

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 3 年 6 月 1 日現在

機関番号：82401

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18H03475

研究課題名(和文) 単一電子干渉に基づく電子線伝搬径路の遡及計測

研究課題名(英文) Measurement of vortex beam phase by electron holography

研究代表者

原田 研 (Harada, Ken)

国立研究開発法人理化学研究所・創発物性科学研究センター・上級研究員

研究者番号：20212160

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,400,000円

研究成果の概要(和文)：質量を持ち、粒子としての描像が優先する電子を用いた新たな干渉計測実験に成功した。具体的には、V字型二重スリットを開発し、電子波干渉顕微鏡の光学系を駆使し、実効的にスリットからの伝播距離ゼロでの干渉を単電子像レベルで実現した。これにより、干渉現象の発現とその前後の空間を同時、かつ一視野にて観察することに成功した。これはド・ブロイのパラドックス実験をミクロスコピックに実現したことと該当する。そして、この電子光学系では、電子の検出点からその伝搬径路の遡及が可能であり、電子が通過したスリットと検出点に至る経路情報を、観察者が確定できない場合にのみ、電子が干渉を発現することを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究により、単電子像の干渉計測が量子力学の不思議を見せる実験から、粒子線の量子効果を直接計測できる手法に発展した。また、本研究で開発された電子波干渉光学系により、電子線ではできなかったフーリエ変換ホログラフィーやホロコーン・フーコー法が実現でき、新たな電子波干渉顕微鏡の利用法が拓かれた。これらの新技術により、実空間から逆空間への伝搬中の電子らせん波の位相分布が明らかとなった。さらに、点過程の理論を単電子の分布像に適用するにあたり、地理学で利用されているK関数法およびL関数法を応用することにより、電子源から放出される電子の収束/分散関係が、伝播・検出後の電子分布から解析可能となった。

研究成果の概要(英文)：An optically zero propagation distance condition was realized in a double-slit experiment by using a 1.2-MV field-emission transmission electron microscope. Interference fringes composed of single-electron dots were controlled by using a novel optical system and two electron biprisms as interferometers. Using a V-shaped double slit, we observed simultaneously the interference features under the pre-interference condition, interference condition and post-interference condition of electron waves. This setup is similar to that of the de Broglie's gedanken experiment. By identify which slit an electron has passed through and which side of the electron biprism the electron has passed by, i.e. path information, we succeeded in controlling the electron trajectory. We conclude that interference occurs when the path information is not available, while no interference occurs when the path information is available. These results suggest that interference is related to information.

研究分野：電子線物理学および電子顕微鏡学

キーワード：不確定性原理 二重スリット 電子波干渉 電子相関計測 遡及計測

### 1. 研究開始当初の背景

19世紀初頭のYoungによる『二重スリットの実験』は、光の波動説を決定づけた実験として有名であるが、この実験を電子のような粒子を用いた場合には、量子力学の基礎である『波動/粒子の二重性(電子は粒子であるが同時に波動でもある)』を示せることが、1950年代にFeynmanや朝永振一郎により明らかにされていた。1970-80年代になり、電子顕微鏡を用いてこの実験が実施され、単電子による点像が積算され、次第に干渉縞を形成していく様子が観察された(図1参照)。

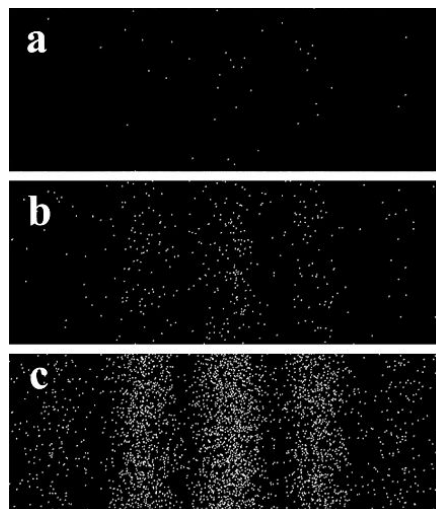


図1 単電子像の積算観察結果  
(a) 視野中電子数 41、(b) 約 400 個、  
(c) 約 4000 個。

この実験結果は「量子力学の真髄とその不思議を示す実験」として世に広められたが、粒であるはずの電子が、二つのスリットを同時に通過して、波と同じように干渉する、という日常感覚とはかけ離れた現象が、現在でも研究者を魅了し、数年ごとに同種の実験結果が報告されるという状況であった。しかしながら、それらの結果は、『さらに進んだ電子顕微鏡技術を用いたデモンストレーション実験』の域を出ないものであった。

### 2. 研究の目的

そこで本研究では、量子力学の不思議を示すデモンストレーション実験ではなく、量子力学の基礎を成す不確定性関係に迫れる実験を目指した。粒子線の中では最も制御技術が進んでいる電子線を用い、世界で最も可干渉性の高い電子源を備えた電子顕微鏡を用いた単電子干渉実験を計画した。自発的パラメトリック下方変換を利用してもつれた状態の2個の光子を使える光子の実験系には及ばなくても、質量を持ち粒子性が強く表れる電子による干渉現象を、精密にとらえ、その伝搬経路を遡ることによって、経路情報を後から遡及的に検出する実験手法の開発を目指した。これにより、干渉縞を構成する電子を検出した後、その電子がどちらのスリットを通過したか同定すること(which-way experimentの実現)少なくとも電子波干渉における粒子性の観測に新たな知見を得ることを目的とした。

