

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 16 日現在

機関番号：34412

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24360020

研究課題名(和文)円環状対物瞳と近接補助電極を用いる電子光学系用球面収差補正技術の開発

研究課題名(英文)Development of Spherical Aberration Correction Technique for Electron Optical Systems using an Annular Objective Pupil and an Auxiliary Proximity Electrode

研究代表者

生田 孝 (IKUTA, TAKASHI)

大阪電気通信大学・工学部・教授

研究者番号：20103343

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,500,000円

研究成果の概要(和文)：電子顕微鏡においてサブオングストロームの分解能を達成するには球面収差の補正が不可欠である。今日多極子電子レンズで構成される球面収差補正装置(Csコレクター)が用いられているが、きわめて高価である。本研究では、円環状対物瞳と補助近接円孔電極間の軸対象静電場による、シンプルかつ安価なCsコレクターを設計するとともに、200kV走査型透過電子顕微鏡(STEM)を用いてその効果を評価した。

Csコレクターオン状態では、球面収差補正効果を示すCeO<sub>2</sub>微粉末の3.12Å格子像が鮮明に観察された。この事は本研究のシンプルかつ低コストな静電型Csコレクターが電子顕微鏡用として実用的であることを示している。

研究成果の概要(英文)：In electron microscopes, correction of the spherical aberration is indispensable to achieve sub-angstrom resolution. Although some types of aberration correction devices (Cs-correctors) consist of multi-pole electron lenses had been utilized in this time, these are very expensive. In this study, a very simple and inexpensive Cs-corrector with axially-symmetric electrostatic field formed between an annular objective pupil and an auxiliary proximity circular electrode, was designed and evaluated using a 200kV scanning transmission electron microscope (STEM).

3.12Å lattice image of CeO<sub>2</sub> particles was clearly observed in case of Cs-corrector ON, which indicates the effect of the spherical aberration correction. This shows that the present simple low-cost electrostatic Cs-corrector is practical for the electron microscope.

研究分野：工学

キーワード：電子顕微鏡 走査型透過電子顕微鏡 球面収差補正 静電型Csコレクター 円環状対物瞳 3次元収束プロファイル 電子ビーム露光 微細加工技術

1. 研究開始当初の背景

研究代表者と研究分担者らは、電子顕微鏡 (TEM、STEM) に用いられる円孔状対物瞳に代えて、円環状対物瞳を持つ電子線結像光学系を新たに提案し、その3次元結像特性の評価と、位相板を必要としない振幅・位相分離観察手法の開発を継続して実施してきた (学術創成研究「ナノ位相トモグラフィ走査型透過電子顕微鏡の開発」、代表大阪電気通信大学、生田 孝、平成 18-22 年度)。

透過型電子顕微鏡 (TEM) における像観察用として上記円環状対物瞳を用いる場合、円環状対物瞳の円環幅が狭ければ電子レンズの球面収差の影響を受けないことが研究代表者らにより示されている。さらに動的なホローコーン照明の下で画像減算を含む画像処理を適用すれば、位相板無し振幅・位相分離観察が可能である。ここで上記学術創成研究により走査型透過電子顕微鏡 STEM においても、円環状対物瞳と円環配置アレイ検出器を用いて球面収差の除去と振幅・位相分離観察が実現できることが確認されている。

一方、電子ビーム露光などへの応用に関しては収束特性の改善のために高収束角対応の円孔状対物瞳を用いたい。しかし電子レンズの球面収差による波面収差によって収束角の上限が生じる。幅広の円環状対物瞳を用いて収束角を広げたとしても波面収差が円環内で発生し、同様に収束特性が劣化する。これを避けるには近年実用化された、「きわめて高価な」多極子球面収差補正システム (Cs コレクター) が必要とされる状況である。

2. 研究の目的

研究代表者らが研究を継続してきた円環状対物瞳を持つ電子線結像光学系の延長として、露光装置にも使用可能な、円環状対物瞳自身を利用する新しい発想の収差補正電子光学系の原理を確認し STEM で検証することが本研究の第一の目的である。

