

令和元年5月31日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06261

研究課題名(和文) 巻線極子を用いた走査電子顕微鏡用の色収差および球面収差同時補正光学系の構築

研究課題名(英文) Studies on electron optics correcting both chromatic and spherical aberrations with SYLC corrector

研究代表者

西 竜治 (Nishi, Ryuji)

大阪大学・超高压電子顕微鏡センター・准教授

研究者番号：40243183

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：走査電子顕微鏡の多くに搭載できるようにするためシンプルな構成の収差補正器を提案した。平行な直線電流をレンズの光軸中心に対して軸対称に配置した磁性体を用いない構造である。これをSYLC(Symmetric Line Currents)と名付け、レンズ形状に起因するボケである球面収差のみならず、電子線エネルギーの揺らぎに起因するボケである色収差も同時に抑制できる収差補正器を構成できることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

電子顕微鏡の分解能を高める収差補正器として性能を高めるためには、その重要な特性量である非常に多くの種類の収差係数を求め、最適な構成を探索する。そのために微分代数という新しい数学的手法を用いたシミュレーションツールの開発を行い、SYLC収差補正器の特性を明らかにした。その結果シンプルな構成のSYLCを用いた収差補正器ができることを示した。コストを抑えた収差補正器へ展開が期待される。

研究成果の概要(英文)：We proposed an aberration corrector with a new simple configuration to enable it to use for many scanning electron microscopes. Parallel linear line currents without magnetic materials are arranged in axial symmetry with respect to the center of the lens. We named it SYLC (Symmetric Line Currents) and showed that constructing an aberration corrector by using the SYLC, which can simultaneously suppress the blurs not only spherical aberration due to lens geometry but also chromatic aberration due to electron beam energy fluctuation.

研究分野：電子光学

キーワード：高次球面収差補正 微分代数法 色収差補正

1. 研究開始当初の背景

電子顕微鏡の収差補正電子光学系は6極子による球面収差補正器が実用化され、4-8極子界による球面・色収差補正の研究、電子ミラーを用いた球面・色収差補正器の研究が行われている。しかし、色収差補正器に要求される精度はとて高く、まだ実用レベルには至っていない。

我々は平行線電流の光学要素が多極子類似の磁界を形成するという共同研究者の特許からこれを用いた収差補正器の研究を始めた。当初、これを巻線極子（後に、対称線電流: SYLC; Symmetric Line Current）と名付けた。これまでの多極子は磁極を所望の磁界分布になるように精密に加工する必要があったが、SYLCでは磁性体を使わないので、磁性体のヒステリシスや不均一性、加工や制御の難しさが無いという大きな利点がある。平行線に電流と電位の両方を制御すればコストを抑えた球面・色収差補正器を実現できると考えた。

2. 研究の目的

(1) 5次までの高次球面収差補正

3本の平行線電流3-SYLCを用いれば3次収差が抑えられることを検証し、さらに、5次までの収差解析を解析的・数値的に検討を行い、実用的に実現可能な条件を探索する。

(2) 色収差球面収差の同時補正

SYLCに流す電流に加え、電圧も印加することで電磁界重畳型の収差補正器とし、球面収差と色収差の両方が補正できることを検証する。

(3) 新たな解析手法である微分代数法の導入

未知の系の高次収差を精度良く解析するために新たな手法を導入する。そのためにSYLCに対応した「微分代数」法による収差解析ツールを構築する。

(4) SYLCと他の手法の組み合わせによる収差軽減

走査電子顕微鏡で大角度偏向条件での収差補正の可能性を静電コアレンズを加えた光学系で検討する。また、輪体照明や移動レンズの条件をSYLC光学系に適用した光学系について検討する。

3. 研究の方法

(1) 現在の収差補正モデルのSYLCによる置き換え

現在、球面収差補正光学系として提案されている方式の多極子部分をSYLCで置き換える。これらの系について、解析モデルで解析解の導出および数値シミュレーションを行い、収差図形（ビーム形状）を求め、収差やビーム特性の解析を行う。

(2) 微分代数法による高次収差解析ツールの作成

高次の収差係数を収差毎に分類して効率的に評価するために、新しい解析手法である微分代数法を応用した収差解析プログラムを開発する。項数の多いベクトルの様な（ベクトルではない）計算を実行する必要があり、多くのパラメータの探索および最適化のためにアルゴリズム、コンパイラ、プロセッサを併せて高速化を図る。

