

令和 3 年 6 月 1 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2017～2020

課題番号：17H02737

研究課題名(和文) コヒーレント偏極電子プローブを活用した次世代スピン分析法の開発

研究課題名(英文) Development of a novel spin-analysis using a coherent spin-polarized electron beam

研究代表者

桑原 真人 (Kawahara, Makoto)

名古屋大学・未来材料・システム研究所・准教授

研究者番号：50377933

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,500,000円

研究成果の概要(和文)：コヒーレントスピン偏極電子線を収束プローブビームへと応用し、低加速走査電子顕微鏡における色収差低減効果を利用したナノスピン電子プローブの実現に成功した。また、マルチフェロイック材で発現する磁性ナノ構造の計測を実現し、ピコ秒の時間分解能での時間分解計測に成功した。これにより薄膜における局所磁化状態の緩和過程や相転移などの学理的解明が可能となった。他方、時間・空間のコヒーレンスとスピンを考慮した強度干渉実験によりスピン効果を実験的に実証し、スピン偏極電子線の新しい利用方法を示すことに成功した。これにより、量子効果も含めたスピン/時間分解電子顕微鏡法が新たに切り開かれた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本成果は、量子効果も含めたスピン/時間分解電子顕微鏡法の道を切り開いたものであり、次世代スピデバイス開発や先端磁性材料の高度化の促進が期待される。また、物質中の素励起や光誘起現象の過渡現象、さらにはスピン緩和過程の同定等により、省エネルギー材料や光エネルギー変換材料への寄与が可能となる。本手法は、次世代メモリの動的観察のみならず、鉄鋼材料の磁性状態解析、高効率モーター開発のためのレアメタルフリー永久磁石材料やスピン流を用いる新しい情報デバイスの開発に広く応用されることが期待できる。このように、次世代の電子線応用分析機器の発展を可能にした点は、産業への波及効果を十分内在するものである。

研究成果の概要(英文)：Coherent spin-polarized electron beam was applied to conversion probe-beam in a low-voltage scanning electron microscope to reduce chromatic aberration and enhance the spatial resolution of spin-resolved analysis. Alongside we succeeded in nano-structure analysis of magnetic materials and time-resolved measurement with pico-second temporal resolution using the newly developed electron microscopy. Consequently, our analytical methods can clarify dynamics of phase-transitions and relaxation process in the local state of magnetism. In contrast, considering the abilities of spin-polarization and long temporal and spatial coherent lengths that contribute to enhance the antibunching effect in an intensity interference measurement, we could reveal the spin-effect in the second-order interference term. These result in this project will open new spin-analysis involving quantum effects for nano-imaging of functional materials.

研究分野：電子顕微鏡

キーワード：スピン コヒーレンス マルチフェロイック 電子顕微鏡 ナノ構造解析

1. 研究開始当初の背景

1-1. コヒーレントスピン偏極電子線の重要性(研究動向と位置づけ)

電子の自由度であるスピンは、スピントロニクス分野や量子情報、ナノ磁性デバイスに至る物性分野、更には素粒子物理において、その根幹をなす物理量である。この量を量子ビームに付与したスピン偏極電子ビームは、これら分野において絶大な威力を発揮するツールとなる。

現在、スピン偏極電子ビームは唯一 NEA (Negative Electron Affinity (負の電子親和性)) 表面を有するフォトカソード型 (NEA-PC) 電子銃により生成可能である。このスピン偏極電子源を含む NEA-PC 電子源は、電子顕微鏡に代表される計測・分析アプリケーションにおいて、高輝度かつ狭いエネルギー分散を実現できる高性能電子源として注目を浴びている。これに伴い、スピン偏極 LEEM やスピン偏極透過電子顕微鏡 (SP-TEM) の開発が進められてきており、スピン偏極電子線を用いて 1nm の空間分解能や 0.2eV のエネルギー分解能、200nm を超える空間コヒーレント長が実現されている。さらに NEA-PC 電子源は優れたパルス応答を有する電子源であるため、空間マッピングをピコ秒～フェムト秒の時間分解測定を可能とするものとしても、大きく注目をされている。これらは、ナノメートル以下の局所スピン情報やその位相情報の時間発展について、原子・分子レベルでの学理的解明に貢献する重要意義を有している。

1-2. 国内外の状況

電子線応用分析の分野においては、レーザー駆動方式の光陰極電子銃を用いた TEM の開発が様々な機関 (米国・Caltech, スイス・EPFL, ドイツ・Göttingen 大学, フランス・Strasbourg 大学) で精力的に進められており、ナノ秒から数百フェムト秒の時間分解能の実現を目指している。この電子源には、LaB₆ や銀ターゲットに紫外レーザー照射することで電子放出をさせるタイプが用いられており、無偏極、低い輝度、エネルギー線幅の広さや空間干渉性の乏しさなどの問題が浮き彫りになってきている。一方、NEA-PC 電子源では、完全にレーザー制御された電子線発生を実現しており、このような問題を克服できる方式として有望視され、注目を集めている状況にある。さらに我々は、NEA-PC を用いた TEM 開発では先駆的立場をとってきており、次に示す種々の高機能性を有していることを明らかにしている。