提案する収差補正光学系では、円環状電極 (対物瞳) に近接させて補助円孔電極を配置する。主電子レンズの波面収差関数については、球面収差につりあうようにデフォーカスを調整することで波面収差関数の極値をほぼ円環電極の中央付近に設定できる。ここで円環電極と補助円孔電極間に直流電圧を印加すると、円環電極の近傍に生じた、しみ出し電界による円環内での波面収差関数はほぼ放物線状になる。適切な直流電圧の印加により円環電極内で主電子レンズの波面収差関数の変動を打ち消すことが可能になる。以上は円環状対物瞳の電子光学系を想定して始めて発想できたものである。

本研究第 2 の目的は数十ミクロン程度の円環状対物瞳と同サイズの近接補助電極を現行微細加工技術でいかに実現するかを探るところにある。以下では本研究の経緯と、得られた成果とをまとめる。

3. 研究の方法

上記の目的を達成するため、以下の項目について開発検討等を行い、STEM 用の球面収差補正器を完成させた。

- (1) 理論解析式・シミュレーションによる収差補正条件の最適化検討
- (2) 電極加工方法の検討と実施
- (3) 200kV-STEM 用収差補正器の製作・組立
- (4) STEM 装置 (HD-2300S; 日立ハイテック製) による原理検証実験

4. 研究成果

(1) 理論解析式・シミュレーションによる収差補正条件の最適化検討

開発した球面収差補正器は、図 1 に示すように、円環孔・円孔をもつ 2 枚の電極と、その間に定電圧を印加する電源から成る非常にシンプルな構造である。その実機製作にあたり、まず理論式による電界分布解析、およびシミュレーションによる 3 次元電界分布・電子軌道計算を行い、収差補正の最適条件を検討した。まず、図 2 に示す寸法の電極構造を持つコレクタを図 3 の STEM 光学系に組み込むことを想定して要求される電源条件を解析した。その結果 (図 4) 開発装置で生じる負の収差により、STEM 対物レンズの正の収差を打ち消すには、10.6V の定電圧を電極間に印加すればよいと分かった。また、電圧源に要求される安定度は、1 分解能に対し、 $3.6 \times 10^{-3}$  であることも明らかとなった。これらは、市販の安定化直流電源でも満足されるスペックであり、本研究では ADC 社製 6247G を用いた。さらに要求される組立精度について

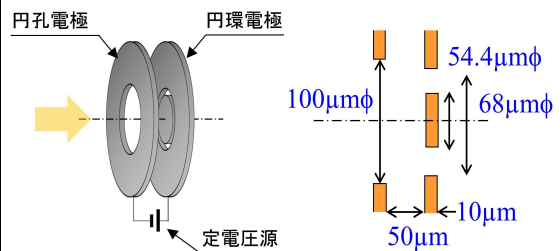


図 1. 開発した球面収差補正器の模式図

図 2. 設定した電極寸法

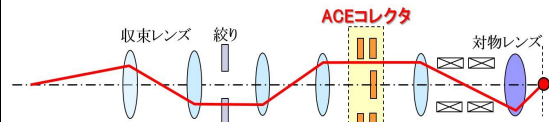


図 3. 設定した STEM 光学系

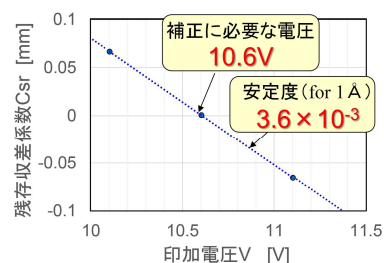


図 4. 印加電圧最適条件の解析結果

ても解析したところ、1 分解能に対して、電極同士の相対的な面内位置ずれは 0.076 $\mu\text{m}$ 、傾斜は 0.11 $^\circ$  まで許容されることが分かった。

