

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	多極子のコンビネーション収差を用いた透過型電子顕微鏡の軸上収差補正に関する研究
Title(English)	
著者(和文)	細川史生
Author(English)	Fumio Hosokawa
出典(和文)	学位:博士(理学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第10615号, 授与年月日:2017年9月20日, 学位の種別:課程博士, 審査員:三宮 工,吉本 護,舟窪 浩,北本 仁孝,中村 吉男,大島 義文
Citation(English)	Degree:Doctor (Science), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第10615号, Conferred date:2017/9/20, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Category(English)	Doctoral Thesis
種別(和文)	論文要旨
Type(English)	Summary

論文要旨

THESIS SUMMARY

専攻： Department of	物質科学創造	専攻	申請学位 (専攻分野)： 博士 Academic Degree Requested Doctor of	(理学)
学生氏名： Student's Name	細川史生		指導教員 (主)： Academic Advisor(main)	三宮 工
			指導教員 (副)： Academic Advisor(sub)	北本 仁孝

要旨 (和文 2000 字程度)

Thesis Summary (approx.2000 Japanese Characters)

電子顕微鏡の解像力は、レンズの球面収差および色収差により制限される。これらの収差は、光軸に対して回転対称の電磁場レンズを用いた場合、必ず正の収差係数を持って発生するため、収差補正には多極子を用いた手法が提案されてきた。しかしながら、これまでは光学的に対称な限られた系での収差補正法のみが議論されてきた。そこで本研究では、任意の多極子の組み合わせで発生する収差を一般的に取り扱い、新たな球面収差および色収差の補正方法を開発した。

第 1 章の「本研究の目的とその背景」では、電子顕微鏡の材料開発における重要性と、軸対称電磁場レンズの球面収差と色収差が電子顕微鏡の分解能を制限していることを述べ、本研究の目的が収差補正光学系において任意の収差を表記する一般式の導出と、高分解能を達成する収差補正系の実現であることを述べた。

第 2 章の「電子顕微鏡の収差と分解能の定義」では、電子顕微鏡の結像理論と分解能の定義について述べている。TEM および STEM それぞれの結像手法の違いを交えて説明し、電子顕微鏡像に含まれる情報は、光学系のみならず試料内での電子散乱に影響されることに言及した。

第 3 章の「多極子展開とコンビネーション効果による収差の汎用表記」では、多極子の光学系における任意の幾何収差と波面収差を表記する一般式を導出した。波面収差は、電磁場ポテンシャルの円筒座標系におけるフーリエ級数展開に対応し、多極子の基底関数として表現可能である。また、二つの光学素子が離れて存在する場合に発生するコンビネーション収差について、任意の多極子場のコンビネーションを表記する一般式を導出した。

第 4 章の「非対称磁場 6 極子による球面収差補正」では、磁場 6 極子のプライマリー効果とコンビネーション効果について説明し、コンビネーション収差として負の球面収差項が現れ、対物レンズの正の球面収差の補正が可能であることを示した。導出した収差の一般式をもとに、非対称な収差補正光学系を提案し、これまで提案されていた対称系よりも、高次収差の低減により高分解能化が可能なことを明らかにした。さらに非対称光学系の実用的な設計指針について述べた。

第 5 章の「300kV 球面収差補正光学系の開発」では、非対称 2 段 6 極子を用いた収差補正装置を実機搭載し、電子顕微鏡の高分解能化を実現したことについて述べた。透過型電子顕微鏡、走査型透過電子顕微鏡のいずれにおいても収差が補正され、非対称系により高次収差が低減できることを実証した。開発された 300kV 電子顕微鏡では 0.05nm を切る空間分解能が実現された。

第 6 章の「電磁場重畳 4 極子による色収差補正」では、2 段電磁場重畳 4 極場を用いた色収差補正について述べた。収差の一般式を用いて、4 極場により凹レンズを生成することができ、対物レンズの色収差補正が可能である。凹レンズの負の色収差を効率よく抽出するため、電磁場を重畳することを提案し、電磁場重畳 4 極子による色収差補正装置を設計した。設計された色収差補正器を 30kV 電子顕微鏡に搭載し、色収差が補正されたことを示した。

