

量子現象観測技術研究チーム

Quantum Phenomena Observation Technology Laboratory

チームリーダー 外村 彰
TONOMURA, Akira

当研究チームは、電子線の波動性を利用し、電子顕微鏡などの従来の手法では活用されていなかった“電子線の位相情報”を高い精度で検出し画像化することによって、ナノ領域の各所に顔を出し始めた量子現象を解明することを目指している。

具体的には、これまで30年間に渡って開発を続けて来た“干渉性の良い高輝度電子線技術”を基本に据え、さらに量子現象を可視化するための種々の関連技術の開発を行い、世界に類を見ない技術の高みに立って、これまで観察できなかったナノ領域における量子現象、電磁場分布、物質構造等の直視を目指している。

単量子操作研究グループ内の他のチームとの研究協力も視野に入れている。例えば、量子コンピュータやスピン・デバイスの基本原理の直接観察では、巨視的量子コヒーレンス研究チームおよび量子ナノ磁性研究チームと、磁束量子ダイナミクスの複雑現象の理論的解明では、デジタル・マテリアル研究チームと一体となって研究を進めつつある。また、イギリス・ケンブリッジ大学材料科学部とは電子線ホログラフィーに関して、研究員の相互交流を含めた密接な研究協力を行っている。

1. 電子線干渉計測技術の改良・開発（外村，原田，松田，戸川，守谷，明石*）

電子線の位相情報を高精度で検出するためには、何よりもまず、高輝度の電子線、高性能の電子線干渉装置（電子線バイプリズム）、そして検出効率と検出感度の高い二次元電子線検出系等が必須である。当研究チームでは、上記研究目的に必要なこれら技術の開発を行っている。昨年度は従来にないフレキシビリティに富んだ新しい干渉光学系（2段電子線バイプリズム干渉計）の開発に成功した。

本年度はこの光学系を用いた電子波干渉実験を行い、従来の干渉系を上まわる2つの世界記録を更新し、性能の高さを実証した。その1つは干渉縞間隔の極小化で、最小間隔4.2pmの干渉縞を記録するとともに、この間隔でのホログラム作成、その像再生にも成功した（従来記録は9.7pm）。原子サイズの数十分の一の干渉縞を搬送空間周波数とすることにより、干渉計測法における空間分解能の向上や、ホログラムからの画像再生処理にまつわるアーティファクトの除去などに道が開かれた。今ひとつの記録は、干渉縞本数に関してである。従来の記録を2倍近く上まわる21,000本の干渉縞を記録するとともに、この光学系において試料観察、ホログラムが作成できることを実証した（従来は11,000本の干渉縞のみ）。電子顕微鏡本体への改造を行うことなくこれらの記録を達成できたことが、本干渉計の持つポテンシャルの高さを表している。これらの結果を元に、電子波干渉光学系のさらなる改良・開発を検討している。

その他、量子現象観察のための付帯技術（試料冷却、磁場印加、電流通電等）に関しても、試料ホルダー、磁場印加装置等の開発を継続している。

2. ローレンツ顕微鏡法による超伝導磁束量子の研究（外村，原田，松田，戸川，守谷，前田，明石*；Nori（FRS デジタル・マテリアル研究チーム））

超伝導体は無損失の導電体として実用化するためには、電流を流した際にも磁束量子が動かないようにするためのピン止めセンターが必須であり、これが超伝導材料開発のキープポイントとなっている。さらに、超伝導体を用いた素子では磁束量子を狙った位置に移動させたり、または、素子内に取り込まれた磁束量子がノイズ源となるため取り除くなど、個々の磁束量子をピンポイントに狙ったコントロールが必要となる。世界中でこれらを目指した研究が行われており、例えば理論的な研究においてはFRS デジタル・マテリアル研究チームが世界をリードしている。実験的には磁束量子とピン止めセンターの同時観察と言う点に高度な技術が必要であり、当研究チームが世界で唯一、ローレンツ顕微鏡法により成功している。