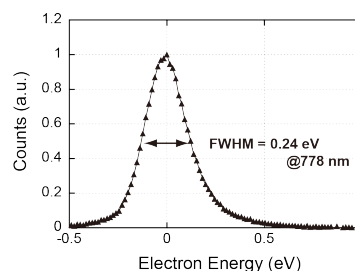


図1. スピン偏極電子線のエネルギー分散幅

M. Kuwahara et al., *Appl. Phys. Lett.* (2012)

1-3. 着想に至った経緯(これまでの研究成果およびその発展)

我々は、NEA-PC 電子源を電子顕微鏡に応用することに既に成功し、電子線の高いクオリティが必須となる TEM での使用に耐えることを実証した。その中でも、①1nm 分解能の TEM 像取得、②ピコ秒電子パルスによる時間分解測定の実現、③10⁸A/cm²sr@30keV の高い輝度と 3×10⁻⁹ m·rad の低い初期エミッタンス、④92% の高いスピン偏極度、⑤0.12～0.24eV の狭いエネルギー分散幅 (図1)、そして⑥干渉性の実証 (図2) と電子線ホログラフィーが実現できることを世界に先駆け実証してきた。

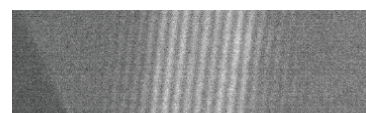


図2. 半導体フォトカソードから発生したスピン偏極電子線による干渉縞

M. Kuwahara et al., *Appl. Phys. Lett.* (2014)

特に注目すべきはスピン偏極した電子線が十分な空間コヒーレンスを持つこと、低エミッタンスかつ単色性を有することである。この性能をいかんなく発揮するには、低エネルギー領域において収束電子プローブビームとして活用することが最適である。プローブ径 d_p は

$$d_p = \sqrt{(C_0^2 + 0.36\lambda^2)\alpha^{-2} + \frac{1}{4}C_s^2\alpha^6 + C_c^2\left(\frac{\Delta E}{E}\right)^2\alpha^2}$$

と与えられる。規格化初期エミッタンス ϵ_{nix} とビーム輸送効率 η から見積もられる係数 C_0 ($= 2\sqrt{\eta/(\gamma^2 - 1)}\epsilon_{nix}$) に依存する項 d_0 、球面収差係数 C_s および色収差係数 C_c に依存する項 d_s および d_c 、そして回折から求められる項 d_q からなる。30keV におけるスピン偏極電子線のプローブ径を見

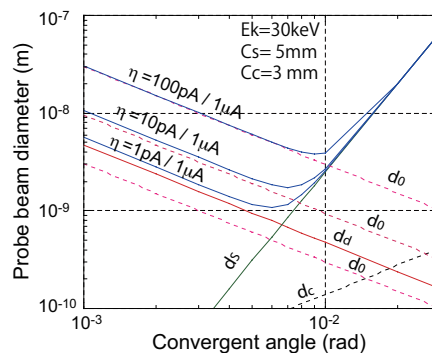


図3. SPTEM (30keV) におけるプローブ径の収束角依存性。

M. Kuwahara et al., *Kenbikyō* (2020)

積もると、回折限界を下回る d_0 が実現でき、十分に細いプローブ径を得られることが分かる(図3)。さらに、単色性能を加味すると低加速 SEM の色収差低減に大きく寄与することが期待される。この状況下において、電子線のコヒーレンスを活用することができれば、コヒーレント EBSD パターン、スピン逆光電子分光マッピングが可能となり、高い空間分解能を保ちつつ効果的にスピン分析が可能となる。また、コヒーレンスを保っていることから、位相回復・回折顕微法の低速電子線への応用も可能となる。また、低速化が可能となれば、電子線の波長を原子間距離相当に合わせることができ、物質のキラリティ情報を抽出することも可能となる等、スピン依存散乱効果を最大化することができる。

2. 研究の目的

電子波面の揃ったスピン偏極電子線生成の成功により、そのコヒーレント状態を操作した新しい電子プローブの可能性が示唆されている。また、低い初期エミッタンスと単色性の高さから、低加速走査電子顕微鏡における色収差低減効果を利用したナノスピン電子プローブの実現が可能となる。そこで本研究では、コヒーレントスピン偏極電子線を収束プローブビームへと応用し、スピンや時間/空間の変調を付加した新しい量子ビームの開発を進める。この電子プローブを入射電子とした時の散乱過程を利用した新しいスピン計測の開拓も目指す。これにより、マルチフェロイック材等を舞台にナノレベルで発現する磁性状態を可視化し、局所スピン状態の緩和過程や相転移などの学理的解明を目指す。これにより、次世代スピンドバイス開発や先端磁性材料の高度化を促進する。

特に以下の内容を明らかにし、コヒーレントなスピン偏極電子線のプローブビームとしての応用による新しいスピン分析手法の開拓を進める。

- ・ 低加速 SEM において色収差低減効果による空間分解能の向上を実現する。
- ・ スピン偏極電子銃と走査型電子顕微鏡(STEM/TEM および SEM)において超高速時間分解計測を実現する。
- ・ コヒーレントなスピン偏極電子線を用いて相互作用過程におけるスピン偏極度依存性を示す。
- ・ らせん磁性やスキルミオンなどの特異な磁性特性の分析へ応用し、この新しい分析手法の有効性を検証する。