(3) 球面収差・色収差補正系の実現条件の決定

上記のツールを利用し、走査電子顕微鏡への搭載を想定した球面収差や色収差補正系の実用化条件を求める。3-SYLCに加え、4-SYLCあるいは6-SYLCの重畳も考慮する。色収差を補正のために2-SYLCに電磁界重畳型を導入し、色収差・球面収差補正条件を探索する。できるだけシンプルで色収差と球面収差補正を実現する条件を調べる。

4. 研究成果

(1) 対称線電流(SYLC)の解析

球面収差補正に使われる6極子界の発生には図1のように3本の直線電流を120度毎に光軸に対称に配置する。このときの磁位 $\Psi_{3\text{-SYLC}}$ は極座標 (r, θ) を用いて次式で表される。

$$\Psi_{3\text{-SYLC}} = -\frac{\mu_0 I}{2\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{r^{3n}}{nR^{3n}} \sin 3n\theta = 6 \text{ 極子成分} + 12 \text{ 極子成分} + \dots$$

すなわち、6極子成分、12極子成分、18極子成分・・・の和である。光軸近傍 $(r \ll R)$ では6極子成分が支配的である。

実際には無限長の線電流は作れないので、次のシミュレーションには図2のように線電流を矩形コイルの一部として実現する。線電流の配置半径 R に比べ線電流部分の長さ L が長く、矩形コイルの光軸と反対側の部分が十分遠ければ、無限長の近似は良い精度となる。

(2) 球面収差補正

Roseの提案した6極子2段の球面収差補正器の多極子部分を3-SYLCで置き換えて、図3のような構成の収差補正器とする。この補正器で発生する球面収差係数 $C_s^{3\text{-SYLC}}$ を解析的に求めると

$$C_s^{3\text{-SYLC}} \propto -\frac{I^2 L^3}{e\Phi R^6}$$

という関係が導かれる。ここで I は SYLC に流す電流、 ϕ は加速電圧、3-SYLC による磁界は SCOFF 近似、円レンズは弱レンズ近似とした。磁性体を持たないのでヒステリシス、段間のクロストーク、磁性体の不均一性、磁気飽和といった問題は考えなくて良い。寸法 L, R を決めれば SYLC に流す電流 I だけで球面収差係数が制御でき、再現性良く高速に条件を変えられる球面収差補正器となる。

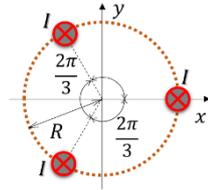


図 1. 3-SYLC

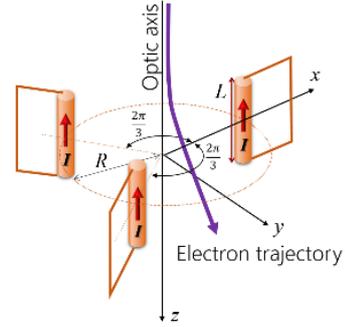


図 2. 3-SYLC の想定形状

(3) 高次収差補正

5 次非点収差 A_5 を補正するために 6-SYLC を重畳し、5 次球面収差 C_5 を補正するために 4-SYLC を重畳する。さらに 5 次までの全ての収差を抑えるために各段の電流条件には条件がある。これらを満たすために図 4 のような 4 段構成とする。これにより加速電圧 5 kV、 $f = 25$ mm のとき、開き半角 12 mrad で、1 nm 以下のビーム径を補正電流 1 A 以下で達成できる。

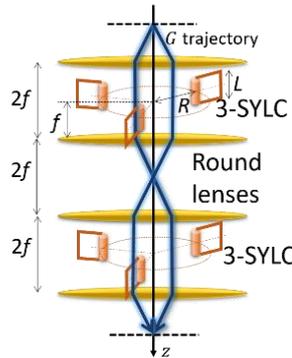


図 3. 3-SYLC 球面収差補正器

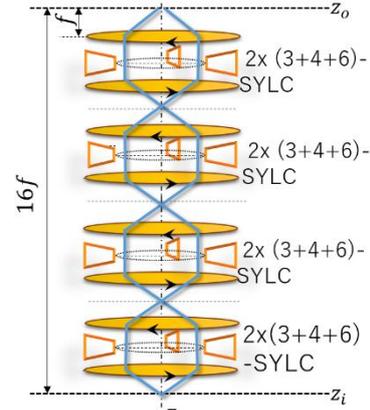


図 4. 5 次収差補正器

(4) 色収差補正

低加速の SEM の収差補正を考えると、色収差補正は欠かせない。図 6(a) に電磁 4 極子を模式的に示している。磁界による力 F_B と電界による力 F_E のバランスにより 4 極子としての作用を一定に保ちながら、磁界と電界では電子エネルギーによる作用が 2 倍違うことを利用して色収差補正が行われている。