当研究チームでは、世界で最も高輝度の電子線が作り出せる100万ボルト・ホログラフィー電子顕微鏡を用いて、ローレンツ法による超伝導体中の磁束量子の研究を行ってきた。その技術を活かして、本年度は磁束量子のコントロールの直接観察を目指し、超伝導体中にピン止めセンターのラチェットパターンを作成し、このパターン中の磁束量子の動きを観察した。ラチェットパターンには、収束イオンビームを用いてピン止めセンターの非等方的な分布パターンを作り出し、それぞれのピン止めセンターに磁束量子を直接ピン止めさせることによって、磁束量子に対して有効なラチェットポテンシャルを作り出した。これに印加磁場強度、試料温度などをパラメータとして変化させ、ラチェットポテンシャル中の磁束量子群のダイオード的な整流作用を確認するとともに、テレビ・ビデオレートによる動的な観察、解析を継続している。

3. 電子線ホログラフィーによる電磁場観察技術の開発（外村，原田，笠間）

サブミクロンからナノメートルへのスケールダウンが進

行するにつれて、その性能が不純物（ドーパント）原子の三次元分布に依存することが明らかとなった近年の半導体素子に代表されるように、高度な材料設計のためには物質内部の電磁場分布の三次元解析が必須となってきた。しかし、ナノスケールでかつ微弱な電磁場を物質、または材料の内部まで計測できる手法は、電子線ホログラフィーを置いて他には無いのが現状である。そのため、我々は電子線ホログラフィーの持つナノスケールでの静電場の定量的な分解能と、電子線トモグラフィー（断層映像技術）の三次元情報抽出技術を融合させることによって、新たな物質内部の三次元電場分布の計測法の開発を目指している。

本研究は、英国・Cambridge 大学材料科学部 Dunin-Borkowski 博士の研究チームとの共同研究を主に据え、現地ケンブリッジに研究員を派遣して行っている。本年度は、上記目的のためのホログラフィー・トモグラフィー併用試料ホルダーの開発を行った。本ホルダーは、2つの固定電極と1つの可動電極とを備え、試料への電圧印加状態での観察が可能である。さらにトモグラフィーに必要な試料傾斜角度は $\pm 70^\circ$ を達成している。これらの新機能を用いて、試料を傾斜させながら複数枚のホログラムを作成し、その各々から良好な再生像が得られることを確認した。試料ホルダーの開発を継続するとともに、現在までに得られている情報に基づき、三次元位相情報の構築に向けた研究を継続している。

また、電場分布だけでなく鉄ニッケル微粒子（約 10 nm 径）、コバルト微粒子（< 100 nm 径）リングなどの微弱な磁場分布など、広く磁性体を観察対象とした研究も行っている。

* 所外共同研究者

Our team aims at elucidating quantum phenomena, which have begun to appear at many places in nanoscience, by precisely detecting the phase information of electron beams and by directly imaging quantum objects.

Such research in our team has become feasible based on the technology we developed by ourselves for 30 years, which utilized an electron beam of the highest brightness as a tool, *i.e.*, a coherent beam with an extremely short wavelength, for exploring nanoscopic quantum objects. Standing on the heights of such technology, we make it feasible to directly observe quantum phenomena, distributions of electro-magnetic fields, and material structures in nanoscopic regions which have never been observed before.

Collaborations are being made with other teams in the single quantum dynamics research group: the direct observation of the fundamental principles underlying quantum computers with the Macroscopic the Quantum Coherence Lab., spintronic devices with the Quantum Nano-Scale Magnetism Lab., and the theoretical elucidation of dynamics of superconducting vortices (magnetic-flux quanta) as complex phenomena with the Digital Materials Lab.

Furthermore, a research target on “electron holography for nanoscopic electro-magnetic field” is jointly advanced with the Department of Materials Science and Metallurgy, University of Cambridge, United Kingdom with a collaboration including an exchange of researchers.

1. Development and improvement of electron interference technology

We develop and improve the performance of bright electron beams, electron interferometers, “electron biprism”, and two-dimensional detection system with high detection-efficiency and-sensitivity, which are all indispensable for precisely measuring the phase information of an electron beam. Last year we succeeded to develop the novel interferometer on electron optics, which allowed us to flexibly control the interference parameters, interference fringe-spacing and width of the interference region, independently.