3. 研究の方法

コヒーレントなスピン偏極電子線を収束プローブビームとし、散乱電子を高精度に計測することでスピン計測を実現する。さらに、スピンおよび時間・空間変調を付加することで、コヒーレント照射を利用した新しい高精度スピン偏極計測手法の開拓を目指す。このため、半導体フォトカソードからコヒーレントに放出される単色スピン偏極電子線を走査型電子顕微鏡に導入し、低色収差・低エミッタンスの収束プローブビームを実現する。また、散乱電子のプローブスピン方向依存性ならびに照射エネルギー依存を計測することで、最適な利用方法を探索する。この照射条件において先端磁性材料を測定し、時空間変調したスピン偏極ビームの有効性を実証する。これにより新しいスピン分析法の開拓を進める。

4. 研究成果

4-1. スピン偏極電子銃を搭載した走査型電子顕微鏡によるナノプローブ電子線の実現

電子顕微鏡に搭載可能な構造設計を施した、NEA 表面を有する半導体フォトカソードを用いたスピン偏極電子銃を開発し、走査電子顕微鏡(STEM, SEM)へ搭載することに成功した。開発した電子銃を STEM 機への搭載した実機写真を図4に示す。これにより、スピン偏極電子線エネルギーを100keV まで高めた実験が可能となった。本装置にて取得された電子顕微鏡像と回折図形を図5に示す。1nm 以下の高分解能を実現するスピン偏極パルス電子顕微鏡開発に成功した。また回折図形も容易に取得できることから、結晶の秩序に応じたスピン分解/時間分解解析が可能となる。

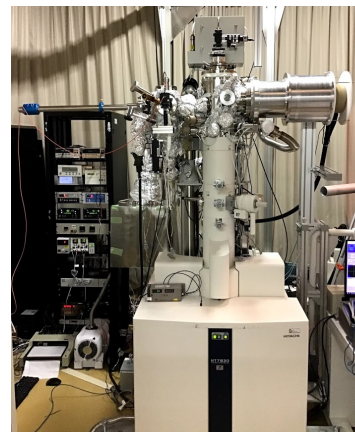


図 4. 開発した 100keV スピン偏極

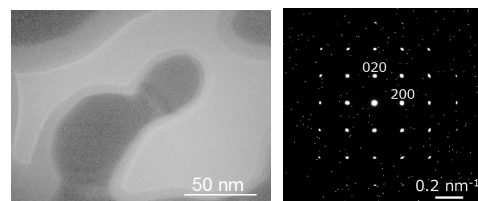


図5. ピコ秒パルス偏極電子発生モードで取得した金粒子の電子顕微鏡像(左図)と電子回折図形(右図)。

一方、低加速電圧による電子顕微鏡実験を可能にするため、スピン偏極電子銃を低加速 SEM へ搭載する開発研究を進めた。この結果、1keV の低エネルギー偏極電子線による二次電子像 (SE 像)、後方散乱電子像 (BSE 像) の取得に成功した。また、取得された低加速 SE 像から、スピン偏極電子銃の特徴である低エネルギー分散幅 ΔE の寄与を確認することに成功した。図6に、同じ鏡体を用いた時のスピン偏極電子源 (左図) による SE 像とショットキー電子源 (右図) による SE 像を示す。エネルギー分散幅が小さいことによる色収差低減効果を観測することに成功し、スピン偏極電子銃による高分解能化が可能であることを実証した。他の収差係数の寄与を加味した収束電子プローブ径の収束角依存性をプロットしたものを図7に示す。エネルギー分散が小さいことにより、極小値となる収束角は大きくなることになり、実験においても同様の結果を得ることができた。また、4分割 BSE 検出器を導入し、BSE 像および差分像を計測することにも成功した。

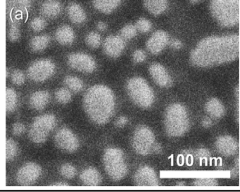
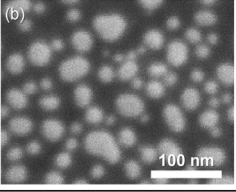
Electron gun	NEA photocathode	Schottky emitter (conventional)
SEM image		
DR value	6.4 nm	7.6 nm

図6. スピン偏極電子銃による SE 像 (左) とショットキー電子銃による SE 像 (右)

H. Morishita, et al., J. Appl. Phys. (2020)

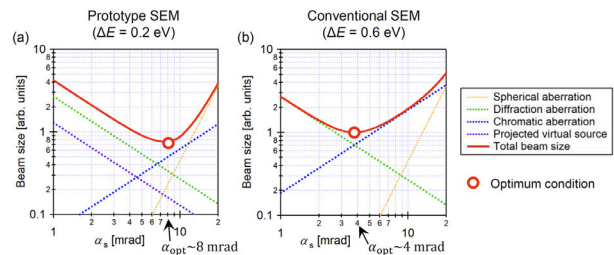


図7. プローブビーム径と収束角の依存性。スピン偏極電子銃 (左) とショットキー電子銃 (右) における色収差の違いによるプローブビーム径の差異。

H. Morishita, et al., J. Appl. Phys. (2020)

4-2. マルチフェロイック材で発現する磁性ナノ構造 (スキルミオンの生成と実空間観察)