### (2) 電極加工方法の検討と実施

2 枚の電極は、厚さ 10  $\mu\text{m}$ 、外径 3mm $\phi$ の Mo 板の中央に、図 2 の寸法の円環孔・円孔を、それぞれ集束イオンビーム (FIB)・フォトリソグラフィを用いて加工し、作製した。図 5(a)に FIB 加工した円環電極の孔部の SEM 像を示す。設定寸法の円環孔が形成されていることが確認できる。ただ、孔部の 3ヶ所に支持橋が残存していることが分かる。これは中央円板と外側の基板とを接続するのに避けられない構造体であるが、孔部に生じる電界を乱すため、極力薄細化した。今回は幅 1.5  $\mu\text{m}$ 、厚さ 3  $\mu\text{m}$  以下を実現している (図 5(b))。支持橋の厚さについては、シミュレーションでの検討も実施しており、図 2 の寸法の場合、円環電極の右側 (対物レンズ側) に 2.5  $\mu\text{m}$  厚以下の支持橋とすることで、電界乱れの影響は無視できる程度に抑えられることが分かっている。今回の加工では、その要求条件をほぼ満たしたものが得られている。

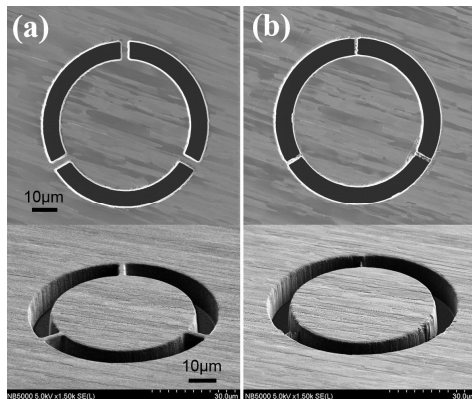


図 5. 集束イオンビームで作製した円環電極

### (3) 200kV-STEM 用収差補正器の製作・組立

作製した電極構造の STEM 鏡体への挿入、および真空外からの電圧印加が出来る機構を持つ収差補正器を作製した (図 6)。



図 6. 開発した球面収差補正器の外観

ベースには市販の絞りホルダーを用いており、その先端部に「電極取り付け治具」をセットした構造とした。この治具は図 7 に示すようなパーツから成っており、「押さえ板」・「電極押さえ」を通じて「円孔電極」には負の電位を加え (青色)、「電極台」・「スペーサー」と接している円環電極はアースされる (赤色) 構造となっている。また、両電極

間には「絶縁シート」を、電極周囲には「絶縁ガイド」を配することで、2つの電極が導通しないようにした。押さえ板への電圧印加は、図 6 上部にある BNC 端子を介して外部電源と接続することで行える。

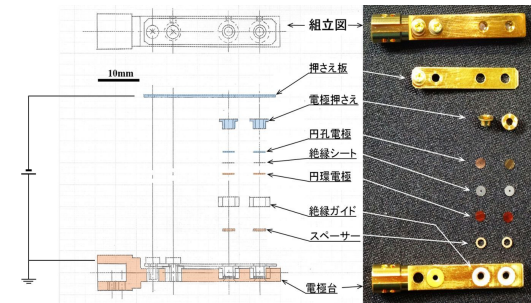


図 7. 開発した電極組み込み治具

また、電極間の絶縁膜をプラズマ溶射により形成する技術開発も進めている。

陽極に銅筒、陰極にタングステンワイヤを使用し、電極間にアルゴンガスを流し放電することで高温高速のプラズマが生じる。このプラズマ中に皮膜材料を噴霧、溶融させ、高速で基材に吹き付けることで絶縁膜を形成した。溶射時の条件は、プラズマ生成用のアルゴンガス圧力を 15 kgf/cm<sup>2</sup>、電流 20 A、アルミナ粒径 45  $\mu\text{m}$ 、マグネシア粒径 0.01  $\mu\text{m}$ 、溶射時間 120 s、溶射後のプラズマによる焼成時間 60 s で固定し、皮膜材料噴霧用のアルゴンガス圧力、焼成の有無、溶射回数を表 1 の様に変化させた。作製した皮膜は、走査型電子顕微鏡 (SEM) により表面観察を、光電子分光法 (XPS) により、成分分析を行った。