Up to now, we have achieved the highest performance of the interferometer with renewing two world records on electron interferometry. The first one is that the narrowest interference fringes of 4.2 pm have been recorded as an electron hologram and the reconstruction form of the hologram has also been succeeded. (The previous record was 9.7 pm.) The narrowest fringes of one several tenth of atom size help us in detecting the high spatial resolution in the interferometry and avoiding the artifact occurred in reconstruction procedure by the high spatial frequency. The second one is the fringe numbers of 21000. (The previous record was 11000, but fringes only.) We have also confirmed that the interferometer is able to produce multi-fringe holograms and reconstruct them. Achieving this performance without change of the electron microscope itself means that the interference optical system has high performance. Further improvements and developments of the system are also carried out continuously. We are also planning and adjusting to use the system for application works.

We are also continuously working on the development and improvement of specimen holders for multiple purposes (under ultra-low temperatures, application of electric current etc.) and magnetic field application systems for observing quantum phenomena occurring in the materials in particular conditions.

2. Research on superconducting vortices by Lorentz microscopy

In order to put superconductors to practical use as dissipation-free electrical conductors, it is necessary to pin down vortices (magnetic-flux quanta) even when an electrical current is applied to the superconductors and a driving force is applied to the vortices. The vortex pinning is the key for the development of superconducting materials. Furthermore, one by one control for the individual vortices is required for eliminating signal noise for superconducting devices, for example, to move the vortices toward aiming locations and to put them out of the devices. This kind of research is being aggressively pursued in the world, and the Digital Materials Research Lab., for example, leads in the theoretical field. As an aspect of experiment, the simultaneous observation of vortices and pinning centers need sophisticated techniques, and our team is the only one in the world to succeed using Lorentz microscopy.

We are performing research on vortex dynamics in superconductors using a 1-MV holography electron microscope with an electron beam that has the world's highest brightness. We have introduced a spatially asymmetric dot pattern in the material as a rocking ratchet for observing the direct control of the vortex motion. Each dot in the pattern was produced by irradiation of a focused ion beam and then was worked as a pinning center for individual vortices. After the whole dots being occupied by the vortices, the produced asymmetric potential worked as a ratchet

for unpinned vortices. The partially asymmetric flow of the vortices, which is considered as rectification of the vortex motion, was observed, by changing the magnetic field and/or specimen temperature as parameters. The individual behavior of the vortices and their relative motion were being elucidated by video rate (1/30 s), continuously.

3. Development of the electro-magnetic field observation technology utilizing electron holography

With the down sizing of modern semiconductor devices from sub micron order into nanoscale, the device performance relies more and more on the three dimensional distributions of the active dopant atoms in the substrate. Therefore the designing of highly controllable and functional materials becomes very important to characterize electrostatic and magnetic fields inside the materials or devices. However, there is no practical method to provide the field's information quantitatively in nanoscopic resolution, except for electron holography. We, therefore, aim at developing a new measurement technique for three-dimensional information of the electrostatic and magnetic field in the materials and devices by a method combining the quantitative and nanoscopic resolution of electron holography and the three-dimensional information of electron tomography

The research work is under going at the University of Cambridge by our visiting researcher with close collaboration with Dr. R.E. Dunin-Borkowski. Up to now, we have developed a novel specimen holder with two fixed electrodes and one movable electrode for electron tomography and holography observation of the electrostatic materials. It was confirmed that the holder enabled us to observe materials under biased conditions and record them as holograms with a high tilt angle of $\pm 70^\circ$. Numerical reconstructions from the holograms with sufficient qualities were also confirmed. Further developments of the holder and numerical reconstruction of three-dimensional distributions of the electro-magnetic field are carried out continuously.

In addition to the electrostatic field, the magnetic field in extremely small quantities from iron-nickel (FeNi) fine particles (about 10 nm in diameters) or nano-scaled ring of cobalt (Co) fine particles (< 100 nm in diameters) are also investigated by the combined technique.

Staff

Head

Dr. Akira TONOMURA

Research Scientists

Dr. Ken HARADA

Dr. Tsuyoshi MATSUDA

Dr. Yoshihiko TOGAWA

Dr. Takeshi KASAMA

Dr. Atsutaka MAEDA* (Univ. Tokyo)

Technical Staffs

Mr. Noboru MORIYA*

(* part time)

Collaborators (Outside of RIKEN)

Mr. Tetsuya AKASHI (Hitachi Instrum. Serv. Co., Ltd.)