### 3. 研究の方法

従来の二重スリットを用いた干渉実験では、二重スリットに可干渉な波を入射し、両スリットで分割・通過した二つの波がスリットを出た後、伝搬する過程で広がり自然に重なる性質を利用する。しかし、スリットが十分に細かい場合には、スリットを通過した波は急速に広がり互いに重なり合うため、どちらのスリットを通過した波かを区別するのは困難であった。そこで本研究は、対物レンズを用いて結像させる「結像光学系」を採用した。

図2に本研究で実施した、光学的伝搬距離ゼロでの二重スリット干渉実験の光学系の概要を示す。スリットを通過した二つの波の重なり具合は、対物レンズの下に配置した下部バイプリズムで、二つの波の偏向角度を変えて制御する。図2(a)は下部バイプリズムによる二つの波への偏向角度が小さいために二波が重ならない、干渉を発現する前の条件(前干渉条件) 図2(b)はスリットを通過した二つの波が重なり合い、干渉を発現している条件(干渉条件) 図2(c)は二つの波への偏向角度が大きくなり、二つのスリット像の位置が左右入れ替わった条件(後干渉条件)である。後干渉条件では、像面の上方で交差・重なり合い、干渉を発現していたと考えられる二つの波が、その後分かれて個別に観察される。

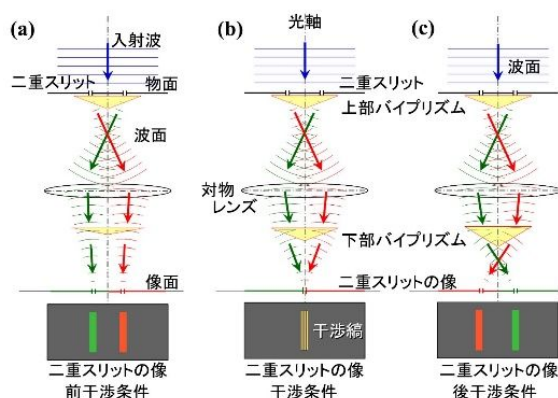


図2 伝搬距離ゼロでの二波干渉  
(a) 前干渉条件、(b) 干渉条件、  
(c) 後干渉条件

また、図2(a)では、物面上の左側のスリットを通過した波（赤色）が像面では右側のスリット像に収束し結像（赤色）し、物面上の右側のスリットを通過した波（緑色）が像面では左側のスリット像（緑色）に収束する。結像により図2(c)では図2(a)の左右逆となるが、それぞれの伝搬過程において、上下のバイプリズムの左右どちらを通過したかは明らかである。すなわち、電子を粒子と見なした場合の伝搬経路を、波面として赤色または緑色で表示した程度の範囲で同定することが可能である。

実験では、「V字型二重スリット」を用いることで、三つの干渉条件（前干渉条件、干渉条件、後干渉条件）を一つの視野で同時に観察できる電子光学系を考案した(図3)。V字型二重スリットを上部電子線バイプリズム上に結像させることで、二重スリットの波と上部電子線バイプリズムの波は共役な関係となり、図2に示したように二重スリットと上部電子線バイプリズムとは、光学的には同一平面上に配置されたことになる。そして、第二拡大レンズの下側に配置した下部電子線バイプリズムへの印加電圧により、二つの波の重なり具合を制御した。

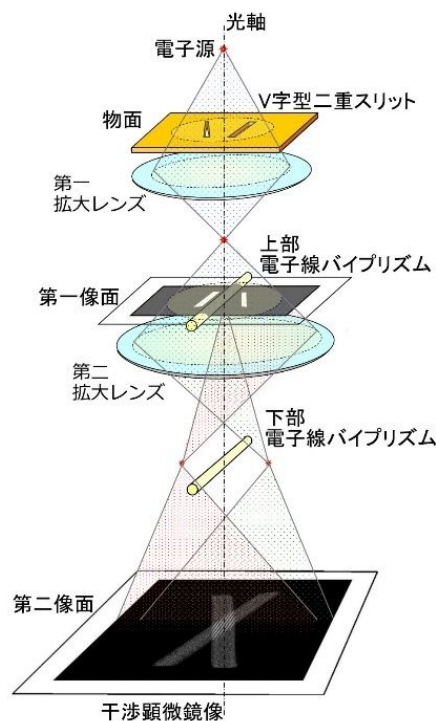


図3 V字型二重スリット干渉光学系

#### 4. 研究成果

##### (1) 単電子干渉実験 (K. Harada et al., APEX 14 (2021) 022006.)

図4に本研究の最も重要なV字型二重スリットによる単電子干渉像を示す。白点で記録されている単電子像は、スリットが重なっていない部分では一様な分布となっているが、二つのスリットが重なった部分では縞状の分布を形成している。この縞模様が、電子が波として干渉していることを示している。