表 1 溶射条件

試料	アルゴンガス圧力	焼成の有無	溶射回数
A	0.5 kgf/cm <sup>2</sup>	無	1
B	1.0 kgf/cm <sup>2</sup>	有	1
C	0.5 kgf/cm <sup>2</sup>	有	1
D	0.5 kgf/cm <sup>2</sup>	有	3

さらに作製した絶縁膜の均一性および平坦性を向上させるため低エネルギーイオン照射による表面処理を提案し、その評価を行った。今回の低速イオン銃は、イオン化室に永久磁石 (Alnico-8) を用いフィラメントから発生した電子をグリッド中央部集束させ、銃の中心軸上において電子衝撃によって発生するイオンの高密度化を行っている。これによりイオンの引き出し効率が約 2 桁増加した。

低エネルギーイオン照射によるエッチングでは、スパッタリングと同時に表面の平滑化が促進される。これは、低エネルギーのイオン照射により、表面原子にマイグレーションの効果を誘発するためであると考えられる。この結果から、収差補正電極用絶縁膜におけるナノレベルの平坦化が期待できる。

#### (4) STEM 装置 (HD-2300S; 日立ハイテック製) による原理検証実験

作製した球面収差補正器の STEM 装置での検証実験は図 8(a)に示す構成で行った。STEM 光学系の電子源と対物レンズの間に収差補正器を挿入し、外部接続の電源から定電圧を印加することで負の球面収差を発生させる。図 8(b)は実験装置の外観写真である。

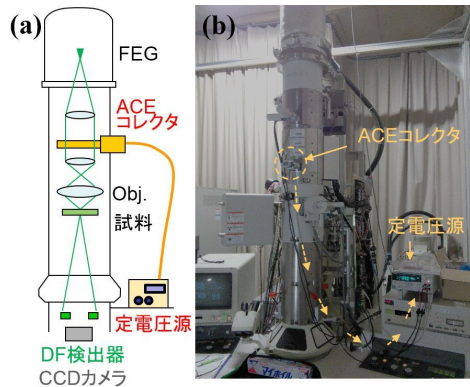


図 8. 開発装置の STEM への実装

観察試料には、カーボン薄膜上の金微粒子および酸化セリウム微粒子を用いた。前者は、収束電子線パターン(ロンチグラム)用、後者は STEM 像用である。

図 9 に CCD カメラで撮影したロンチグラムを示す。(a)は収差補正前の状態で、中央部にコントラストのない平滑な領域がわずかにあるが、その外側には球面収差の影響によって伸び歪んだ金粒子が映っている。ここに開発した収差補正器を挿入すると、(b)のように円環電極の影が現れる。ここで電極間に電圧を印加(10V)すると、金粒子の歪伸コントラストが低減され、円環孔部分が平滑化されているのが分かる。これは球面収差補正効果を示す結果である。

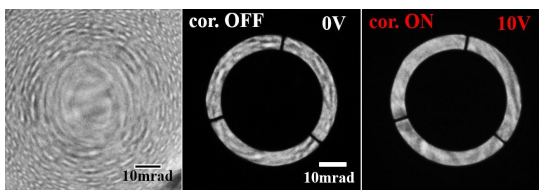


図 9. Au 粒子 / C 薄膜試料のロンチグラム

一方、このロンチグラムを利用することで、補正器の軸合わせも実施可能である。図 10 のように補正器が STEM 光軸からずれた位置に入っていると、ロンチグラムが非軸対称パターンとなる。したがって、ロンチグラムが等方的になるよう補正器の位置を調整することで軸合わせが実現される。

