

令和 5 年 6 月 22 日現在

機関番号：33401

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2022

課題番号：19K04489

研究課題名（和文）低加速走査電子顕微鏡に向けた色収差補正光学系の構築

研究課題名（英文）Development of chromatic aberration correction system for low voltage scanning electron microscope

研究代表者

西 竜治（Nishi, Ryuji）

福井工業大学・工学部・教授

研究者番号：40243183

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,000,000円

研究成果の概要（和文）：走査電子顕微鏡（SEM）では、観察に用いる電子ビームのエネルギーが低いため、相対的に用いる電子レンズの色収差が大きくなり、分解能を低下させる。この色収差を改善するための収差補正器の性能をシミュレーションにより検討を行い、より効果的な収差補正器の構成を探った。収差補正器のモデルとして新しいタイプの電磁多極子として対称線電流（SYLC）を発展させたものを用いた。

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向上させる収差補正器の性能を高めるためには、その性能を表す収差係数（ボケの大きさをあらわす指標）を効率的に求め、それらが小さくなるように収差補正器を構成する。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をSYLC収差補正器の計算およびプリズム光学系の計算に拡張し、特性を向上させた。走査電子顕微鏡の分解能の向上と必要な収差補正器のコスト低減が期待される。

研究成果の概要（英文）：In scanning electron microscopy (SEM), the low energy electron beam used for observation results in relatively large chromatic aberration of the electron lens used, which reduces the resolution. To improve this chromatic aberration, the performance of an aberration corrector was investigated by simulation to find a more effective aberration corrector configuration. As a model for the aberration corrector, we used a new type of electromagnetic multipole, which is a development of the symmetric line current (SYLC).

研究分野：電子光学

キーワード：電子顕微鏡 収差補正 微分代数

1. 研究開始当初の背景

磁気多極子を用いた球面収差補正器は 15 年位前から市販が始まったが、走査電子顕微鏡 (SEM) 用には収差補正器のアイデアは多く発表されているものの実用化に至っていなかった。加速電圧の低い走査電子顕微鏡では球面収差に加えて色収差の影響が大きいため、色収差補正器が望まれていたが、問題が多かった。最大の問題は再現性であり、すなわち光学系の工作精度や電源リップルや安定性、外乱、磁性体のヒステリシスといった要因である。

走査電子顕微鏡用の収差補正器としては、Zach-Haider のグループが 1995 年ごろ、静電 4-8 極子 4 段と磁界 4 極子 2 段の構成で発表があり、走査電子顕微鏡へ適用事例があった。色収差補正を可能とするには近軸軌道に影響を与える 4 極子界を使う必要があるが、安定度や再現性が極度に要求されるといった根本的な問題があり、実装には大きな困難がある。これに対し、我々は回転対称に配置した線電流により (SYLC; Symmetric Line Current) 多極子類似の磁界を形成するという原理を用いた収差補正器の研究を 2014 年から始めていた。これを用いることでシンプルで安定な球面収差、色収差補正器を構成できる可能性があると考えていた。

2. 研究の目的

電子顕微鏡では高価格帯に属する(走査)透過電子顕微鏡 (STEM, TEM) では球面収差補正器が実用化されている。一方、走査電子顕微鏡 (SEM) では収差補正器は実用化されていない。これは単にコストの問題だけでなく、加速電圧が低い走査電子顕微鏡では球面収差補正器だけでは不十分で、色収差補正器が必要だからである。

これまで実用化されてきた収差補正器では電磁多極子を用い、複雑ゆえコスト高になっている。本研究は、対称線電流により磁極を持たないシンプル電子光学要素を用いて電磁多極子を置き換え、低加速の走査電子顕微鏡に使える球面収差・色収差補正器の新たな構成を提案することである。その計算には微分代数法を用い、収差係数計算を効率よく行う手法も研究する。また、大角度での偏向が入った光学系についても微分代数法で収差計算を可能とする手法についても合わせて研究を行う。

3. 研究の方法

- (1) 新たな解析手法である微分代数法による収差解析プログラムの高速化
演算アルゴリズム、並列化、キャッシュメモリ利用の効率化、新たなプロセッサの利用、など複数の手段により、シミュレーション時間の短縮を図るために改善策を模索した。
- (2) シミュレーションにより 5 次までの開口収差や色収差を抑えるモデルの探索
SYLC の構成要素はいろいろと考えられるが、近軸軌道や色収差に影響を与える 4 極子界相当の 2×2-SYLC、2 次収差以上の収差に影響を与える 3-SYLC、3 次収差以上に影響を与える 8-SYLC、5 次以上の収差に影響を与える 6-SYLC の組み合わせ配置を考慮して、(1) で作成したプログラムにより最適化探索を行った。
- (3) SYLC による変形レンズや SEM の大角度偏向での検出系における収差計算に対応するために、微分代数法による収差解析を曲線光軸系に対応できるように改良
平面内で光軸が曲がる系について、座標変換から微分方程式を導き、微分代数法へ当てはめた。SEM の信号検出系にも適用可能な磁場セクター光学系について収差計算の実施を確認した。