図4中、赤と緑の破線で、左右どちらのスリットを通過した電子によるスリット像かを示している。前干渉領域、後干渉領域のいずれにおいても、それぞれのスリット像で点として検出された電子は、図2と図3で示したように経路をさかのぼることが可能で、電子線バイプリズムのどちら側を通過し、どちらのスリットを通過したかを同定できる。しかし、両スリット像が重なった干渉領域では、電子の経路を決める情報が不足しており、どちらの経路に対しても可能性を持っている。そして、この場合にのみ、干渉縞が観察され、あたかも、電子が両方のスリットを同時に通過し、電子線バイプリズムの両側の経路を同時に通過してきたかのように観測されている。

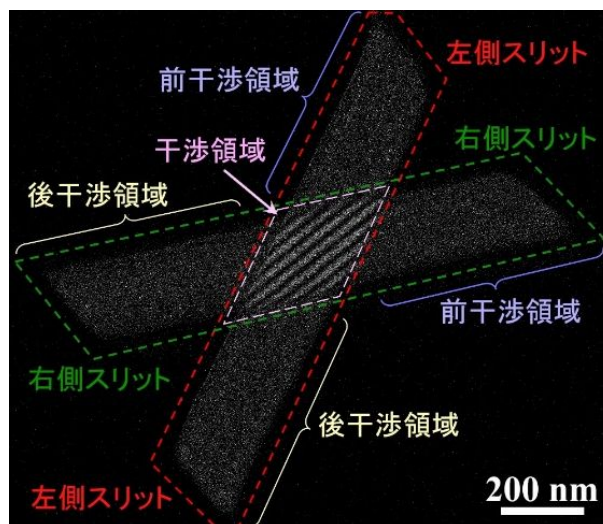


図4 V字型二重スリットによる電子波干渉像

量子力学では、どちらのスリットを通過するか見分ける実験を行うと、その実験が与える影響によって電子の軌道が乱されてしまい、干渉が発現せず、干渉縞が観察されないと説明する。しかし、今回の研究では、どちらのスリットを通過したかを判定する実験は行っていない。電子を検出した後に、検出位置から遡って、電子の経路と通過したスリットの同定が可能な光学系で干渉実験を行ったものである。しかし、結果は従来と同じで、どちらのスリットを通過したか見分けられた場合には干渉は発現せず、見分けられなかったときにだけ干渉が発現するという結果を得た。

以上の結果から、「電子がどちらのスリットを通過し、どちらの経路を通ったかの情報が不足している場合にのみ干渉が発現する」という解釈が可能で、近年光子の偏光を用いた量子光学実験と符合する結果となった。

## (2) 新しい電子波干渉法の開発

上記単電子干渉光学系の構築にあたって、複数の新しい電子波干渉光学系を開発した。以下に各々を簡単に記載する。

### 電子線フラウンホーファーホログラフィー (K. Harada et al., Microscopy 68 (2019) 254.)

従来、逆空間やフラウンホーファー (Fraunhofer) 領域では平面波として利用可能な参照波を得ることが難しく、ホログラフィーはほとんど実施されていなかった。本研究では上述した干渉実験で開発した二重スリット作製技術を利用して、極狭幅のスリット (幅 5 nm、長さ 10  $\mu\text{m}$ ) を参照波光源とするフラウンホーファーホログラフィーの実現に成功した。

図 5 (a) は幅 38 nm の単スリットを物体波としたフラウンホーファー回折波のホログラムである。図 5 (b)、(c) は再生位相分布とそのプロファイルである。光回折スポット周辺部に観察される位相差  $\pi$  のステップ状の位相変化と同様の変化が観察されており、フラウンホーファー領域、逆空間のホログラフィーが実現されていることがわかる。

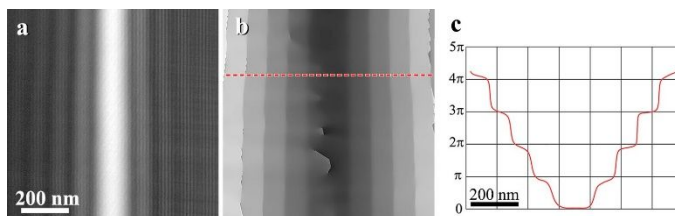


図 5 (a) スリットのフラウンホーファーホログラム、  
(b) 再生位相像、(c) 位相分布のプロファイル

単スリット位置に試料を設置すれば、電子線フラウンホーファーホログラフィーが実現できる新たな干渉法である。

### 電子線フーリエ変換ホログラフィー (K. Harada et al., Microscopy 69 (2020) 176.)

上述したフラウンホーファーホログラフィーの干渉技術をさらに高めるとともに、電子らせん波生成技術と合わせることで、レンズレス・フーリエ変換ホログラフィー (lens-less Fourier transform) に成功した。

