

## 論文審査の結果の要旨および担当者

報告番号	※ 甲	第 11070 号
------	-----	-----------

氏 名 石田 高史

### 論文題目

走査透過電子顕微鏡における環状照明及び環状検出器を用いた位相再生法に関する研究

### 論文審査担当者

主査	名古屋大学	教授	丹司 敬義
委員	名古屋大学	准教授	田中 成泰
委員	名古屋大学	教授	武藤 俊介
委員	名城大学	教授	児玉 哲司

## 論文審査の結果の要旨

石田高史君提出の論文「走査透過電子顕微鏡における環状照明および環状検出器を用いた位相再生法に関する研究」は電子の波が試料中で受ける位相変化を透過型走査電子顕微鏡 (STEM) を用いて画像化するもので、従来理論的に考案されていたものを初めて実際の電子顕微鏡を用いて実現したものである。電子の位相変化を可視化する手段としては、電子線ホログラフィーがよく知られているが、電子線ホログラフィーは原理的にオフライン結像システムであるのに対し、本技術は、走査時間 1、2 秒のタイムラグはあるものの、画像信号のハードウェア処理によるオンラインシステムである。

論文は、第 1 章と第 2 章で背景と電子顕微鏡の基本的な結像理論について述べた後、第 3 章で、本環状明視野位相法による波面再生の原理と環状照明やフィルターリングの効果について詳しく検討している。そして、

第 4 章では、位相差走査透過電子顕微鏡法実現のための、装置開発及びその装置を使った実際の結晶性試料での波面再生について述べている。装置開発では、自身で特殊な絞りを設計して集束イオン加工装置で精密に製作することで環状照明を可能とした。また、検出器はオプティカルファイバーの端面を利用することによって 31 分割の環状アレイ検出器を実現し、5 台の多チャンネル同時サンプリング A-D 変換器を用いた並列処理でオンライン処理を可能としているが、これは卓越したアイデアである。

また同章では、高分解能位相再生が可能なることをグラファイトの結晶で示し、再生像のコントラストについて円環絞りと焦点位置の像への影響、及び試料の  $z$  軸方向における位置の推定等を議論している。また、SrTiO<sub>3</sub> 結晶の試料を用いた実験では酸素の原子列が観察できることも示している。酸素の原子列の観察は、世界でも数が少なく、本手法の有効性をよく示している。

第 5 章では、結晶中の動力的電子回折理論と雑音の効果を取り入れたイメージシミュレーションにより再生波面の定量性について議論している。そこでは、単原子による位相変化量は本技法用いた場合原子番号のほぼ 0.6 乗に比例すること、厚さ 6nm 以下の試料では酸素原子あるいは酸素空孔の 1 つ 1 つの計数が可能であることなど、原子数や原子空孔数の定量評価の限界までを丁寧に網羅している。

以上のように、本論文の学術的価値は高く、この成果は、電子顕微鏡のみならず、顕微鏡学全般の発展に貢献し、物性・材料・生体・高分子等の研究に大きく寄与すること考えられ、石田高史君は、博士 (工学) として十分な資格を有すると判断した。