4. 研究成果

- (1) 微分代数法 (DA 法) による軌道計算
直線軌道の場合の軌道方程式で、色収差を計算するために電位成分は電位 ϕ と変動 δ の和として式 (1) のように定式化する。ここで、 x, y, x', y', δ を DA 数として扱って計算する (x', y' は z 微分)。DA 数は式 (2) のように軌道の初期値 $x_0, y_0, x'_0, y'_0, \Delta\phi$ でマクローリン展開したときの係数 $c_{x,k}$ の組である。DA 数の演算規則は通常のベクトルの演算規則ではなくて別に定める。このようにするとき、 n 次まで計算することで、 n 次までの項の係数

$$\begin{cases} (x')' = \frac{1}{2(\phi + \delta)}(1 + x^2 + y^2)(x'E_z - E_x) \\ \quad + \sqrt{\frac{e}{2m}} \sqrt{\frac{1 + x^2 + y^2}{\phi + \delta}} \{x'(x'B_y - y'B_x) - (y'B_x - B_y)\} \\ (y')' = \frac{1}{2(\phi + \delta)}(1 + x^2 + y^2)(y'E_z - E_y) \\ \quad + \sqrt{\frac{e}{2m}} \sqrt{\frac{1 + x^2 + y^2}{\phi + \delta}} \{y'(x'B_y - y'B_x) - (B_x - x'B_z)\} \end{cases} \quad (1)$$

$c_{x,k}$ が正しく求まる。 x, y を物面から像面まで軌道方程式にしたがって計算するとき、 x, y の DA の各項の値 $c_{x,k}$ などが収差係数に相当する。

$$\begin{aligned} x &= \sum_{k=0}^{N-1} c_{x,k} x_0^p y_0^q x_0^r y_0^s \delta^t, \\ y &= \sum_{k=0}^{N-1} c_{y,k} x_0^p y_0^q x_0^r y_0^s \delta^t, \end{aligned} \quad (2)$$

$$N = \frac{(n+5)!}{n!5!}$$

- (2) 微分代数演算を軌道方程式の解法に使う際に最も計算時間の律速になっているのが、積の演算である。2 つの DA 数の積 $(a_0, a_1, \dots, a_n) \cdot (b_0, b_1, \dots, b_n) = (c_0, c_1, \dots, c_n)$ を計算するには

$c_k = \sum_{M_i M_j = M_k} a_i b_j$ ($i, j, k = 0, 1, \dots, N-1$) において単項式 M_i, M_j, M_k が $M_i M_j = M_k$ を満たすときのみ和をとるのであるが、項数 N の 3 乗に比例した数の判定ループが必要である。通常、5 次までの収差を計算しようとする項数 N は 252 項となり、約 1600 万回のループと判定が必要となる。そこで、あらかじめ i, j, k が満たすべき組み合わせを計算しテーブルを作成し、テーブル参照と積和演算のみにする。この置き換えで 1 桁の速度向上が得られる。さらに、ループ配置の工夫によりメモリアクセスの局所化によりキャッシュ効率を上げて約 30% の計算時間の短縮を図った。これらの改善は項数の多いときの方が速度向上効果が大きかった。一方、並列化は計算時間短縮には現在のアルゴリズムでは有効ではなかった。高速プロセッサの導入(インテル第 9 世代から 12 世代)により、計算時間の約 30% 短縮を図った。

- (3) 収差補正器として、SYLC の組み合わせを考える。SYLC は平行な N 本の線電流を回転対称に配置したもので中心部に $2N$ 極磁界が発生する。回転対称に配置した $2N$ 本の線電流に交互に逆方向電流を流しても同じである(高次項は異なる)(図 1)。さらに、導線に電位を与えることで $2N$ 極静電界を発生できる(図 2)。