電子らせん波は一般に逆空間 (ビームがスポットとなる位置: 回折面) で観察される。そのため、この位置では有効な参照波を作ることが難しく、電子線ホログラフィーは実現されていなかった。本研究では、回折面で透過波が点光源となることを利用し、らせん波と透過波との角度の関係を回折面から上下に少し外れた位置で記録するレンズレス・フーリエ変換ホログラフィーを実現した (図 6 (a) 参照)。

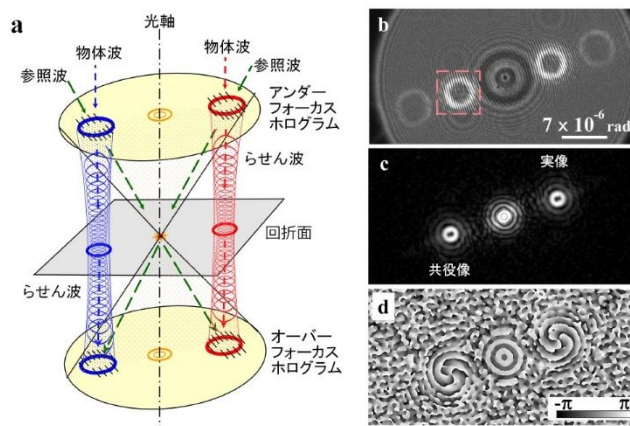


図 6 (a) フーリエ変換ホログラフィーの光学系、  
(b) らせん波のアンダーフォーカスホログラム、  
(c) 再生振幅分布、(d) 再生位相分布

これまで開発してきた電子線ホログラフィーによるらせん波の観察技術と合わせることで、回折格子を配置した実空間から逆空間までのらせん波を連続的かつ網羅的に再生・観察することができるようになった。これは、試料の電磁場の状態を実空間から逆空間までの間で、自由に計測することが可能となったことを意味している。

### ホロコーン・フーコー法 (K. Harada et al., APEX 12 (2019) 042003.)

試料の定まった領域を照射しつつ、光軸に対して傾斜した入射電子線を、光軸を中心とした全方位にわたって周回させる「ホロコーン照明」を用いて、ローレンツ顕微鏡法におけるフーコー法観察を実現する「ホロコーン・フーコー法」を開発した。

フーコー法として磁性体の磁気情報の可視化のため、対物レンズはオフ、あるいは、磁場印加装置として弱磁場の印加条件とした。角度制限絞りとして従来の制限視野絞りを、電磁場に

よる偏向・散乱を受けない透過電子線を結像に利用する明視野ホロコーン・フーコー像と透過電子線を結像しない暗視野ホロコーン・フーコー像とを、入射電子線の傾斜角度によって切り分ける観察法である。

図7にホロコーン・フーコー法により観察した FeGa 単結晶薄膜の明視野像(a)と暗視野像(b)を示す。フーコー法としてフォーカスの合った状態で磁区が観察されているだけでなく、磁壁も同時に観察されている点が、従来のフーコー法とは異なる点である。さらに、明視野像と暗視野像では、磁区と磁壁ともに、そのコントラストが反転している。この観察手法は、電子顕微鏡による磁気情報観察法として、フレネル法、フーコー法に続く第3のローレンツ顕微鏡法として位置づけられる。

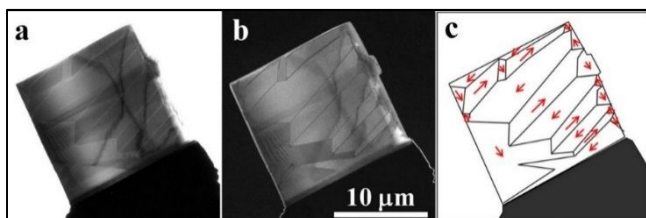


図7 ホロコーン・フーコー像 (FeGa 単結晶)  
(a) 明視野像、(b) 暗視野像、(c) 磁区構造模式図

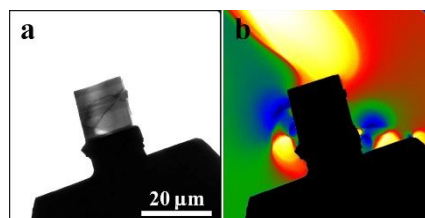


図8 シュリーレン像  
(a) 試料内像、(b) 試料外空間像

### 電子線シュリーレン顕微鏡法

上述したホロコーン・フーコー法において、明視野条件と暗視野条件への移行状態がシュリーレン条件に該当する。このシュリーレン条件は 19 世紀中庸に開発された位相差顕微鏡法の観察条件であり、電子顕微鏡での実施は本研究が初めてと考えられる。

シュリーレン条件では、光軸を挟んで相対する方位の電子波を角度制限絞りにて除去するため、方位角  $180^\circ$  を持った波動場の干渉効果が除かれている。その結果、光軸非対称の結像となり、通常は現れない位相分布が強度分布に変換されて可視化される。

