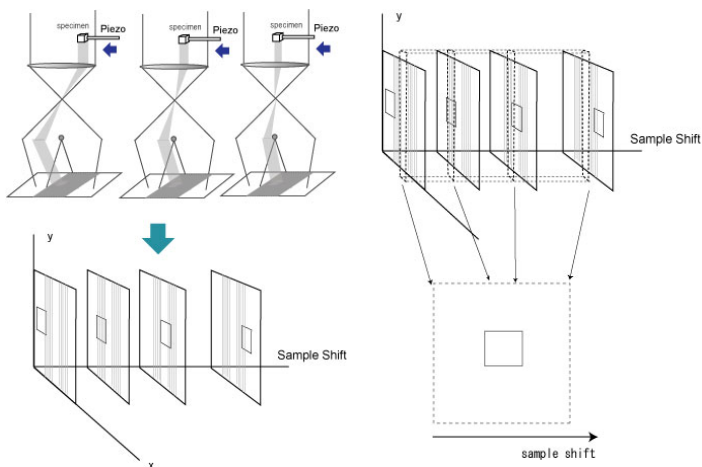


図 1. 試料走査の模式図。(右) それぞれの試料位置ごとにホログラムを取得、とある位置での強度を並べ替えることによって、位相像を得ることが出来る(左)

2. 研究成果

準実時間位相計測法

図 2 に、縞走査法と試料走査によって得られるデータの模式図を示す。青枠で示した試料は、試料による位相変化のため、縞の位置がずれている。その試料が試料走査により移動することで、位相がずれた位置も移動していく。赤枠位置に列状の検出器を配置し、得られた強度をスキャン位置に対して並べていくことで、位相の Cos 像を得る事が出来る。

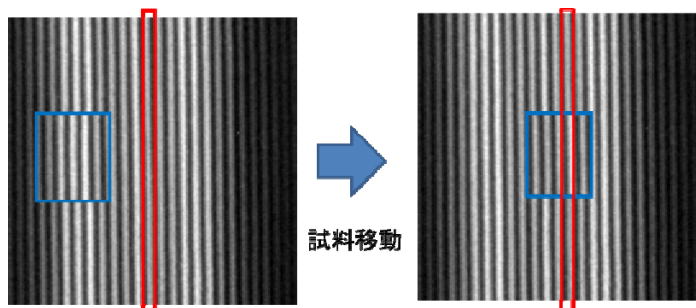


図 2. 試料走査ホログラフィーによって得られる干渉縞の模式図。

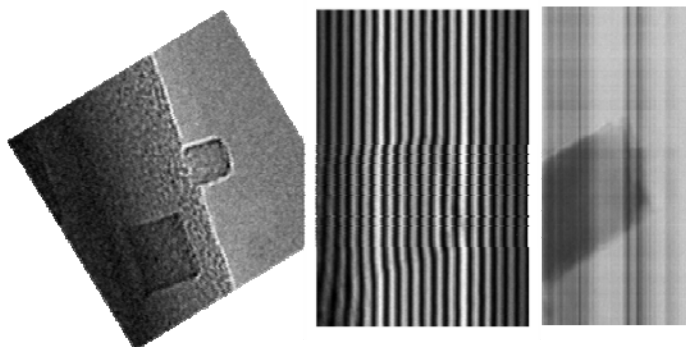


図 3. MgO 微結晶の試料走査により得られた位相の例。TEM 像 (左)、干渉顕微鏡像 (中央)、位相像 (右)

### 縞操作法の回復法による精密位相回復

図 4 に、試料走査法と、縞走査法と、得られるデータの模式図を示した。縞走査法では、入射電子を傾斜していくことで縞が動いていくのに対して、試料走査では縞の位置は固定されており、試料が移動する。得られたホログラム面 2 次元、試料走査ステップ 1 次元の計 3 次元のデータは、試料位置を同じになるようにずらしていくと縞走査法と同様のデータになるが、現実にはホログラム面で切り取られる領域が大きくなるためこの再生法は適当でない(図 5①)。我々は、代わりに各ステップ毎に試料位置がそろそろように、ステップ方向にずらす方法を考案した (図 5②)。この方法では得られる像の分解能は試料移動のステップ幅で決まるため、CCD の分解能には無関係であり、再生に用いるホログラムの範囲は狭くともよいという特徴がある。並び替えたデータセットに対して、縞走査法と同様の処理を行うことで位相物体以外に対しても再構成を行うことが出来る。

図 6 は MgO 微結晶に対する適用例である (黒線)。並び替えた強度に ArcCos 関数を適用した

だけの方法(青点線)では振幅変化のために位相が実際よりも低く見積られるが、本手法によって通常用いられている FFT 法 (赤一点鎖線)と同様の結果を得ることが出来ている。また、より広いフリンジを用いても同様の値に位相回復が出来ており (緑点線)、試料走査法のメリットを生かした実験条件での観察が可能となることが期待される。