- コバルト亜鉛系合金試料の作成とスキルミオン特性

スピン偏極電子線を用いたスピン検出実証のため、焼結法によるバルク材の作製 (コバルト亜鉛系合金の合成) を実施した。これは、比較的高い温度でスキルミオンを生成するとされている β -Mn 構造を有するキラル磁性体である。バルク材試料は電子顕微鏡観察のための薄片化と表面ダメージを低減する前処理を施し、顕微鏡観察を実施した。生成温度範囲は狭いが室温近くでスキルミオンが観察され、特異な配列構造を有していることがわかった。スピン偏極電子銃の持つパルス駆動能を用いることで、スキルミオン生成消滅の中間状態観察を時間分解観察できる可能性がある。
- 単結晶成長薄膜におけるスキルミオン

サファイヤ基板上に単結晶成長させた Fe-Pd-Mo-N 薄膜によるスキルミオン生成実験を実施した。電子顕微鏡観察用に基板結晶から薄膜をピックアップする技術確立し、加工ダメージによる磁気特性破壊を起こすことなく顕微鏡観察を実現した。さらに、予想されていたブロッホ型スキルミオン生成がされることを実証し、マクロな磁性特性との一致を確認することに成功した。本試料は従来のバルク多結晶試料とは異なり、デバイス化が容易な試料である。本試料をもちいることで、電氣的刺激に連動した面内スキルミオンの駆動流の実空間観測がパルス電子線と併用することで可能となる。ナノ磁性ダイナミクス観察に有効な試料を見出した。

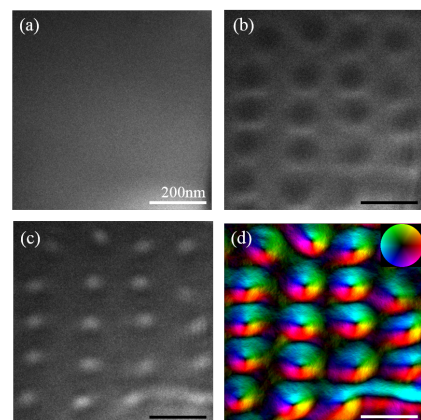


図8. 室温 (RT ~ 292K) における CoZnNi 合金薄膜中正方形格子 SkL

T. Nagase, et al., Phys. Rev. Lett. (2019)

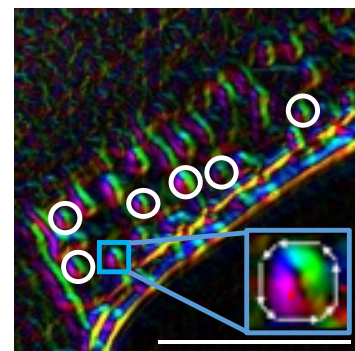


図9. Fe-Pd-Mo-N 薄膜中におけるスキルミオン生成の様子

B. W. Qiang, et al., APL (2020)

4-3. コヒーレントなスピンの偏極電子線による量子効果の実証(二次の干渉項)

NEA 半導体フォトカソードをもちいたスピン偏極電子銃は、空間のみならず時間方向のコヒーレンス性が高く、かつ高いスピン偏極度を有することから、真の量子干渉を計測しうる優位性をもつ。

我々は二次の干渉項にスピン依存性があることを見出し、高い偏極度における同時計数結果と無偏極度の計数の差を抽出することで実現可能となる。二次の干渉項は

$$g^{(2)}(\tau, P) \approx 1 - \frac{1}{2}(1 + P^2)g^{(1)}(\tau)$$

と記述される。ここで P は偏極度、 $g^{(1)}$ は一次の干渉項である。これに基づき、ナノ秒パルス構造を有するスピン偏極電子線をもちいて、強度干渉実験を実施した。この結果、電子波における第二干渉項のスピン依存性を計測することに世界で初めて成功した。この成果は、電子の持つスピン偏極度と時間/空間干渉長を加味した量子干渉実験への適応が可能であることを示す成果である。

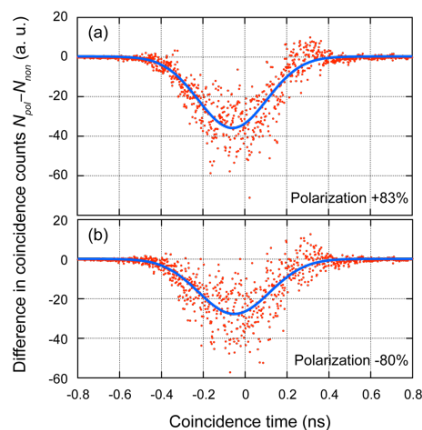


図10. スピン偏極電子線を用いた2電子同時計数測定結果。同時計数時間においてアンチバンチング効果が観測されている。

M. Kuwahara, et al., Phys. Rev. Lett. (2021)

4-4. スピン偏極電子プローブによるダイナミクス計測の実現(時間分解エネルギー損失分光の実現)

2つの三角形金ナノプレートを原子レベルで接合したプラズモン材料の表面プラズモン増強効果を STEM と電子エネルギー損失分光(EELS)の組み合わせにより観察を実施し、接合によるブルーシフトを確認した。これにより、近赤外から可視光領域に敏感な材料を、電子顕微鏡試料として準備することに成功した。図11に結果を示す。

次に、スピン偏極電子銃をピコ秒パルス電子駆動状態にし、本試料に波長780nmの150fsパルスレーザーを照射する実験構成を構築した。試料励起レーザーと試料観察パルス電子線のタイミングを100fsの時間精度で合わせ、光励起による荷電子帯電子状態の超高速計測を、EELスペクトルとスピン偏極パルス電子線により実現した。図12に