第 7 章の「収差補正電子顕微鏡の像のシミュレーション」では、収差補正電子顕微鏡で得られる像の計算に関して述べた。伝達関数を高次収差まで含めて表記し、奇数対称と偶数対称の収差の像への影響を議論した。また、計算負荷の大きい、複数の収差係数を含めたマルチスライス像シミュレーションを、GPU を用いて高速化したことについて述べた。

第 8 章での「結論」では、本研究を総括し、多極子のコンビネーション収差を用いて非対称な系でも球面収差が可能であること、また電磁場重畳 4 極子により色収差補正が可能であることを明らかにした。将来的にさらなる高次収差補正が必要な際にも、本研究の成果を適用することで電子光学系の開発指針が得られることを示した。

備考：論文要旨は、和文 2000 字と英文 300 語を 1 部ずつ提出するか、もしくは英文 800 語を 1 部提出してください。

Note：Thesis Summary should be submitted in either a copy of 2000 Japanese Characters and 300 Words (English) or 1copy of 800 Words (English).

注意：論文要旨は、東工大リサーチリポジトリ(T2R2)にてインターネット公表されますので、公表可能な範囲の内容で作成してください。

Attention: Thesis Summary will be published on Tokyo Tech Research Repository Website (T2R2).

論文要旨

THESIS SUMMARY

専攻 : Department of	物質科学創造	専攻	申請学位 (専攻分野) : Academic Degree Requested	博士 Doctor of	(理学)
学生氏名 : Student's Name	物質科学創造		指導教員 (主) : Academic Advisor(main)	三宮工	
			指導教員 (副) : Academic Advisor(sub)	北本仁孝	

要旨 (英文 300 語程度)

Thesis Summary (approx. 300 English Words)

The spatial resolution of electron microscopes has been limited by spherical aberration (C_s) and chromatic aberration (C_c), which have inevitably positive values when a round electromagnetic lens is used. Therefore utilization of multipole fields has been proposed to correct these aberrations. However, to date, no generic formalism has been established to describe the aberrations originating from the combination of multipoles. The purpose of this study is to derive such generic formalism of aberrations, and to develop a new C_s and C_c correction methods.

Firstly in this study, the aberrations of different orders and symmetries are classified according to the multipole expansions of an electromagnetic potential. Combination aberrations, which are introduced when two or more aberration sources are placed with an optical distance, are also expressed in a generic manner. All these formalisms enables to design aberration correctors.

Based on the above established theory of combination aberrations, an asymmetric C_s corrector was designed which consists of two long hexapole fields with a different length and strength. This corrector was mounted on a 300 kV (scanning) transmission electron microscope, which showed C_s corrected optics and achieved spatial resolution of 0.05 nm.

The combination formula also suggests a possibility to create a concave lens by using long quadrupole fields. This finding lead to design a C_c corrector with quadrupole electric field superposed to the magnetic quadrupole in order to generate large negative C_c . The performance test on a 30 kV TEM showed that original C_c value of 0.6mm is perfectly corrected.

Image simulation of aberration corrected electron microscopes has also been performed. To do so, a transmission cross coefficient including all the aberrations was derived to evaluate the partial coherence. Since the inclusion of all the aberrations largely increases the computational load, graphics processing unit (GPU) has been introduced in the developed image calculation program. In the most effective case, the calculation of the transmission cross coefficient was 500 times faster than that with the conventional central processing unit.

In conclusion, generic formalism of aberration correction using combination aberrations of multipoles have been established and applied to the development of practical C_s and C_c correctors. This achievement can be a guideline for higher order aberration correctors in the future.

備考 : 論文要旨は、和文 2000 字と英文 300 語を 1 部ずつ提出するか、もしくは英文 800 語を 1 部提出してください。

Note : Thesis Summary should be submitted in either a copy of 2000 Japanese Characters and 300 Words (English) or 1copy of 800 Words (English).

注意 : 論文要旨は、東工大リサーチリポジトリ(T2R2)にてインターネット公表されますので、公表可能な範囲の内容で作成してください。

Attention: Thesis Summary will be published on Tokyo Tech Research Repository Website (T2R2).