

電磁場の直接観察と相対性理論(第3回)

～電子の集団運動の直接観察～

進藤大輔*

3.1 はじめに

前回の第2回の講義では、電子線ホログラフィーの原理を説明し、その応用例として、トナー粒子の電場の解析、高温超伝導体の磁束量子の観察について解説した。本講義では、電子線ホログラフィーの新しい応用展開として、電子の集団運動の観察について紹介する。材料の電磁気特性は、多様な電子の振る舞いを起源としており、その挙動を直接観察することの意義は大きい。

また、電子挙動の直接観察は、次回の講義で触れる電子の点電荷としての振る舞いと干渉・回折効果を示す波動としての振る舞い、いわゆる粒子と波動の二重性を理解する上で重要である。さらに、第1回の講義で述べた、電荷保存則をナノメートルスケールで確認する上でも大きな意義を持っている。

3.2 絶縁体の帯電現象と2次電子の集団運動⁽¹⁾⁽²⁾

電子が試料表面から放出され、移動する様子を観察するには、電子顕微鏡の電子銃などを試料室にセットし、電圧を印加しながら観察することが考えられるが、得られる電気シグナルは微小で、電子の移動を可視化することは、一般に困難である。一方、生物試料をはじめとして、絶縁体を電子顕微鏡で観察すると、2次電子が放出され、試料は次第に強く帯電する。図3・1には、その様子が模式的に示してある。図3・1(a)の電子線照射初期には、試料から2次電子が試料外部に放出され、試料はプラスに帯電する。絶縁体試料では、導体と異なり、電子の基板等の外部から補給がないため、時間

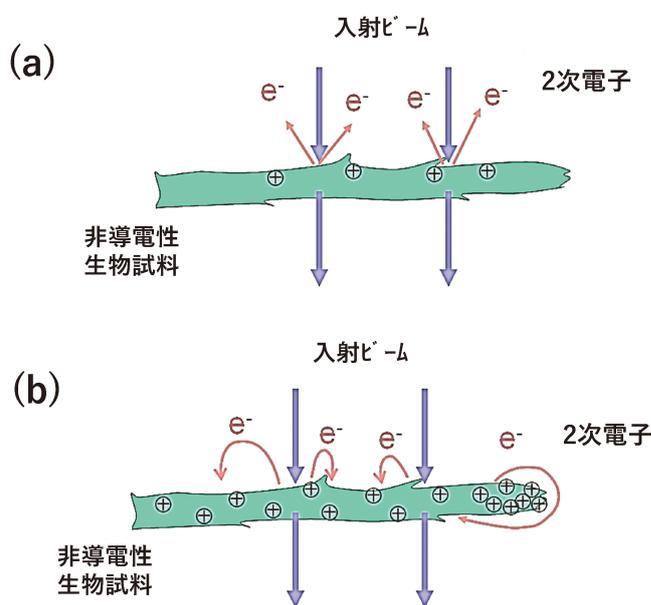


図3.1 生物試料の電子顕微鏡観察時に生ずる帯電現象の模式図。(a)電子線照射初期。(b)長時間あるいは強い電子線照射時の帯電現象。

経過とともに次第に強く帯電し、その結果、一度試料外へ放出された2次電子が試料表面に引き寄せられる(図3・1(b))。一方、試料表面では、すでに存在する電子の斥力を受けることとなり複雑な挙動を呈する。その結果、2次電子は、試料表面に蓄積したり、試料先端で周回運動を生じることになる。図3・2には、ネズミの坐骨神経の微細線維を、次第に電子線強度を大きくした場合の観察例が示されている。

* 理化学研究所チームリーダー、東北大学名誉教授、日本金属学会フェロー(〒351-0198 和光市広沢 2-1フロンティア中央研究棟306-2)
 Direct Observation of Electromagnetic Field and Theory of Relativity — 3. Direct Observation of Collective Motions of Electrons —;
 Daisuke Shindo* (*RIKEN Center for Emergent Matter Science, Wako)
 Keywords: *electron holography, electromagnetic field, special theory of relativity, general theory of relativity, collective motion of electrons, wave-particle duality, spinning linear wave*
 2023年3月16日受理[doi:10.2320/materia.63.189]