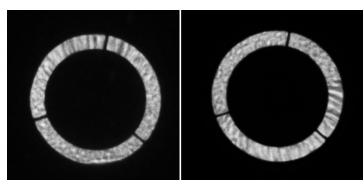


図 10. 軸ずれによるロンチグラムの歪

図 11 に酸化セリウム粒子の暗視野 STEM 像(直接倍率 200 万倍)を示す。収差補正器に印加する電圧を変化させることで、像質が変わっていき、10V 印加で最もクリアな像になっている。この結果はシミュレーションで得られている最適電圧と合致している。さらに、高倍像(直接倍率 700 万倍)では、10.6V 印加することで、格子像( $\text{CeO}_2\{111\}$ 面; 3.12 Å)を明瞭に捉えることが出来ている(図 12)。このように、実像においても球面収差補正による分解能向上効果が確認された。

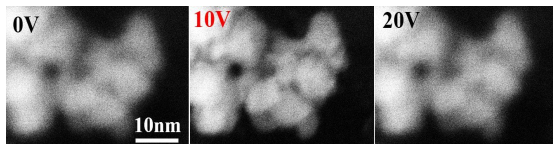


図 11.  $\text{CeO}_2$  粒子の収差補正 STEM 像(低倍)

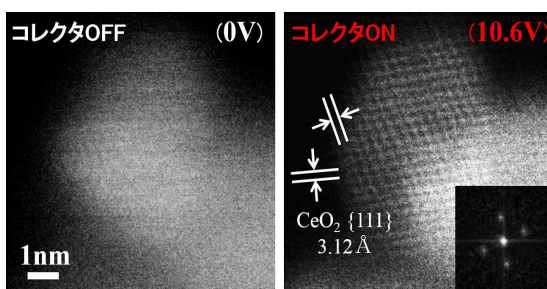


図 12.  $\text{CeO}_2$  粒子の収差補正 STEM 像(高倍)

現状での分解能制限要因は、円環電極での電流ロスによる SN 比低減、軸合わせ精度・加工組立精度の不足、補正器が導入してしまう球面収差以外の収差(寄生収差)などが考えられる。今後は、それぞれの対策を考慮し改良を進めていくことで、更なる高分解能化、また SEM や TEM への適用など、低価格の汎用収差補正器へと発展していくことが期待できる。

#### (5) 円環状対物瞳を有する結像光学系の高性能化に向けた研究の展開

先に述べたように今回の簡易収差補正器の発想には、研究代表者らによる平成 18-22 年度学術創成研究「ナノ位相トモグラフィ走査型透過電子顕微鏡の開発」で新たに採用した円環状対物瞳があった。

幅の狭い円環状対物瞳を用いると、電子・光学顕微鏡で透過型、走査型を問わず、球面収差の影響を取り除きかつ焦点深度が深められることが示される。加えて走査型の電子・光顕微鏡では円環配置検出器アレイ(透過型では動的ホローコーン照明)を用いて、位相板を用いない振幅・位相像の分離が可能であることが先の学術創成研究で示された。

本研究の副次的な目的として、これらの新技術の高性能化と実用展開がある。走査型透過電子顕微鏡 STEM については、振幅・位相像の再構成処理と検知器の改良により、グラフアイト 0.34 nm 格子の位相像観察に成功した。また走査型透過光学顕微鏡 STOM においても位相板を用いない方式で生物試料の振

幅・位相像分離観察に成功しており、今後の展開が電子顕微鏡、光学顕微鏡の双方で期待される。とりわけ電子顕微鏡分野では本研究の収差補正器と組み合わせることで、幅の広い円環対物瞳が利用できる。これにより信号利用率が高められ、より高いSN比が実現できる見通しである。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計5件)