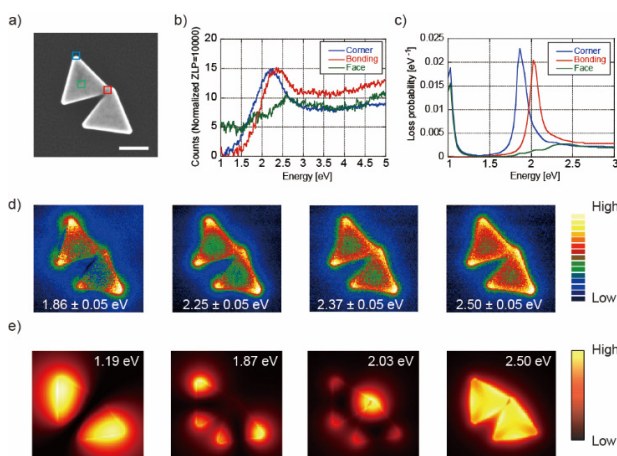


図11. STEM-EELSによる金ナノ粒子接合点における光増強効果の観察(a)SI像、(b)接合点、角および面内位置におけるEELスペクトル、(c)EELSシミュレーション結果、(d)EELSマッピング実験結果と(e)そのシミュレーション結果。

S. Kuwahara, et al., ACS Applied Nano Materials (2020)

励起下におけるEELスペクトル変化の観察結果を示す。本実験により、レーザー誘起による有意な変化を観察することに成功した。また、9psと500psを超える2つの時定数を観測し、それぞれ電子-フォノン散乱、フォノン-フォノン散乱に対応する時定数で減衰することが、電子顕微鏡においても観測された。光プローブを用いた実験では、表面プラズモンを含む数eVまでの遷移過程の情報のみであるが、本手法ではバルクプラズモン情報までも同時に計測できる画期的手法であることが見出された。この結果は電子状態に大きく依存するスピンドイナミクスを分析する新たな手法となり得る。

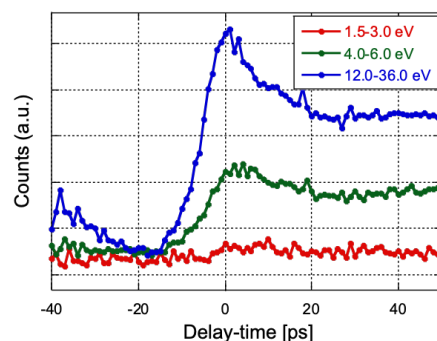


図12. 金ナノ三角形を近赤外フェムト秒レーザーで励起した時の時間分解EELS結果。遅延時間を1psずつ変化させながら、データを取得

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 桑原真人	4. 巻 58
2. 論文標題 スピン偏極パルス透過電子顕微鏡の開発	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 まてりあ	6. 最初と最後の頁 269, 274
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2320/materia.58.269	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 T. Nagase, M. Komatsu, Y. G. So, T. Ishida, H. Yoshida, Y. Kawaguchi, Y. Tanaka, K. Saitoh, N. Ikarashi, M. Kuwahara, M. Nagao	4. 巻 123
2. 論文標題 Smectic Liquid-Crystalline Structure of Skyrmions in Chiral Magnet Co _{8.5} Zn _{7.5} Mn ₄ (110) Thin Film	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review letters	6. 最初と最後の頁 137203
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.123.137203	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 Ichihashi Fumiaki, Dong Xinyu, Inoue Akito, Kawaguchi Takahiko, Kuwahara Makoto, Ito Takahiro, Harada Shunta, Tagawa Miho, Ujihara Toru	4. 巻 89
2. 論文標題 Development of angle-resolved spectroscopy system of electrons emitted from a surface with negative electron affinity state	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Review of Scientific Instruments	6. 最初と最後の頁 073103 ~ 073103
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5021116	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 Kuwahara M., Ujihara T., Saitoh K., Tanaka N.	4. 巻 CFP18VAC-PRT
2. 論文標題 Coherent pulse beam in spin-polarized TEM using an NEA photocathode	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 31ST INTERNATIONAL VACUUM NANO-ELECTRONICS CONFERENCE (IVNC)	6. 最初と最後の頁 4,5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/IVNC.2018.8520014	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 Ichihashi Fumiaki, Kawaguchi Takahiko, Dong Xinyu, Kuwahara Makoto, Ito Takahiro, Harada Shunta, Tagawa Miho, Ujihara Toru	4. 巻 7
2. 論文標題 Temperature dependence of carrier relaxation time in gallium phosphide evaluated by photoemission measurements	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 AIP ADVANCES	6. 最初と最後の頁 115314
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.4997800	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 -

[学会発表] 計60件 (うち招待講演 10件 / うち国際学会 20件)