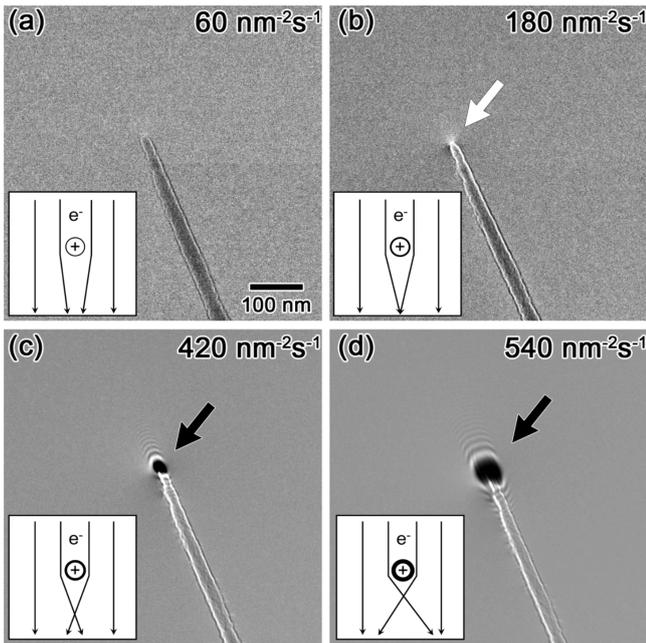


図3-2 ネズミの坐骨神経の微細線維の過焦点(オーバーフォーカス)で観察された透過電子顕微鏡像。電子線強度の増大と共に、蛍光板上で、微細線維先端の像コントラストが、(b)ではビームの収束に伴い明るく、(c)と(d)ではビームの発散により暗く観察される様子が、それぞれ白と黒の矢印で示されている。

針状試料先端部で特に強い帯電が生じ、入射電子が次第に強く偏向されて、ビームの収束による白から、ビームの発散による黒へとコントラストが変化している。

3-3 2次電子の集団運動の観察の原理⁽¹⁾⁽²⁾

図3-3に、電子線ホログラフィーの振幅再生法による、電子の集団運動の可視化原理を模式的に示す。図3-3(a)の左下には、定常的な帯電状態にある試料を示してある。試料内部には、2次電子の放出によって生じたホールが存在し、試料全体としてはプラスに帯電している。試料表面には、低エネルギーで放出され表面に引き寄せられた2次電子が存在しており、より高いエネルギーを持つ2次電子が、複雑な電場環境下で、左上から右下方向へ移動している様子がa-1からa-3に示されている。ここで、主な2次電子のもつエネルギーは数eVから十数eV程度である。一方、200 keV~300 keVのエネルギーをもつ高エネルギーの入射電子はその約100倍のスピードを持っており、近似的に入射電子は、静止した2次電子の分布が作る電場を感じるようになる。したがって、最初の入射電子は、図a-1の配置の電場を、あとから入射する電子は、a-2、a-3の配置の電場をそれぞれ感じるようになる。

最初の入射電子が、a-1の状態に対応する電場を感じたとすると、そのホログラムには、b-1に示す干渉縞が形成される。同様に、続いて入射する電子により、b-2、b-3のホログラムがそれぞれ形成される。最終的に得られるものは、こ

うした干渉縞の変化の平均であり、2次電子が集団で移動し、電場が乱れている領域の干渉縞のコントラストが低く観測されることになる。したがって、図cに示すように、c-2の集団で電子が移動している領域のフーリエ変換図形には、大きなバックグラウンドが生じることになる。本講義第2回で説明したように、フーリエ変換図形の一部を選択して振幅分布を再生すると、バックグラウンドの形成に伴う、振幅の低下が生じ、振幅再生像には、暗いコントラストが生じる。このコントラストを、(d)のように、干渉縞のレジビリティと対応させて、カラー表示することにより、絶縁体表面で2次電子が集団運動している領域が赤や黄の明るい領域として可視化できることになる。