図8にシュリーレン像の一例を示す。図7と同じ試料に対して、入射電子線の傾斜角を変えて観察したものである(図7の(a)と(b)の間の条件)。フーコー像として試料内の磁区と磁壁のコントラストは消失している(図8(a))が、試料外の空間には試料から漏れ出た電磁場に由来するコントラストが観察されている(図8(b))。この結果は、空間電磁場の新しい可視化法として有効な技術と判断され、現在も研究を継続中である。

### (3) 単電子分布像の解析における点過程理論の応用 K 関数法、L 関数法の適用

本研究では、単電子検出された電子の空間分布解析方法を開発するにあたり、電子間の距離の分布について点過程の理論を応用し、ある点の位置は他の点の位置に影響しない完全空間ランダム条件からの乖離を調べることにより、与えられた点分布に何らかの空間パターンが存在しているか否かを判定する手法について検討した。

点分布の空間パターンを解析する方法としては、区間法や最近隣距離法があるが、本研究では点分布内の各点から距離以内にある他の点の個数を数える K 関数法を用いた。K 関数は任意の点像を中心に描いた半径  $r$  の円の中に入る他の点像の数を点像の密度  $\lambda$  で除したものであり、完全空間ランダム (Poisson) 分布であればその K 関数は  $\lambda \pi r^2 / \lambda = \pi r^2$  となり放物線を描く。この放物線と比較して、点像分布の K 関数が上にあれば点像分布は集群傾向を持ち、下にあれば反集群傾向を持つと判定できる。図9に4 frame の点像分布とランダム分布の K 関数を示す。K 関数は放物線を描いており、ほぼ空間ランダムに電子が分布・検出されていると判定される。

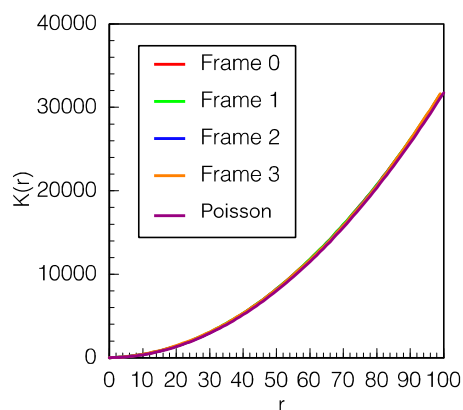


図9 電子計数画像の K 関数

しかし、K 関数法では、点像数や frame 数が少ない場合には精度が出ない。そこで放物線を描く K 関数を線形化し直線を描くように処理した L 関数を検討した。その結果、L 関数によれば、図9では放物線からの差異が小さくランダム分布と判断された電子分布が、若干の集群傾向を持つことが判明した。詳細は現在解析中である。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計19件（うち査読付論文 19件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 6件）

1. 著者名 Harada Ken, Niitsu Kodai, Shimada Keiko, Kodama Tetsuji, Akashi Tetsuya, Ono Yoshimasa A, Shindo Daisuke, Shinada Hiroyuki, Mori Shigeo	4. 巻 68
2. 論文標題 Electron holography on Fraunhofer diffraction	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Microscopy	6. 最初と最後の頁 254 ~ 260
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/jmicro/dfz007	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Kodama Tetsuji, Kawasaki Tadahiro, Ikuta Takashi	4. 巻 68
2. 論文標題 Properties of electrostatic correcting systems with annular apertures	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Microscopy	6. 最初と最後の頁 457 ~ 466
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/jmicro/dfz035	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 -
1. 著者名 原田 研、明石 哲也、森 茂生	4. 巻 54
2. 論文標題 非対称な二重スリットを用いた電子波干渉実験	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 顕微鏡	6. 最初と最後の頁 98 ~ 103
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11410/kenbikyo.54.2_98	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 -
1. 著者名 Harada Ken, Kawaguchi Atsushi, Kotani Atsuhiko, Fujibayashi Yukihiro, Shimada Keiko, Mori Shigeo	4. 巻 12
2. 論文標題 Hollow-cone Foucault imaging method	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Applied Physics Express	6. 最初と最後の頁 042003 ~ 042003
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7567/1882-0786/ab0523	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Harada Ken, Shimada Keiko, Ono Yoshimasa A.	4. 巻 13
2. 論文標題 Electron holography for vortex beams	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Applied Physics Express	6. 最初と最後の頁 032003 ~ 032003
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1882-0786/ab7059	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Harada Ken, Ono Yoshimasa A, Takahashi Yoshio	4. 巻 69
2. 論文標題 Lensless Fourier transform electron holography applied to vortex beam analysis	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Microscopy	6. 最初と最後の頁 176 ~ 182
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/jmicro/dfaa008	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Kotani Atsuhiko, Nakajima Hiroshi, Kawaguchi Atsushi, Fujibayashi Yukihiro, Uchihashi Kento, Shimada Keiko, Harada Ken, Mori Shigeo	4. 巻 59
2. 論文標題 Magnetic bubbles in an M-type hexagonal ferrite observed by hollow-cone Foucault imaging and small-angle electron diffraction	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 095003 ~ 095003
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/aba9e9	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 -