Dr. Rafal E. DUNIN-BORKOWSKI (Dept. Mater. Sci., Metall., Univ. Cambridge, UK)

誌 上 発 表 Publications

[雑誌]

(原著論文) *印は査読制度がある論文

Harada K., Togawa Y., Matsuda T., Akashi T., and Tonomura A.: "Double-biprism electron interferometry", *Appl. Phys. Lett.* **84**, 3229–3231 (2004). *

Harada K., Tonomura A., Matsuda T., Akashi T., and Togawa Y.: "High-resolution observation by double-biprism electron holography", *J. Appl. Phys.* **96**, 6097–6102 (2004). *

Harada K., Togawa Y., Akashi T., Matsuda T., and Tonomura A.: "Double-biprism electron holography and its applications", *Microsc. Microanal.* **10**, Suppl. No. 2, pp. 986–987 (2004). *

Kasama T., Dunin-Borkowski R. E., Newcomb S. B., and McCartney M. R.: "Electron beam induced charging of focused ion beam milled semiconductor transistors examined using electron holography", *Microsc. Microanal.* **10**, Suppl. No. 2, pp. 988–989 (2004). *

Dunin-Borkowski R. E. and Kasama T.: "The prospect of three-dimensional induction mapping inside magnetic nanostructures by combining electron holography with electron tomography", *Microsc. Microanal.* **10**, Suppl. No. 2, pp. 1010–1011 (2004). *

Dunin-Borkowski R. E., Kasama T., Wei A., Tripp S. L., Hytch M. J., Snoeck E., Harrison R. J., and Putnis A.: "Off-axis electron holography of magnetic nanowires and chains, rings and planar arrays of magnetic nanoparticles", *Microsc. Res. Tech.* **64**, 390–402 (2004). *

Beleggia M., Pozzi G., Tonomura A., Kasai H., Matsuda T., Harada K., Akashi T., Masui T., and Tajima S.: "Model of superconducting vortices in layered materials for the interpretation of transmission electron microscopy images", *Phys. Rev. B* **70**, 184518-1–184518-8 (2004). *

Van de Vondel J., de Souza Silva C. C., Zhu B. Y., Morelle M., and Moschalkov V. V.: "Vortex-rectification effects in films with periodic asymmetric pinning", *Phys. Rev. Lett.* **94**, 057003-1–057003-4 (2005). *

Maeda A., Inoue Y., Kitano H., Savelev S., Okayasu S., Tsukada I., and Nori F.: "Nanoscale friction: kinetic friction of magnetic flux quanta and charge density waves", *Phys. Rev. Lett.* **94**, 077001-1–077001-4 (2005). *

(その他)

外村彰: "独創的研究と異分野交流", 学術の動向, No. 7, pp. 60–63 (2004).

外村彰: "アインシュタイン生誕 125 周年", 科学 **75**, 209

(2005).

外村彰: “量子力学: その基礎への日本の寄与”, 日本物理学会誌 **60**, No. 1, pp. 3–11 (2005).

[単行本・Proc.]

(その他)

Harada K., Togawa Y., Akashi T., Matsuda T., and Tonomura A.: “Double-biprism electron holography I: Principles and optical systems”, Proceedings of 8th Asia-Pacific Conference on Electron Microscopy (SAPEM), Kanazawa, 2004–6, Japan Society of Microscopy, Kanazawa, pp. 90–91 (2004).

Harada K., Togawa Y., Akashi T., Matsuda T., and Tonomura A.: “Double-biprism electron holography II: High-resolution holography”, Proceedings of 8th Asia-Pacific Conference on Electron Microscopy (SAPEM), Kanazawa, 2004–6, Japan Society of Microscopy, Kanazawa, pp. 100–101 (2004).

口頭発表 Oral Presentations

(国際会議等)

Dunin-Borkowski R. E., Kasama T., Wei A., Tripp S. L., and Hytch M. J.: “Magnetic induction mapping of nanostructured materials using electron holography”, Ann. Meet. of the Hungarian Soc. for Microscopy (MMT 2004), Balatonalmadi, Hungary, May (2004).

Harada K., Togawa Y., Akashi T., Matsuda T., and Tonomura A.: “Double-biprism electron holography I: Principles and optical systems”, 8th Asia-Pacific Conf. on Electron Microscopy (SAPEM) in conjunction with 60th Ann. Meet. of the Japanese Society of Microscopy, Kanazawa, June (2004).