3-4 生物試料表面での2次電子の集団運動の観察⁽¹⁾⁽²⁾

図3-4(a)は、ネズミの坐骨神経の微細線維(緑)周辺で、2次電子の定常的な周回軌道(赤及び黄の領域)を示す振幅再生像である。(b)では、挿入したタングステンの探針に5Vの電圧を印加すると、軌道径が短くなる様子が観察されている。一方、図3-5は、図3-4の撮影条件に比べ、比較的弱い入射電子線量で観察されたもので、枝分かれした微細線維間に次第に2次電子が蓄積の様子が捉えられている。(a)は、観察初期のもので、枝分かれした微細線維周辺の振幅再生像は一樣に暗い青色を呈しており、2次電子による大きな電場の乱れは観察されていない。これに対して、(b)や(c)では、枝分かれした微細線維間に、時間経過と共に、赤及び黄の明るいコントラストが明瞭となり、その場所も時間と共に変化する様子が捉えられている。

3-5 各種絶縁体表面での2次電子の挙動の観察

図3-6には帯電したエポキシ樹脂薄膜周辺での2次電子挙動の観察例を示す。(a)は、エポキシ樹脂をマイクロトームにより切削して得られた位相再生像である。試料電位をパラメータとして求めた(b)の位相再生像のシミュレーション結果との比較より、試料表面の電位は約1.2Vであることがわかる。(c)は振幅再生像であり、上述した生物試料の場合と同様、エポキシ樹脂表面近傍の赤や黄を呈した領域は、試料表面と激しく相互作用している2次電子の密度の大きい領域に対応する。特に矢印を付した凹形の表面では、赤や黄の明るい領域が広く分布し、図3.5の枝分かれした線維の場合と同様、顕著な2次電子の蓄積が生じていると理解できる。

一方、上記マイクロトームで薄片化した試料の両面に弱いGaイオンを照射した後に得られた位相再生像が(d)である。(e)のシミュレーションの結果から、エポキシ樹脂の電位は約1.0Vで(b)よりわずかに小さい値となっているが、ほぼ同様の帯電状態を示している。(f)は照射後の振幅再生像であり、エポキシ樹脂表面近傍では(c)で観察された2次電子の密度が大きい赤や黄の領域は認められない。これは、試料表面に照射したGaを介して、2次電子が基板へ移動