1. 発表者名 T. Ishida, Y. Yoshida, H. Higuchi, M. Kuwahara, K. Saitoh, M. Tomita, T. Tanji
2. 発表標題 Operando STEM-EELS Observation of Anodic Reactions in Solid Oxide Fuel Cells
3. 学会等名 The 6th International Symposium on Advanced Microscopy and Theoretical Calculations (AMTC6) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 M. Kuwahara
2. 発表標題 Spin-Polarized Pulse-TEM
3. 学会等名 Germany-Japan Joint Seminar on Advanced Electron Microscopy and its Application (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 R. Yokoi, T. Ishida, M. Kuwahara, K. Saitoh
2. 発表標題 High-Brightness Bunched Electrons Using a Semiconductor Photocathode and Optimized Acceleration Field
3. 学会等名 Microscopy & Microanalysis 2019 (M&M 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1 . 発表者名 L. Mizuno, M. Kuwahara, S. Kuwahara, T. Ishida, K. Saitoh
2 . 発表標題 Fine Structure of Plasmon Hybridization on Au nanotriangles via STEM-EELS
3 . 学会等名 Microscopy & Microanalysis 2019 (M&M 2019) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 T. Ishida, M. Kuwahara, K. Saitoh
2 . 発表標題 Atomic Resolution Imaging with an Electron Bessel Beam in Aberration Corrected Scanning Transmission Electron Microscopy
3 . 学会等名 Microscopy & Microanalysis 2019 (M&M 2019) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 H. Morishita, T. Ohshima, M. Kuwahara, Y. Ose T. Agemura
2 . 発表標題 Resolution Improvement of Low-voltage Scanning Electron Microscope with Highly-bright Negative Electron Affinity Photocathode Electron Gun
3 . 学会等名 Frontiers of Electron Microscopy and Materials Science (FEMMS) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 M. Kuwahara, R. Yokoi, L. Mizuno, W. Nagata, Y. Yoshida, T. Ishida, T. Ujihara and K. Saitoh
2 . 発表標題 High-brightness pulsed electron microscopy toward advanced measurement of time-evolution in nanomaterials
3 . 学会等名 International Conference on Materials and Systems for Sustainability 2019 (ICMaSS) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 T. Nagase, M. Komatsu, Y. G So, T. Ishida, H. Yoshida, Y. Kawaguchi, Y. Tanaka, K. Saitoh, N. Ikarashi, M. Kuwahara, M. Nagao
2 . 発表標題 Observation of Anisotropic Skyrmion Interactions Using Lorentz Transmission Electron Microscopy
3 . 学会等名 International Conference on Materials and Systems for Sustainability 2019 (ICMaSS) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 T. Ishida, T. Owaki, M. Kuwahara, K. Saitoh
2 . 発表標題 Generation and Application of UltraFine Electron Bessel Beams using RingShaped Apertures by an AberrationCorrected Scanning Transmission Electron Microscope
3 . 学会等名 International Conference on Materials and Systems for Sustainability 2019 (ICMaSS) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 L. Mizuno, M. Kuwahara, S. Kuwahara, T. Ishida, K. Saitoh
2 . 発表標題 Fine structure of surface plasmon on Au triangular nanoprisms via STEM-EELS
3 . 学会等名 International Conference on Materials and Systems for Sustainability 2019 (ICMaSS) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 A. Shinozaki, K. Fukuwa, T. Ishida, M. Kuwahara, T. Miyoshi Y. Arai, K. Saitoh
2 . 発表標題 High-sensitive electron imaging sensor toward nano-second single shot imaging
3 . 学会等名 International Conference on Materials and Systems for Sustainability 2019 (ICMaSS) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1. 発表者名 R. Yokoi, T. Ishida, M. Kuwahara, K. Saitoh
2. 発表標題 Novel Transmission Electron Microscope Using High Brightness Pulsed Beam Emitted from NEAPhotocathode
3. 学会等名 International Conference on Materials and Systems for Sustainability 2019 (ICMaSS) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 森下英郎, 大嶋 卓, 桑原真人, 揚村寿英, 小瀬洋一
2. 発表標題 高輝度NEAホトカソード電子源によるSEMの低加速分解能向上
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 長瀬知輝, 小松正弥, 肖 英紀, 石田高史, 齋藤 晃, 五十嵐信行, 桑原真人, 長尾全寛
2. 発表標題 ローレンツ電子顕微鏡法を用いたスキルミオン配列の解析
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 大脇健史, 石田高史, 桑原真人, 齋藤 晃
2. 発表標題 電子ベッセルビームをもちいたADF-STEMにおける像コントラストの定量評価
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 水野りら, 石田高史, 桑原彰太, 桑原真人, 齋藤 晃
2. 発表標題 金ナノプレートの局在表面プラズモンをもちいたカップリング効果の研究
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 篠崎 暉, 福和果歩, 石田高史, 桑原真人, 三好敏喜, 新井康夫, 齋藤 晃