1. 著者名 Akashi Tetsuya, Takahashi Yoshio, Harada Ken	4. 巻 69
2. 論文標題 Development of a Mach-Zehnder type electron interferometer on a 1.2-MV field-emission transmission electron microscope	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Microscopy	6. 最初と最後の頁 411 ~ 416
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/jmicro/dfaa040	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 -

1. 著者名 Harada Ken, Akashi Tetsuya, Takahashi Yoshio, Kodama Tetsuji, Shimada Keiko, Ono Yoshimasa A., Mori Shigeo	4. 巻 14
2. 論文標題 Electron interference experiment with optically zero propagation distance for V-shaped double slit	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Applied Physics Express	6. 最初と最後の頁 022006 ~ 022006
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1882-0786/abd91e	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Harada Ken	4. 巻 70
2. 論文標題 Interference and interferometry in electron holography	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Microscopy	6. 最初と最後の頁 3 ~ 16
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/jmicro/dfaa033	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Mori Shigeo, Nakajima Hiroshi, Kotani Atsuhiko, Harada Ken	4. 巻 70
2. 論文標題 Recent advances in small-angle electron diffraction and Lorentz microscopy	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Microscopy	6. 最初と最後の頁 59 ~ 68
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/jmicro/dfaa048	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 -

1. 著者名 Harada K., Akashi T., Niitsu K., Shimada K., Ono Y. A., Shindo D., Shinada H., Mori S.	4. 巻 24
2. 論文標題 New Interference Experiment with Asymmetric Double Slits by 1.2 MV FE-TEM	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Microscopy and Microanalysis	6. 最初と最後の頁 1966 ~ 1967
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1017/S1431927618010310	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 -



1. 著者名 Harada Ken, Niitsu Kodai, Shimada Keiko, Kodama Tetsuji, Akashi Tetsuya, Ono Yoshimasa A., Shindo Daisuke, Shinada Hiroyuki, Mori Shigeo	4. 巻 25
2. 論文標題 Electron Holography on Fraunhofer Diffraction Using Double Slit	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Microscopy and Microanalysis	6. 最初と最後の頁 102 ~ 103
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1017/S1431927619001247	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 -

1. 著者名 Harada K., Kawaguchi A., Kotani A., Fujibayashi Y., Shimada K., Mori S.	4. 巻 25
2. 論文標題 Hollow-Cone Foucault Imaging Method for Magnetic Structure Observations	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Microscopy and Microanalysis	6. 最初と最後の頁 120 ~ 121
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1017/S1431927619001338	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 -

1. 著者名 Harada Ken, Kodama Tetsuji, Akashi Tetsuya, Takahashi Yoshio, Shimada Keiko, Ono Yoshimasa A., Shindo Daisuke, Shinada Hiroyuki, Mori Shigeo	4. 巻 25
2. 論文標題 Double-Slit Electron Interference Experiment with Zero Propagation Distance Using Electron Biprism	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Microscopy and Microanalysis	6. 最初と最後の頁 944 ~ 945
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1017/S1431927619005452	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 -

1. 著者名 Mori Shigeo, Kotani Atsuhiko, Harada Ken	4. 巻 26
2. 論文標題 Hollow-cone Foucault Imaging of Magnetic Textures in Hexagonal Ferrite ; BaFe <sub>10.35</sub> Sc <sub>1.6</sub> Mg <sub>0.05</sub> O <sub>19</sub>	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Microscopy and Microanalysis	6. 最初と最後の頁 1766 ~ 1769
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1017/S1431927620019273	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 -

1. 著者名 Mori Shigeo, Kawaguchi A, Harada Ken	4. 巻 26
2. 論文標題 Hollow-cone Foucault Imaging of Magnetic Microstructures in Large Magnetostrictive FeGa Alloy	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Microscopy and Microanalysis	6. 最初と最後の頁 2146 ~ 2147
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1017/S1431927620020590	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 -

1. 著者名 Harada Ken, Takahashi Yoshio, Akashi Tetsuya, Ono Yoshimasa, Kodama Tetsuji, Mori Shigeo	4. 巻 26
2. 論文標題 Double-Slit Electron Interference Experiment with Phase Modulation	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Microscopy and Microanalysis	6. 最初と最後の頁 2152 ~ 2153
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1017/S1431927620020620	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 -

1. 著者名 Harada Ken, Ono Yoshimasa, Takahashi Yoshio	4. 巻 26
2. 論文標題 Lens-less Fourier Transform Holography for Electron Vortex Beams	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Microscopy and Microanalysis	6. 最初と最後の頁 2484 ~ 2486
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1017/S1431927620021741	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34件 (うち招待講演 2件 / うち国際学会 15件)