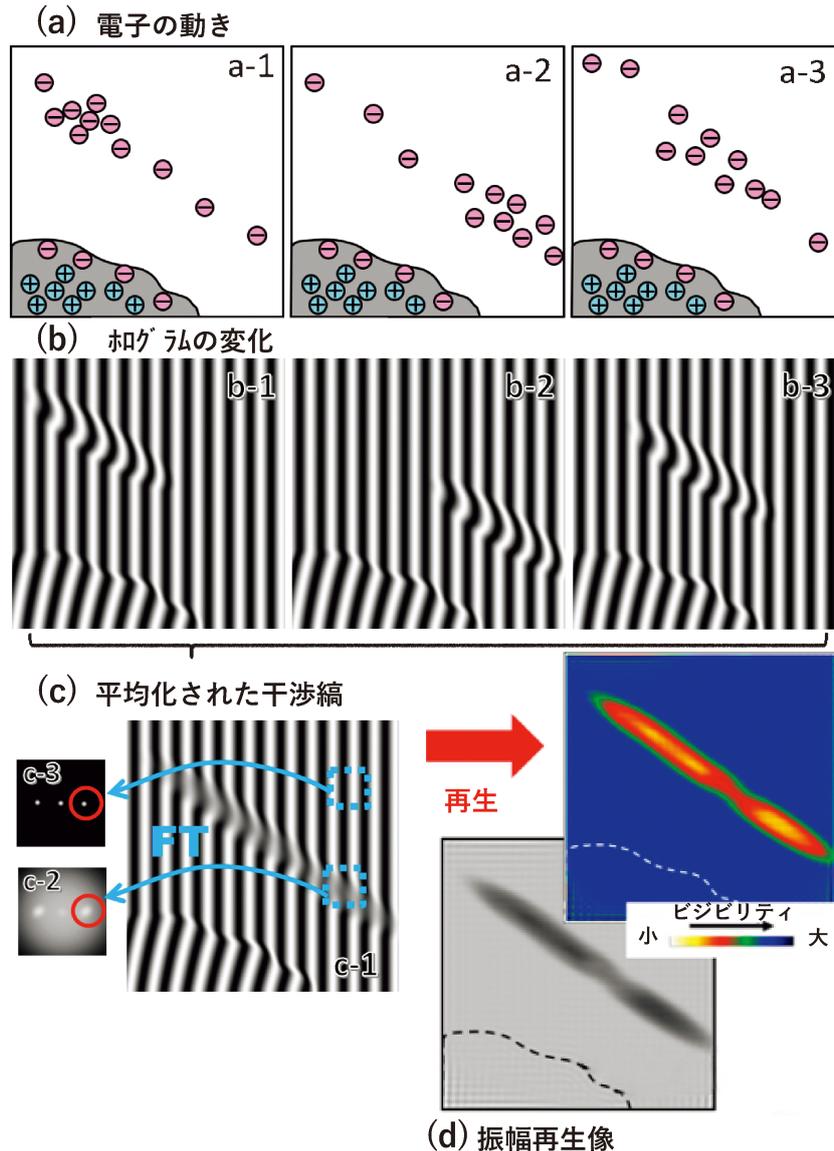


図3-3 電子線ホログラフィーの振幅再生法による、電子の集団運動の可視化原理の模式図。(a) 左下の帯電した試料の上方を2次電子が移動する様子。(b) 電子の移動に対応した干渉縞の変化。(c) 平均化されたホログラムのコントラスト(c-1)、2次電子が移動した領域のフーリエ変換図形には大きなバックグラウンドが現れている(c-2)。(d) ホログラム(c-1)から得られる振幅再生像。点線は、試料表面位置を示す。

し、試料表面の電子の密度が減少したためと理解される⁽³⁾⁽⁴⁾。

エポキシ樹脂表面における2次電子の蓄積が、僅かな金属元素の存在により大きく抑制される現象は、2次電子のマニピュレーター構築が可能であることを示唆する。図3-7(a)は、Ga イオンビームにより微細加工を施した絶縁性を示すチタン酸バリウム(BaTiO₃)の走査イオン顕微鏡像である。試料先端部にわざと未加工の部分を残して破壊しやすい形状にしてある。この試料を透過電子顕微鏡に入れる直前に、機械的衝撃を加え、試料先端の未加工部の付け根部分で破壊(劈開)し、角錐の先端部にGaや不純物の存在しない清浄表面を形成できる。この試料を電子線ホログラフィーの振幅再生法により観察すると、清浄表面の領域のみに2次電子が蓄積されることがわかる(図3-7(b)の明るい領域)。この試料をピエゾ駆動探針ホルダの先端に装着し(図3-7

(c))、各種試料に近づくことにより、局在化した2次電子を操作し、試料表面や内部の格子欠陥との相互作用を直接観察・解析できるものと期待される⁽¹⁾⁽²⁾。

3-6 絶縁体表面での電子のスピンの偏極の観察⁽¹⁾⁽²⁾

入射電子線照射により生じた2次電子の絶縁体試料周囲での周回軌道や蓄積の様子について述べてきたが、この2次電子に一樣な外部磁場を印加することにより、電子のスピンの偏極に伴う磁気的な情報を得ることもできる。

1922年、Stern and Gerlachは、銀原子流を不均一な磁場中を通過させた際、この原子流が二つの方向に分離することを見出した。その分離幅を測定することにより、電子がスピン角運動量 $\pm \hbar/2$ ($\hbar = h/2\pi$)を持つことを指摘した。