- 1) T. Ishida, T. Kawasaki, T. Tanji and T. Ikuta, “Quantitative evaluation of annular bright-field phase images in STEM”, 査読有, *Microscopy* 64(2), (2015), 121-128, doi: 10.1093/jmicro/dfu113
- 2) T. Matsutani, M. Date, R. Nishizawa, T. Kawasaki, T. Kodama, and T. Ikuta, “Rapid Growth of Metal Oxide Insulator Film for Aberration Corrector Electrodes” 査読無, *Plasma Application and Hybrid Functionally Materials* No.24 (2015) 84.
- 3) T. Matsutani, T. Kawasaki, T. Kodama, M. Hisaka, Y. Takai and T. Ikuta, “Development of focused ion beam system attached to floating type low energy ion gun for surface finishing” 査読有, *Vacuum* 110 (2014) 228-231. doi:10.1016/j.vacuum.2014.07.020
- 4) T. Ishida, T. Kawasaki, T. Tanji, T. Kodama, T. Matsutani, K. Ogai and T. Ikuta, “Phase reconstruction in annular bright-field scanning transmission electron microscopy”, 査読有, *Microscopy*, 64(2), (2014), 69-76, doi: 10.1093/jmicro/dfu098
- 5) 三宅泰広, 日坂真樹, 生田孝, “能動型画像処理を用いた生体組織細胞の位相差光学顕微観察”, 査読無, 電子情報通信学会技術報告, No.241, MBE2013-65 (2013) 31-33.

[学会発表](計30件)

- 1) 川崎忠寛, 石田高史, 丹司敬義, 児玉哲司, 生田孝, “円環絞りと環状アレイ検出器を用いた位相STEM法”, 第6回電子線応用技術研究会(大阪大学理工学図書館ホール, 吹田市, 大阪府, 2015年6月5日)[招待講演]
- 2) 高井康行, 小川雄紀, 金森大輝, 川崎忠寛, 石田高史, 児玉哲司, 生田孝, 丹司敬義, “電界型球面収差補正器の開発(1) - 計算 -”, 日本顕微鏡学会第71回学術講演会(京都国際会館, 京都市, 京都府, 2015年5月14日)
- 3) 小川雄紀, 高井康行, 金森大輝, 川崎忠寛, 石田高史, 児玉哲司, 生田孝, 丹司敬義, “電界型球面収差補正器の開発(2) - 実験 -”, 日本顕微鏡学会第71回学術講演会(京都国際会館, 京都市, 京都府, 2015年5月14日)
- 4) 石田高史, 川崎忠寛, 丹司敬義, 生田孝, “走査型透過電子顕微鏡による環状明視野位

相法を用いた再生位相像の定量評価”, 日本顕微鏡学会第71回学術講演会(京都国際会館, 京都市, 京都府, 2015年5月14日)