2. 発表標題 SOI-CMOSイメージセンサを用いた単パルス電子線イメージングにおける高効率検出
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 横井里奈, 永田 涉, 水野りら, 石田高史, 桑原真人, 齋藤 晃
2. 発表標題 高密度パルス電子線発生を可能にする120kVパルス透過電子顕微鏡の開発
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 富樫将孝, 石田高史, 小松正弥, 長尾全寛, 肖 英紀, 桑原真人, 齋藤 晃
2. 発表標題 Co-Zn-Fe合金の電子顕微鏡学的評価
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 桑原真人, 横井里奈, 水野りら, 永田涉, 石田高史, 齋藤晃
2. 発表標題 超高速時間分解位相像を実現するコヒーレントパルス電子線
3. 学会等名 第4回「表面界面の機能創成とデバイス応用」セミナー(招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 水野りら, 桑原真人, 石田高史, 齋藤晃
2. 発表標題 STEM-EELSを用いた周期閉じ込め構造に誘起される表面プラズモンモードの研究
3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会(物性)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 桑原 真人, 横井 里奈, 永田 涉, 石田 高史
2. 発表標題 コヒーレント偏極電子線をもちいた二次干渉実験
3. 学会等名 第80回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 篠崎 暉, 福和 果歩, 石田 高史, 桑原 真人, 三好 敏喜, 新井 康夫, 齋藤 晃
2. 発表標題 S01 ピクセル検出器を用いたナノ秒パルス電子線イメージング
3. 学会等名 第80回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 横井 里奈, 永田 涉, 石田 高史, 長沖 功, 揚村 寿英, 桑原 真人, 齋藤 晃
2. 発表標題 120 kVフォトカソード電子銃を用いた高輝度パルス透過電子顕微鏡の開発
3. 学会等名 第80回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 石田高史, 篠崎 暉, 桑原 真人, 齋藤 晃, 三好 敏喜, 新井 康夫
2. 発表標題 Nanosecond imaging by a time-resolved transmission electron microscope with an S01 detector
3. 学会等名 第2回量子線イメージング研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 桑原真人
2. 発表標題 高い縮退度を有する超短パルス電子線による顕微分析手法の開発
3. 学会等名 第2回表面真空学会若手部会研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 桑原真人
2. 発表標題 スピン偏極パルス電子源搭載した透過電子顕微鏡の開発および超高速ミクロスコーピー・スペクトロスコーピー手法としての実験的研究
3. 学会等名 日本顕微鏡学会第74回学術講演会（招待講演）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 桑原真人
2. 発表標題 NEA半導体フォトカソードを応用した電子顕微鏡開発とその性能
3. 学会等名 日本学術振興会荷電粒子ビームの工業への応用第132委員会"第231回研究会"(招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 M. Kuwahara
2. 発表標題 Coherent bunched beam in a spin-polarized TEM using an NEA photocathode
3. 学会等名 RIKEN SEMINAR (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 M. Kuwahara
2. 発表標題 Coherent puluse beam in spin-polarized TEM using an NEA photocathode
3. 学会等名 31st International Vacuum Nanoelectronics Conferenc (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 桑原真人
2. 発表標題 スピンパルスTEMの開発とそのコヒーレンス
3. 学会等名 第63回化合物新磁性材料専門研究会 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 M. Kuwahara
2. 発表標題 Semiconductor photocathode in a transmission electron microscope
3. 学会等名 Photocathode Physics for Photoinjectors 2018 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 村山恒介, 桑原真人, 石田高史, 齋藤 晃
2. 発表標題 カーボンナノチューブのTEM-EELSにおける光励起依存性の研究
3. 学会等名 日本顕微鏡学会第74回学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 水野りら, 桑原真人, 石田高史, 亀山達矢, 佐藤健太郎, 齋藤 晃, 鳥本 司
2. 発表標題 STEM-EELSを用いた金八面体ナノ粒子の局在表面プラズモンの研究
3. 学会等名 日本顕微鏡学会第74回学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 富樫将孝, 桑原真人, 齋藤 晃
2. 発表標題 スピン偏極電子線をもちいた電子らせん波の生成
3. 学会等名 日本顕微鏡学会第74回学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 篠崎 暉, 石田高史, 桑原真人, 三好敏好, 新井康夫, 齋藤 晃
2. 発表標題 透過型電子顕微鏡によるSOI技術をもちいた積分型CMOSイメージセンサの性能評価
3. 学会等名 日本顕微鏡学会第74回学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 濱中幸祐, 鈴木潤土, 石田高史, 桑原真人, 齋藤 晃
2. 発表標題 Pt/Co/Ta磁性多層膜試料の作製と電子顕微鏡学的評価
3. 学会等名 日本顕微鏡学会第74回学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 肖 英紀, 小松正弥, 高場健太郎, 鈴木潤土, 桑原真人, 長尾全寛
2. 発表標題 -Mn型Co-Zn合金の合成と磁気構造観察
3. 学会等名 日本顕微鏡学会第74回学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 篠崎 暉, 福和果歩, 石田高史, 桑原真人, 三好敏喜, 齋藤晃
2. 発表標題 パルス電子線を用いた積分型SOIピクセル検出器の性能評価
3. 学会等名 第1回「量子線イメージング研究会」
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 K. Hamanaka , H. Suzuki , T. Ishida , M. Kuwahara , K. Saitoh
2. 発表標題 Magnetic structures in Nano-Fabricated Pt/Co/Ta Multilayer Film
3. 学会等名 19TH INTERNATIONAL MICROSCOPY CONGRESS (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 K. Murayama , M. Kuwahara , T. Ishida , K. Saitoh
2. 発表標題 TEM-EELS of Photo-excited MWCNTs Using a Pulsed Electron Beam
3. 学会等名 19TH INTERNATIONAL MICROSCOPY CONGRESS (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 水野りら、石田高史、桑原彰太、桑原真人、齋藤晃
2. 発表標題 STEM-EELSを用いた金ナノプレートの局在表面プラズモン及びそのカップリング効果の研究
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会(2019年春季)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 富樫将孝, 石田高史, 小松正弥, 長尾全寛, 肖英紀, 桑原真人, 齋藤晃