1. 発表者名 Ken Harada, Yoshio Takahashi, Tetsuya Akashi, Yoshimasa A. Ono Tetsuji Kodama and Shigeo Mori
2. 発表標題 Double Silt Electron Interference Experiment with Phase Modulation
3. 学会等名 Microscopy & Microanalysis 2020: (Microscopy Society of America) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Ken Harada, Yoshimasa A. Ono and Yoshio Takahashi
2. 発表標題 Lens-less Fourier Transform Holography for Electron Vortex Beams
3. 学会等名 Microscopy & Microanalysis 2020: (Microscopy Society of America) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Shigeo Mori, Atsushi Kawaguchi, Atsuhiko Kotani, Hiroshi Numakura, Yui Ishii and Ken Harada
2. 発表標題 Hollow-cone Foucault imaging of magnetic microstructures in large magnetostrictive FeGa alloy
3. 学会等名 Microscopy & Microanalysis 2020: (Microscopy Society of America) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Shigeo Mori, Atsuhiko Kotani and Ken Harada
2. 発表標題 Hollow-cone Foucault imaging of magnetic textures in hexagonal ferrite; BaFe <sub>10.35</sub> Sc <sub>1.6</sub> Mg <sub>0.05</sub> O <sub>19</sub>
3. 学会等名 Microscopy & Microanalysis 2020: (Microscopy Society of America) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Ken Harada
2. 発表標題 Mystery and beauty of electron interference
3. 学会等名 Materials Science Colloquia 2019-20, Osaka Prefecture University (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 原田 研、高橋由夫、明石哲也、児玉哲司、小野義正、森 茂生
2. 発表標題 Double Slit Electron Wave Experiment with Phase Modulation
3. 学会等名 日本顕微鏡学会第76回学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 中島右裕、児玉哲司、明石哲也、高橋由夫、森茂生、原田 研
2. 発表標題 電子計数画像の点分布の空間パターン解析
3. 学会等名 日本顕微鏡学会第76回学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 原田 研、小野義正、高橋由夫
2. 発表標題 Lens-less Fourier Transform Holography for Vortex Beams
3. 学会等名 日本顕微鏡学会第76回学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 中島右裕、児玉哲司、明石哲也、高橋由夫、森茂生、原田 研
2. 発表標題 電子計数画像の点分布の空間パターン
3. 学会等名 電気・電子・情報関係学会 東海支部連合大会（令和2年度）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 原田 研、小野義正、高橋由夫
2. 発表標題 レンズレスフーリエ変換ホログラフィーによる電子らせん波の観察
3. 学会等名 日本表面真空学会学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 原田 研、高橋由夫、明石哲也、児玉哲司、鳶田恵子、小野義正、森茂生
2. 発表標題 位相変調を伴う二重スリット干渉実験
3. 学会等名 日本表面真空学会学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 中島右裕、児玉哲司、明石哲也、高橋由夫、森茂生、原田 研
2. 発表標題 電子計数画像の点分布の空間パターン解析の試み
3. 学会等名 日本顕微鏡学会第63回シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 原田 研、高橋由夫、明石哲也、児玉哲司、小野義正、森茂生
2. 発表標題 電子波干渉におけるコヒーレンスと移送変調の検討
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中島右裕、児玉哲司、明石哲也、高橋由夫、森茂生、原田 研
2. 発表標題 電子波における計数画像の点分布の空間パターン解析
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Ken Harada
2. 発表標題 Double-Slit Electron Interference Experiment with Optically Zero Propagation Distance Using Electron Biprisms
3. 学会等名 Microscopy Society of Canada 2019 (MSC2019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tetsuji Kodama, Tadahiro Kawasaki and Takashi Ikuta
2. 発表標題 Properties of electrostatic correcting systems with circular hole and annular apertures
3. 学会等名 The 6th International Symposium on Advanced Microscopy and Theoretical Calculations (AMTC-6) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Ken Harada, Tetsuji Kodama, Tetsuya Akashi, Yoshio Takahashi, Keiko Shimada, Yoshimasa A. Ono, Daisuke Shindo, Hiroyuki Shinada and Shigeo Mori
2. 発表標題 Double-Slit Electron Interference Experiment with Zero Propagation Distance Using Electron Biprism
3. 学会等名 Microscopy & Microanalysis 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Ken Harada, Kodai Niitsu, Keiko Shimada, Tetsuji Kodama, Tetsuya Akashi, Yoshimasa A. Ono, Daisuke Shindo, Hiroyuki Shinada and Shigeo Mori
2. 発表標題 Electron holography on Fraunhofer diffraction using double slit
3. 学会等名 Microscopy & Microanalysis 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Ken Harada, Atsushi Kawaguchi, Atsuhiko Kotani, Yukihiro Fujibayashi, Keiko Shimada and Shigeo Mori
2. 発表標題 Hollow-cone Foucault imaging method for magnetic structure observations
3. 学会等名 Microscopy & Microanalysis 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Atsushi Kawaguchi, Atsuhiko Kotani, Ken Harada, Hiroshi Numakura, Yui Ishii and Shigeo Mori
2. 発表標題 Hollow-cone Foucault Imaging of Magnetic Microstructures in Large Magnetostrictive FeGa Alloy
3. 学会等名 Microscopy Conference 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Ken Harada, Tetsuji Kodama, Tetsuya Akashi, Yoshio Takahashi, Keiko Shimada, Yoshimasa A. Ono, Daisuke Shindo, Hiroyuki Shinada and Shigeo Mori
2. 発表標題 Interference Experiment with Optically Zero Propagation Distance between Double-Slit and Observation Plane
3. 学会等名 Microscopy Conference 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Ken Harada, Atsushi Kawaguchi, Atsuhiko Kotani, Yukihiro Fujibayashi, Keiko Shimada and Shigeo Mori
2. 発表標題 Hollow-Cone Foucault Imaging for Magnetic Structure Observations
3. 学会等名 Microscopy Conference 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Ken Harada
2. 発表標題 Visualization of Vortex Beam Phase by Electron Holography
3. 学会等名 International Conference on Materials and Systems for Sustainability (ICMaSS2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 原田 研、児玉哲司、明石哲也、高橋由夫、鳶田恵子、小野義正、進藤大輔、品田博之、森 茂生
2. 発表標題 パイブリズムを用いた伝播距離ゼロでの二重スリット電子波干渉実験
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 原田 研、新津甲大、鳶田恵子、児玉哲司、明石哲也、小野義正、進藤大輔、品田博之、森 茂生
2. 発表標題 電子線フラウンホーファーホログラフィー
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 原田 研、川口惇史、小谷厚博、藤林征宏、鳶田恵子、森 茂生
2. 発表標題 ホロコーン・フーコー法
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 原田 研、高橋由夫、明石哲也、児玉哲司、鳶田恵子、小野義正、森茂生
2. 発表標題 位相変調を伴う電子波干渉実験
3. 学会等名 日本物理学会第75回年次大会 (2020年)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 大迫明弘、吉年規治、藤林征宏、内橋研人、石井悠衣、原田 研、森茂生
2. 発表標題 アモルファス軟磁性合金の結晶化過程と磁区構造
3. 学会等名 日本金属学会第166回講演大会 (2020年春季)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 原田研、明石哲也、新津甲大、鳶田恵子、小野義正、進藤大輔、品田博之、森茂生
2. 発表標題 1.2MV-TEMを用いた非対称な二重スリットによる電子波干渉実験
3. 学会等名 日本顕微鏡学会第74回学術講演会: (久留米シティプラザ)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 小國宏樹, 児玉哲司, 川崎忠寛, 生田孝
2. 発表標題 電界レンズによる球面収差補正器の基本特性の解析
3. 学会等名 日本顕微鏡学会第74回学術講演会: (久留米シティプラザ)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 小國宏樹, 児玉哲司, 川崎忠寛, 生田孝
2. 発表標題 電界レンズによる球面収差補正器の解析
3. 学会等名 平成30年度 電気・電子・情報関係学会東海支部連合大会: (名城大学)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 原田研、児玉哲司、明石哲也、高橋由夫、鳶田恵子、小野義正、進藤大輔、品田博之、森茂生
2. 発表標題 電子線パイプリズムを用いた伝搬距離ゼロでの二重スリット電子波干渉実験
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会: (九州大学)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Ken Harada, Tetsuya Akashi, Kodai Niitsu, Keiko Shimada, Yoshimasa A. Ono, Daisuke Shindo, Hiroyuki Shinada and Shigeo Mori
2. 発表標題 New interference experiment with asymmetric double slits by 1.2 MV FE-TEM
3. 学会等名 Microscopy & Microanalysis 2018: (Baltimore, Maryland, USA) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Ken Harada, Tetsuya Akashi, Kodai Niitsu, Keiko Shimada, Yoshimasa A. Ono, Daisuke Shindo, Hiroyuki Shinada and Shigeo Mori
2. 発表標題 Interference experiment with asymmetric double slit by 1.2 MV-TEM
3. 学会等名 19th International Microscopy Congress (IMC19): (Sydney, Australia) (国際学会)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計2件