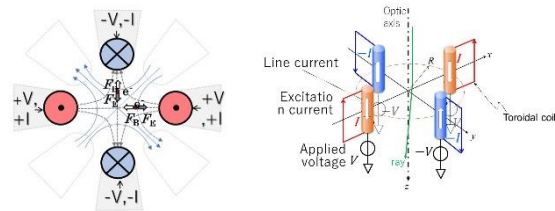


図 1. 2×2-SYLC 図 2. 電磁 2×2-SYLC

色収差軽減のためには、4 極子界が必要であり、図 3 のように 2×2-SYLC を 4 段配置する(S1, S2, S4, S5)。軌道の対称を維持するように 4 極子界としての強度を決定する。色収差の制御は図 4 のように導線に流す電流と与える電位の割合を調整することで行う。球面収差は 8 極子界である 4-SYLC で行う。実際には 2×2-SYLC の 4 つの導線に流す電流に重畳する。この調整により球面収差を制御できる。残りの 3 次収差を消すために S3 の位置に 4-SYLC を配置する。これにより色収差と 3 次幾何収差まで全て補正することができた。次に残る 5 次収差の軽減のために S2, S3, S4 の位置に 6-SYLC 成分を重畳する。6-SYLC は 12 極子として働くので 5 次収差以上の高次収差に寄与する。これらの調整で 5 次収差を軽減することができた(完全には補正できていない)。

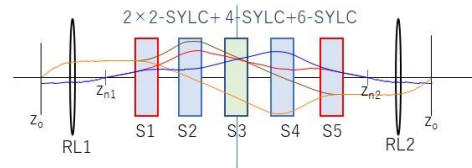


図 3. SYLC 色収差球面収差補正器

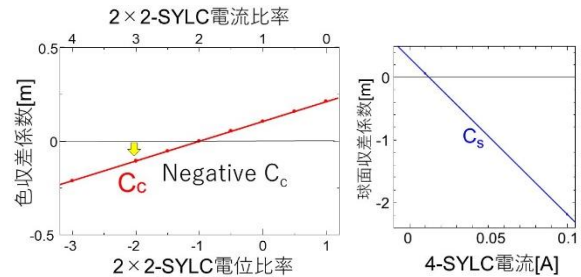


図 4. 色収差係数の制御 図 5. 球面収差係数の制御

- (4) 微分代数計算の曲線光軸対応

軌道の角度を大きく曲げるような光学系に微分代数法を適用するために、平面内での曲線光軸系へ拡張する。図 6 のように座標系を定め、光軸 s を基準に x, y 座標を考える。光軸 s や曲率

$$\begin{aligned} \frac{dx}{ds} &= (1+hx) \frac{a}{\sqrt{(p/p_0)^2 - a^2 - b^2}}, \quad \frac{dy}{ds} = (1+hx) \frac{b}{\sqrt{(p/p_0)^2 - a^2 - b^2}} \\ \frac{da}{ds} &= h\sqrt{(p/p_0)^2 - a^2 - b^2} - \frac{e}{p_0}(1+hx)B_y, \quad \frac{db}{ds} = 0 \end{aligned} \quad (3)$$

規格化運動量: $a = \frac{p_x}{p_0}, b = \frac{p_y}{p_0},$ 曲率: $h = \frac{1}{r_0}, \left(\frac{p}{p_0}\right)^2 \rightarrow \frac{\phi}{\Phi_0 + \delta}$

h 、動標構は運動方程式から計算する。軌道は直交座標系の軌道方程式を式(3)のように書き換えて計算する。この書き換えで DA 変数として x, y, a, b, δ において計算することができるようになった。これを用いて磁界型扇形プリズムについて 2 次収差までの収差係数について求められることを確認した。今後、プリズムについてはフリッジの影響を考慮しなければならないが、SEM の検出系で使われる ExB を挿入したときのように大きく軌道が曲がる光学系についても微分代数による計算が可能となると期待できる。

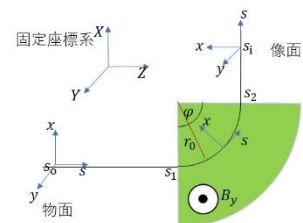


図 6. 曲線光軸での座標系の取り方

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Momoyo Enyama, Ryuji Nishi, Hiroyuki Ito, Jun Yamasaki	4. 巻 -
2. 論文標題 Low-aberration ExB deflector optics for scanning electron microscopy	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Microscopy	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1093/jmicro/dfad001	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 西竜治、ホックシャヘドゥル、伊藤博之、鷹岡昭夫
2. 発表標題 低加速SEMに向けた対称線電流補正器の色収差補正への拡張
3. 学会等名 日本顕微鏡学会 第75回学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 圓山 百代、西 竜治、伊藤 博之、山崎 順
2. 発表標題 低収差ExB偏向器光学系の提案
3. 学会等名 日本顕微鏡学会 第79回学術講演会
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------