これを図 6(b) のように電流の向き異なる 2 組の 2-SYLC を 90 度回転させて合成する。これを 2x2-SYLC と呼ぶ。さらに 4 本の線が存在するので $+V, -V$ の 2 組の電位を交互に印加すると静電 4 極子になる。電位を重畳した 2x2-SYLC を電磁 2x2-SYLC と呼ぶ。このときの電位分布は次式となる。

$$\phi = \frac{\lambda}{\pi \epsilon_0} \left(r^2 \cos 2\theta + \frac{r^6}{3} \cos 6\theta + \dots \right)$$

実際には半径 a の線に電圧 V を印加する。これが太さゼロの線に線電荷密度 λ を与えたものと同一電界分布となることから解析解を計算する。なお、厳密には最低次の 4 極子磁界は 2 倍だが、その次の 8 極子磁界の項は打ち消し、12 極子磁界の項が第 2 項になる。一般には 2xN-SYLC の磁位 $\Psi_{2 \times N-SYLC}$ は次式となる。

$$\Psi_{2 \times N-SYLC} = \frac{\mu_0 I}{\pi} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{r^{N(2m-1)}}{mR^{N(2m-1)}} \sin\{(2m-1)N\theta\}$$

色収差補正器の検証には、Rose の提案した 4-8 極子を 4 段組み合わせた色球面収差補正器を元に、4 極子を電磁 2x2-SYLC で置き換え 8 極子を 4-SYLC で置き換え

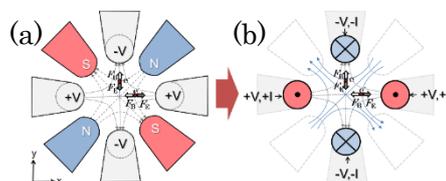


図 6. (a) 電磁 4 極子。 (b) 電磁 2x2-SYLC。

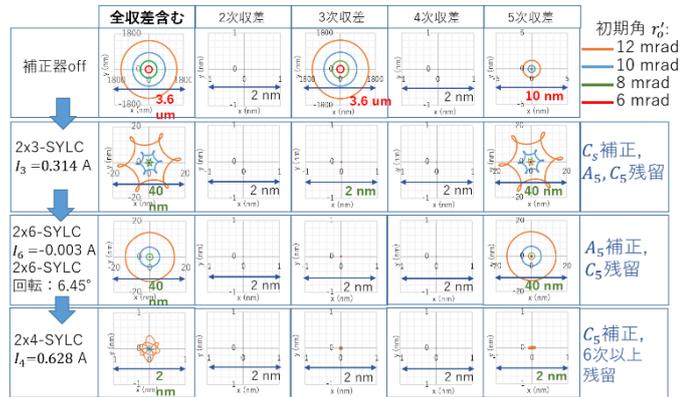


図 5. 5 次までの全収差を補正

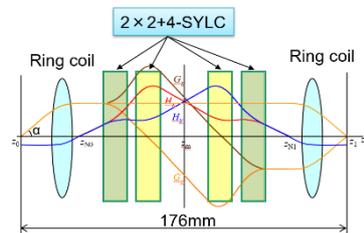


図 7. 色球面収差補正検証モデル

た計算モデルを使った(図7)。

加速電圧 5 kV、補正器長 152 mm で、開き角 10 mrad のとき、元々色収差が 15 nm、球面収差が 12 nm を電磁 2×2-SYLC により、色収差を 0、4-SYLC を重畳することで球面収差をほぼ 0 に抑えられることを検証した。

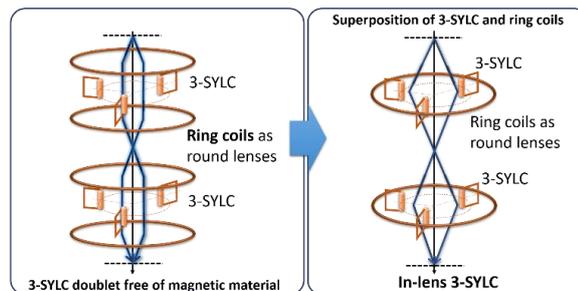


図 8. 4 つのリングコイルを円レンズとして用い、それを 2 つに合成しインレンズ SYLC を構成

(5) インレンズ球面収差補正器

SYLC が磁性体を持たないことから、図 3 の円レンズを図 8 の左のように磁性体なしのリングコイルで構成する。この構成で前節の球面収差補正器は構成できる。円レンズは基本軌道の対称性を作るために存在しているので、2 つのリングコイルを 1 つにまとめる。図 10 は加速電圧 5 kV、 $f = 25$ mm のときの計算結果で、開き角 4 mrad のとき、元々、球面収差が 200 nm をほぼ 0 に抑えられることが確認できた。5 次の 6 回非点が残っているが(3)の手法との組み合わせで消すことができると考えられる。