- 5) 川崎忠寛, 水野貴大, 石田高史, 富田正弘, 高井康行, 小川雄紀, 金森大輝, 生田孝, 松谷貴臣, 児玉哲司, 丹司敬義, “軸対称電場を用いた球面収差補正器の開発”, 日本顕微鏡学会第71回学術講演会(京都国際会館, 京都市, 京都府, 2015年5月13日)
- 6) 川崎忠寛, 石田高史, 丹司敬義, “ホローコーンTEMによる軽元素カラムの可視化”, 第62回応用物理学関係連合講演会(東海大学湘南キャンパス, 平塚市, 神奈川県, 2015年3月13日)
- 7) 石田高史, 川崎忠寛, 丹司敬義, 生田孝, “環状明視野位相法による像コントラストの信号対雑音比の改善”, 第62回応用物理学関係連合講演会(東海大学湘南キャンパス, 平塚市, 神奈川県, 2015年3月13日)
- 8) T. Matsutani, M. Date, R. Nishizawa, T. Kawasaki, T. Kodama and T. Ikuta, “Rapid Growth of Metal Oxide Insulator Film for Aberration Corrector Electrodes”, *The 8th International Workshop on Plasma Application and Hybrid Functionally Materials*, (Hawaii, USA, 9 Mar. 2015)
- 9) Y. Miyake, M. Hisaka and T. Ikuta, “Cross-sectional Biological Tissue Imaging by Using Phase-Contrast Scanning Microscope with Annular Illumination”, *13th Polish-Japanese Seminar on Biomedical Engineering*, (Osaka Electro-Communication University, Neyagawa, Osaka, Japan, 3 Nov. 2014)
- 10) M. Hisaka, “Phase-contrast scanning optical microscopy for biological tissues (Invited Paper)”, *Photonics Asia, SPIE, Optical Design and Testing VI*, 92720B, (Beijing, China, 10 Oct. 2014), doi:10.1117/12.2072566
- 11) 川崎忠寛, 石田高史, 松谷貴臣, 児玉哲司, 生田孝, 丹司敬義, “円環状絞りによるSTEM焦点深度拡大の検証実験”, 第75回応用物理学学会学術講演会(北海道大学, 札幌市, 北海道, 2014年9月19日)
- 12) 石田高史, 川崎忠寛, 丹司敬義, “ABF位相法による結晶構造の定量解析”, 第75回応用物理学学会学術講演会(北海道大学, 札幌市, 北海道, 2014年9月19日)
- 13) T. Ishida, T. Kawasaki, T. Kodama, K. Ogai, T. Ikuta and T. Tanji, “Phase reconstruction in annular bright-field STEM”, *International Microscopy Congress '14* (Prague, Czech, 7 Sep. 2014)
- 14) 石田高史, 川崎忠寛, 児玉哲司, 小粥啓子, 生田孝, 丹司敬義, “走査透過電子顕微鏡による環状アレイ型検出器を用いた位相ABF法の開発”, 日本顕微鏡学会第70回学術講演会(幕張メッセ国際会議場, 千葉市, 千葉県, 2014年5月11日)
- 15) Y. Miyake, M. Hisaka and T. Ikuta, “Phase-Contrast Optical Microscopy of

Biological Tissues Using Oblique Laser Illumination”, *Biological Imaging and Sensing Conference 2014*, (Pacifico Yokohama, Yokohama, Kanagawa, Japan, 23 Apr. 2014)

16) Y. Miyake, M. Hisaka and T. Ikuta, “Phase-Contrast Scanning Optical Microscopy of Biological Tissues Using Annular Illumination”, *Biological Imaging and Sensing Conference 2014*, (Pacifico Yokohama, Yokohama, Kanagawa, Japan, 22 Apr. 2014)

17) 石田高史, 川崎忠寛, 児玉哲司, 小粥啓子, 生田孝, 丹司敬義, “STEM による環状アレイ検出器を用いた位相再生”, 第 61 回応用物理学関係連合講演会 (青山学院大学, 渋谷区, 東京都, 2014 年 3 月 18 日)

18) 三宅泰広, 日坂真樹, 生田孝, “走査型位相差顕微鏡による生体組織の断面構造観察”, ライフサポート学会, 第 23 回フロンティア講演会 (東京理科大学葛飾キャンパス, 葛飾区, 東京都, 2014 年 2 月 28 日)

19) T. Kawasaki, T. Ishida, T. Matsutani, T. Kodama, K. Ogai, T. Ikuta and T. Tanji, “Experiments on focal depth extension of aberration-corrected scanning transmission electron microscope with annular aperture”, *International Symposium on EcoTopia Science '13* (Nagoya University, Nagoya, Aichi, Japan, 14 Dec. 2013)

20) T. Ishida, T. Kawasaki, T. Kodama, K. Ogai, T. Ikuta and T. Tanji, “Wave Front Reconstruction by an Optical Fiber Array Detector in STEM”, *International Symposium on EcoTopia Science '13* (Nagoya University, Nagoya, Aichi, Japan, 14 Dec. 2013)

21) T. Ishida, T. Kawasaki, T. Kodama, K. Ogai, T. Ikuta and T. Tanji, “Phase reconstruction by an optical fiber array detector in STEM”, *9th International Symposium on Atomic Level Characterizations for New Materials and Devices* (Hawaii, USA, 3 Dec. 2013)