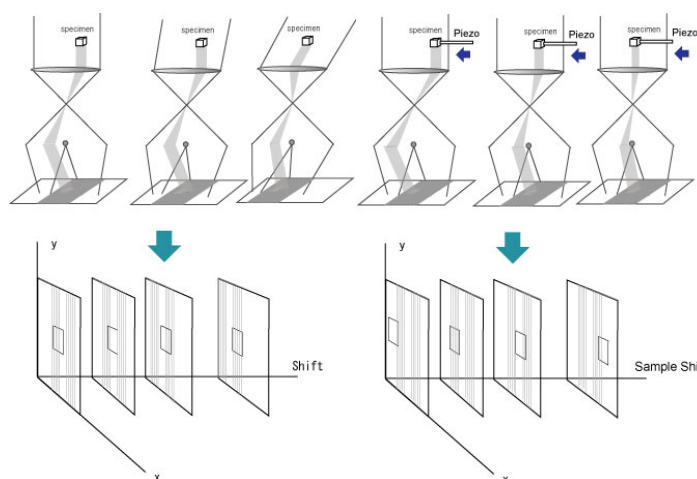


図 4. 縞走査法 (左) と試料走査 (右) による得られるデータの模式図.

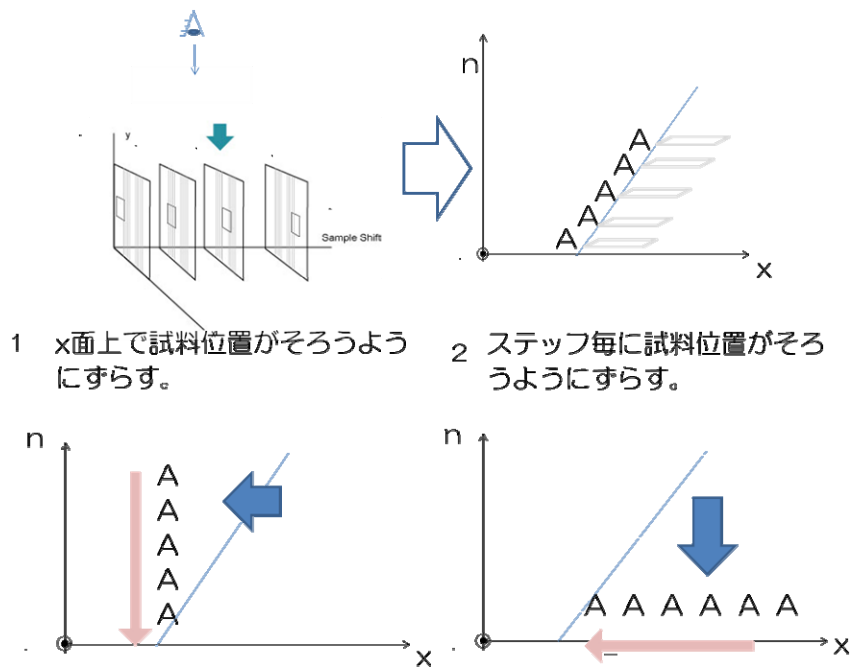


図 5. 縞走査法の回復手法による位相再生を行うためのデータ変換方法の模式図。

### 3. 展望

試料走査法は高分解能においてそのメリットが期待される。また、試料の移動幅を検出器のピクセルサイズ以下に取ることによって、超解像の手法も適用出来る。今後、実験によってそれらのメリットを実証していきたい。

#### 参考文献

- 1) D. Lei, K. Mitsuishi, K. Harada, M. Shimojo, D. Y. Ju, and M. Takeguchi, *Materials Science Forum.* 750 (2013) 152-155.
- 2) Q. Ru, G. Lai, K. Aoyama, J. Endo and A. Tonomura (1994) *Ultramicroscopy.* 55: 209-220.
- 3) Dan Lei, Kazutaka Mitsuishi, Ken Harada, Masayuki Shimojo, Dongying Ju, Masaki Takeguchi, *Jpn. J. Appl. Phys.* 53 (2014) SI 02BC23.
- 4) Dan Lei, Kazutaka Mitsuishi, Ken Harada, Masayuki Shimojo, Dongying Ju, Masaki Takeguchi, "Super-resolution phase reconstruction technique in electron holography with a stage-scanning system", *Microscopy* 62 (2013) 563-570.

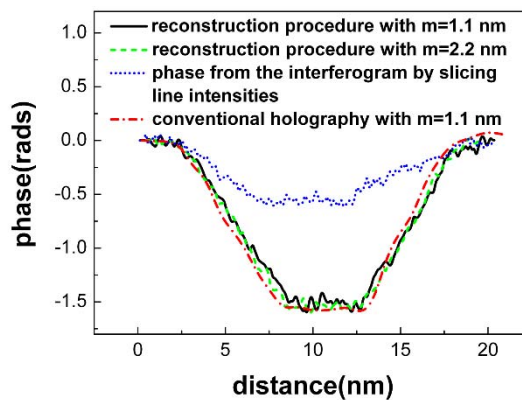


図 6. 縞走査法の回復手法の MgO への適用例