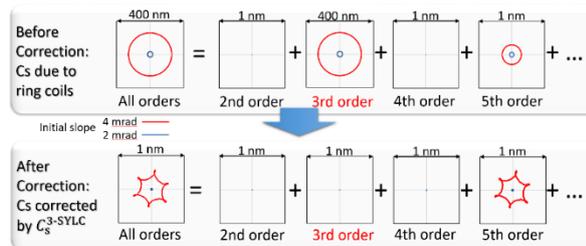


図 9. 球面収差補正前後の各次数の開口収差

このような構成にすることで全体をコンパクトまとめることができ、コストの削減や自由度が増すメリットがある。SYLC 収差補正器ならではの特徴が生かされている。

図 9. 球面収差補正前後の各次数の開口収差

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 4 件)

- (1) Shahedul Hoque, Hiroyuki Ito, Ryuji Nishi: Spherical aberration correction with an in-lens N-fold symmetric line currents model, *Ultramicroscopy*, **187**, (2018)135-143, <https://doi.org/10.1016/j.ultramic.2018.02.002>, (査読有り)
- (2) Shahedul Hoque, Hiroyuki Ito, Akio Takaoka and Ryuji Nishi: A novel method for higher order aberration correction in electron microscopes, *Microscopy and Microanalysis*, **23**, S1 (Proceedings of Microscopy & Microanalysis 2017), (2017) 472-473, doi:10.1017/S143192761700304X, ISSN: 1431-9276 (Print), 1435-8115 (Online) (査読無し) (学会発表(6)のプロシーディングス論文)
- (3) Shahedul Hoque, Hiroyuki Ito, Akio Takaoka, Ryuji Nishi: Axial Geometrical Aberration Correction up to 5th Order with N-SYLC, *Ultramicroscopy* **182**, (2017) 68-80, doi.org/10.1016/j.ultramic.2017.06.014, (査読有り)
- (4) Shahedul Hoque, Hiroyuki Ito, Ryuji Nishi, Akio Takaoka, Eric Munro: Spherical aberration correction with threefold symmetric line currents, *Ultramicroscopy* **161**, (2016) 74-82, DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ultramic.2015.11.005>, (査読有り)

[学会発表] (計 11 件)

- (1) R. Nishi, S. Hoque, H. Ito, and A.Takaoka: Investigation of electromagnetic-SYLC for chromatic aberration correction, Tenth International Conference on Charged Particle Optics (CPO-10), p.14, Thu. 17 Oct., Casa Marina Resort, 1500 Reynolds St., Key West, Florida 33040, USA, 17-21 Oct., 2018
- (2) S. Hoque, R. Nishi, H. Ito, and A.Takaoka: Spherical aberration correction with in-lens N-fold symmetric line currents, Tenth International Conference on Charged Particle Optics (CPO-10), p.6, Thu. 17 Oct., Casa Marina Resort, 1500 Reynolds St., Key West, Florida 33040, USA, 17-21 Oct., 2018
- (3) Shahedul Hoque, Hiroyuki Ito, Akio Takaoka and Ryuji Nishi: A Novel Method for Higher Order Aberration Correction in Electron Microscopes, *Microscopy & Microanalysis 2017 (M&M)*, POSTER#250, 3:00pm 787 Wed. 9 Aug., America's Center

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

Convention Complex, St. Louis, MO, USA, 6-10 Aug., 2017

- (4) 西竜治、ホックシャヘドウル、伊藤博之、鷹岡昭夫: N-SYLC モデル球面収差補正器の微分代数法による高次収差解析とパラメータ最適化 (Higher Order Aberration Analysis and Optimization of N-SYLC Spherical Aberration Corrector by Differential Algebra Method), 日本顕微鏡学会第 73 回学術講演会, 札幌コンベンションセンター, 北海道 (2017), 5/30(火)~6/1(木), 30amF_I1-08, Kenbikyō, 52 (Suppl. 1), 23
- (5) 西竜治、山名達也、ホックシャヘドウル、伊藤博之、鷹岡昭夫: 微分代数法による回転対称線電流を用いた球面収差補正器の特性解析 (Aberration analysis of spherical aberration corrector with Symmetrical Line Currents (SYLC) by differential algebra method), 日本顕微鏡学会第 72 回学術講演会, 仙台国際センター, 宮城県 (2016), 6/14(火)~6/16(木), 14pmB_I1-01