2. 発表標題 透過型電子顕微鏡を用いたCo-Zn-Fe合金の磁気構造観察
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会(2019年春季)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 横井里奈, 水野りら, 篠崎暉, 石田高史, 桑原真人, 齋藤晃
2. 発表標題 高密度パルス電子線発生のため120kVフォトカソード電子銃の開発
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会(2019年春季)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 濱中幸祐, 富樫将孝, 桑原真人, 石田高史, 齋藤晃
2. 発表標題 Pt/Co/Ta磁性多層膜の作製と電子顕微鏡を用いた磁気構造解析
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会(2019年春季)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 村山恒介, 横井里奈, 桑原真人, 石田高史, 齋藤晃
2. 発表標題 時間分解EELSによる光励起したカーボンナノチューブのKエッジの時間応答計測
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会(2019年春季)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 篠崎暉, 福和果歩, 石田高史, 桑原真人, 三好敏喜, 新井康夫, 齋藤晃
2. 発表標題 透過電子顕微鏡を用いたSOIピクセル検出器の性能評価II
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会(2019年春季)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 桑原 真人, 鈴木潤士, 濱中幸佑, 石田高史, 齋藤 晃
2. 発表標題 電子線ホログラフィーを用いたPt/Co/Ta多層膜ディスクの磁気構造解析
3. 学会等名 日本物理学会 第73回年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 桑原真人
2. 発表標題 NEA半導体光陰極から放出される電子のもつエミッタンスと高い空間コヒーレンス
3. 学会等名 第65回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 桑原真人
2. 発表標題 NEA半導体光陰極を応用した透過電子顕微鏡における時空間コヒーレンス
3. 学会等名 第15回真空ナノエレクトロニクスシンポジウム(招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 桑原真人
2. 発表標題 コヒーレントスピン偏極パルス電子線による時間分解TEM観察
3. 学会等名 「その場観察研究部会」第2回 研究会(招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 M. Kuwahara, K. Aoki, K. Murayama, H. Asano, T. Ujihara, K. Saitoh and N. Tanaka
2. 発表標題 Coherent bunched electron beam extracted from a semiconductor photocathode in a transmission electron microscope
3. 学会等名 International Conference on Materials and Systems for Sustainability (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 桑原真人、宇治原徹、齋藤晃、田中信夫
2. 発表標題 スピン偏極透過電子顕微鏡による強度干渉実験
3. 学会等名 日本物理学会2017年秋季大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 M. Kuwahara, K. Aoki, H. Asano, T. Ujihara, N. Tanaka and K. Saitoh
2. 発表標題 Coherence of picosecond bunched electrons emitted from a semiconductor photocathode in transmission electron microscope
3. 学会等名 Electron Microscopy with High Temporal Resolution (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 M. Kuwahara, K. Aoki, F. Ichihashi, T. Ujihara, N. Tanaka and K. Saitoh
2. 発表標題 Time-resolved TEM-EELS using a pulsed beam extracted from a semiconductor photocathode
3. 学会等名 8th International Workshop on Electron Energy Loss Spectroscopy and Related Techniques (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 小松正弥, 高場健太郎, 肖英紀, 鈴木潤土, 桑原真人, 長尾全寛
2. 発表標題 Co-Zn系 -Mn型合金の作製と磁気構造観察II
3. 学会等名 日本物理学会第73回年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 小松正弥, 肖英紀, 鈴木潤土, 桑原真人, 長尾全寛
2. 発表標題 -Mn型Co-Zn合金の作製と磁性測定
3. 学会等名 第16回日本金属学会東北支部研究発表大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 小松正弥, 肖英紀, 鈴木潤土, 桑原真人, 長尾全寛
2. 発表標題 Co-Zn系 -Mn型合金の作製と磁気構造観察
3. 学会等名 日本物理学会2017年秋季大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Y. Suzuki, S. Hirano, J. Shimizu, K. Matsuura, I. Muneta, M. Nagao, H. Wakabayashi, and N. Ikarashi.
2. 発表標題 Transmission electron microscopy structural analysis of sputtered MoS ₂ for 3D-LSI
3. 学会等名 International Conference on Materials and Systems for Sustainability 2017
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 M. Nagao
2. 発表標題 Lorentz Transmission Electron Microscopy Studies of Magnetic Skyrmions
3. 学会等名 International Workshop Frontiers in Strongly Correlated Electron System
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 桑原真人、最新实用真空技術総覧編集委員会編	4. 発行年 2019年
2. 出版社 株式会社エヌ・ティー・エス	5. 総ページ数 1084
3. 書名 最新实用真空技術総覧	

〔出願〕 計2件

産業財産権の名称 空間位相変調した電子波の発生装置	発明者 桑原 真人	権利者 名古屋大学
産業財産権の種類、番号 特許、PCT/JP2019/001715	出願年 2019年	国内・外国の別 外国

産業財産権の名称 空間変調した電子波の発生装置	発明者 桑原真人、齋藤晃	権利者 国立大学法人名古屋大学
産業財産権の種類、番号 特許、2018-016410	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	肖 英紀 (肖英紀) (So Yeong-Gi) (10719678)	秋田大学・理工学研究科・講師 (11401)	

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
研究分担者	石田 高史 (Ishida Takafumi) (60766525)	名古屋大学・未来材料・システム研究所・助教 (13901)	
研究分担者	長尾 全寛 (Nagao Masahiro) (80726662)	名古屋大学・未来材料・システム研究所・准教授 (13901)	

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