産業財産権の名称 干渉光学系ユニット、荷電粒子線干渉装置、及び荷電粒子線干渉像観察方法	発明者 原田 研、鳶田恵子、 森茂生、小谷厚博	権利者 理化学研究所、 大阪府立大学
産業財産権の種類、番号 特許、PCT/JP2019/029360	出願年 2019年	国内・外国の別 外国

産業財産権の名称 干渉光学系ユニット、荷電粒子線干渉装置、及び荷電粒子線干渉像観察方法	発明者 原田研、鳶田恵子、 森茂生、小谷厚博	権利者 理化学研究所、 大阪府立大学
産業財産権の種類、番号 特許、特願2018-140161	出願年 2018年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔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
研究 分担者	森 茂生 (Mori Shigeo)  (20251613)	大阪府立大学・工学(系)研究科(研究院)・教授  (24403)	
研究 分担者	児玉 哲司 (Kodama Tetsuji)  (50262861)	名城大学・理工学部・教授  (33919)	

	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
研究 協力者	鳶田 恵子 (Shimada Keiko)	理化学研究所	

6. 研究組織（つづき）

	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
研究協力者	小野 義正  (Ono Yoshimasa)	理化学研究所	
研究協力者	高橋 由夫  (Takahashi Yoshio)	日立製作所	
研究協力者	明石 哲也  (Akashi Tetsuya)	日立製作所	
研究協力者	新津 甲大  (Niitsu Kodai)	京都大学	

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