22) 三宅泰広, 日坂真樹, 生田孝, “走査型位相差顕微鏡による深さ分解能の実験的検討”, 平成 25 年度電気関係関西連合大会講演論文集, Vol. G13-10 (2013) 417-418. (大阪電気通信大学, 寝屋川市, 大阪府, 2013 年 11 月 17 日)

23) 松谷貴臣, 川崎忠寛, 児玉哲司, 高井義造, 生田孝, “低エネルギーイオンビームを用いた表面処理”, 平成 25 年電気関係学会関西連合大会 (大阪電気通信大学, 寝屋川市, 大阪府, 2013 年 11 月 17 日)

24) T. Matsutani, T. Kawasaki, T. Kodama, Y. Takai, T. Ikuta, “Surface Finishing by Focused Ion Beam System Attached to Floating Type Low Energy Ion Gun”, *The 9th International Symposium on Applied Plasma Science* (Istanbul, Turkey, 26 Sep. 2013)

25) 三宅泰広, 日坂真樹, 生田孝, “輪帯照射を用いた走査型位相差光学顕微鏡による生体組織細胞の観察”, 生体医工学シンポジウム 2013 講演予集, Vol.4-2-10 (2013) 355-356.

(九州大学, 福岡市, 福岡県, 2013 年 9 月 21 日)

26) 石田高史, 川崎忠寛, 丹司敬義, 児玉哲司, 生田孝, 小粥啓子, “位相計測のための光ファイバーアレイ電子検出器の開発 2”, 日本顕微鏡学会第 69 回学術講演会 (ホテル阪急エキスポパーク, 吹田市, 大阪府, 2013 年 5 月 20 日)

27) 石田高史, 川崎忠寛, 丹司敬義, 児玉哲司, 生田孝, 小粥啓子, “電子線による位相計測のための光ファイバーアレイ検出器の開発”, 第 60 回応用物理学関係連合講演会 (神奈川工科大学, 厚木市, 神奈川県, 2013 年 3 月 30 日)

28) 川崎忠寛, 松谷貴臣, 児玉哲司, 生田孝, 丹司敬義, “円環絞りをを用いた収差補正 STEM の焦点深度拡大”, 日本顕微鏡学会第 56 回シンポジウム (北海道大学, 札幌市, 北海道, 2012 年 11 月 20 日)

29) 石田高史, 児玉哲司, 小粥啓子, 生田孝, “走査透過電子顕微鏡による位相計測のための電子検出器の開発”, 平成 24 年度電気関係学会東海支部連合大会 (豊橋技術科学大学, 豊橋市, 愛知県, 2012 年 9 月 24 日)

30) 石田高史, 児玉哲司, 生田孝, 小粥啓子, “位相計測のための光ファイバーアレイ電子検出器の開発”, 日本電子顕微鏡学会第 68 回学術講演会, (つくば国際会議場, つくば市, 茨城県, 2012 年 5 月 14 日)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 1 件)

名称: 荷電粒子ビーム用電磁レンズの球面収差補正装置

発明者: 川崎忠寛, 丹司敬義, 生田孝

権利者: 名古屋大学

種類・番号: 特願 2015-090241

出願年月日: 2015 年 4 月 27 日

国内外の別: 国内

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

生田 孝 (IKUTA TAKASHI)

大阪電気通信大学・工学部・教授

研究者番号: 20103343

### (2) 研究分担者

日坂 真樹 (HISAKA MASAKI)

大阪電気通信大学・医療福祉工学部・准教授

研究者番号: 40340640

川崎 忠寛 (KAWASAKI TADAHIRO)

名古屋大学・工学研究科・客員准教授

研究者番号: 10372533

児玉 哲司 (KODAMA TETSUJI)

名城大学・理工学部・教授

研究者番号: 50262861

松谷 貴臣 (MATSUTANI TAKAOMI)

近畿大学・理工学部・准教授

研究者番号: 00411413