Harada K., Togawa Y., Akashi T., Matsuda T., and Tonomura A.: “Double-biprism electron holography II: High-resolution holography”, 8th Asia-Pacific Conf. on Electron Microscopy (SAPEM) in conjunction with 60th Ann. Meet. of the Japanese Society of Microscopy, Kanazawa, June (2004).

Togawa Y., Harada K., Matsuda T., Akashi T., Kasai H., and Tonomura A.: “Rectified motion of vortices in a Superconductor”, 8th Asia-Pacific Conf. on Electron Microscopy (SAPEM) in conjunction with 60th Ann. Meet. of the Japanese Society of Microscopy, Kanazawa, June (2004).

Dunin-Borkowski R. E., Kasama T., Wei A., and Tripp S. L.: “Magnetic flux closure states in self-assembled nanoparticle rings”, 13th European Microscopy Congr. (EMC 2004), (The Belgian Society for Microscopy), Antwerp, Belgium, Aug. (2004).

Kasama T., Dunin-Borkowski R. E., Eerenstein W., and Celotto S.: “The relationship between magnetic microstructure and anti-phase domain size in epitaxial magnetite thin films”, 13th European Microscopy

Congr. (EMC 2004), (European Microscopy Society and the Belgian Society for Microscopy), Antwerp, Belgium, Aug. (2004).

Harada K., Togawa Y., Akashi T., Matsuda T., and Tonomura A.: “Double-biprism electron holography and its applications”, Microscopy and Microanalysis 2004, (Microscopy Society of America), Savannah, USA, Aug. (2004).

Kasama T., Dunin-Borkowski R. E., Newcomb S. B., and McCartney M. R.: “Electron beam induced charging of focused ion beam milled semiconductor transistors examined using electron holography”, Microscopy and Microanalysis 2004, (The Microscopy Society of America and others), Savannah, USA, Aug. (2004).

Dunin-Borkowski R. E. and Kasama T.: “The prospect of three-dimensional induction mapping inside magnetic nanostructures by combining electron holography with electron tomography”, Microscopy and Microanalysis 2004, (The Microscopy Society of America and others), Savannah, USA, Aug. (2004).

Togawa Y., Harada K., Akashi T., Kasai H., Matsuda T., Maeda A., and Tonomura A.: “Rectified motion of vortices in a niobium superconductor observed by lorentz microscopy”, 17th Int. Symp. on Superconductivity (ISS 2004), Niigata, Nov. (2004).

Tonomura A.: “Quantum phenomena observed using electron waves”, Int. Conf. on Quantum Transport in Synthetic Metals & Quantum Functional Semiconductors, 2004, Gangwon-do, Korea, Nov. (2004).

Dunin-Borkowski R. E. and Kasama T.: “Novel approaches for the characterization of electromagnetic fields using electron holography”, 2004 MRS Fall Meet., (Materials Research Society), Boston, USA, Nov.–Dec. (2004).

Togawa Y., Harada K., Akashi T., Kasai H., Matsuda T., Maeda A., and Tonomura A.: “Direct observation of rectified motion of vortices using Lorentz Microscopy”, 10th Int. Vortex State Studies Workshop (IVW-10), Mumbai, India, Jan. (2005).

(国内会議)

戸川欣彦, 原田研, 明石哲也, 葛西裕人, 松田強, 前田京剛, 外村彰: “磁束系における整流作用の観察”, 日本物理学会 2004 年秋季大会, 青森, 高知, 9 月 (2004).

明石哲也, 原田研, 戸川欣彦, 松田強, 外村彰: “ダブル電子線バイプリズム干渉法の開発 I: 光学系と基本性能”, 第 65 回応用物理学会学術講演会, 仙台, 9 月 (2004).

原田研, 松田強, 戸川欣彦, 明石哲也, 外村彰: “ダブル電子線バイプリズム干渉法の開発 II: 高分解能ホログラフィー”, 第 65 回応用物理学会学術講演会, 仙台, 9 月 (2004).

外村彰: “電子で見るミクロの世界”, 2004 年度西宮湯川記念科学セミナー, (西宮市他), 西宮, 11 月 (2004).