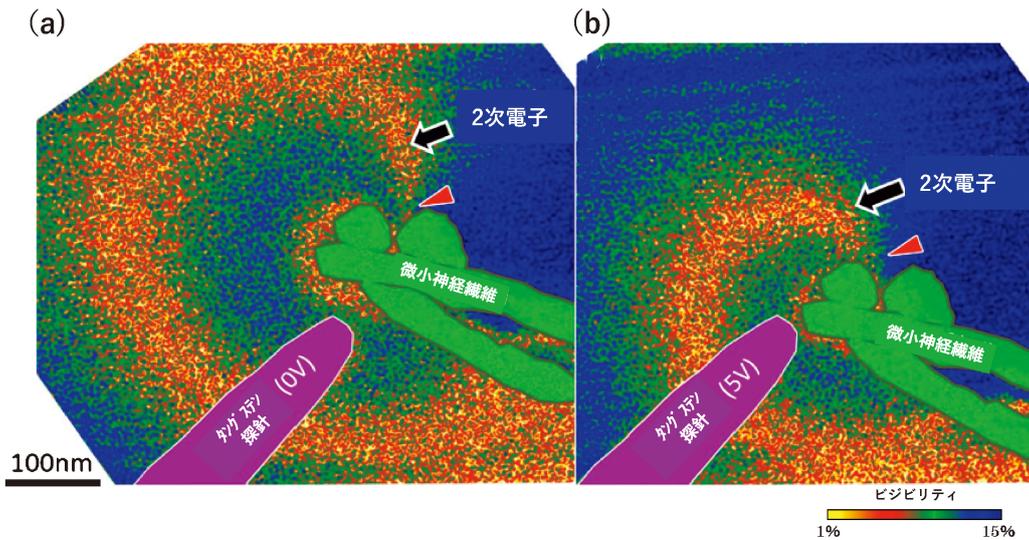


図3・4 (a) ネズミの坐骨神経の微細線維(緑)周辺で観察された2次電子の定常的な周回軌道(赤及び黄)を示す振幅再生像. (b) 挿入されたタングステンの探針に5Vの電圧を印加した際の軌道の変化. 軌道径が短くなる様子が観察されている. 右下にホログラム上の干渉縞のビジビリティに対するカラースケールが表示されている.

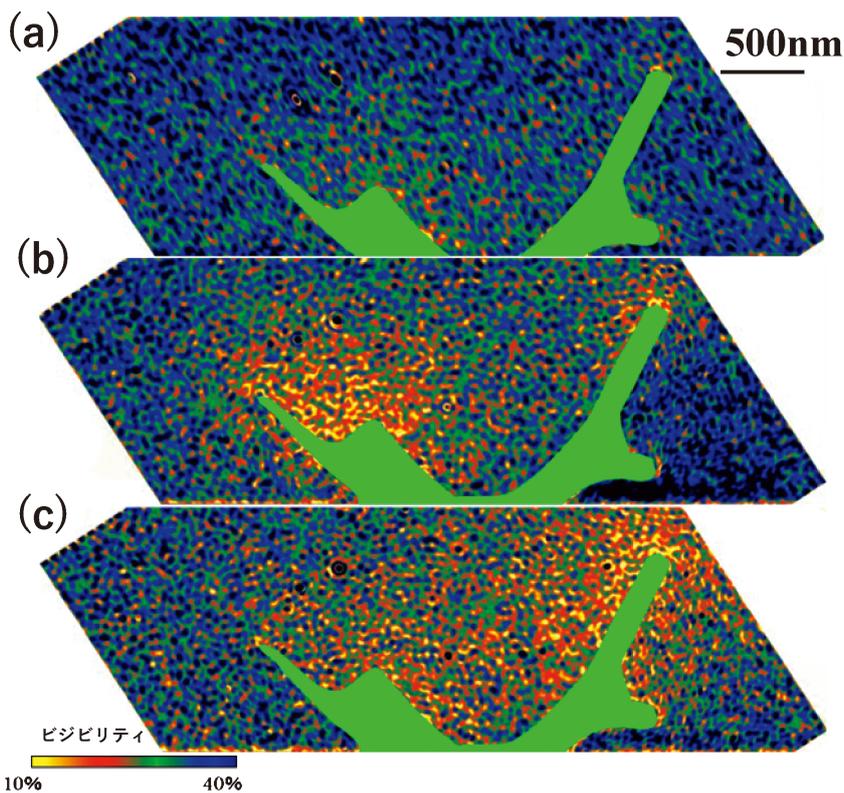


図3・5 (a) 枝分かれした微細線維周辺で撮影された電子線照射初期の振幅再生像. (b), (c) 時間経過と共に, 微細線維間に2次電子の蓄積に伴う赤及び黄のコントラストが明瞭となっている.

この Stern and Gerlach と異なり, 均一な磁場を用いた場合には, 磁場による電子の動きに並進(平行移動)は生じず, トルク(力のモーメント)による回転が生じると考えられる. 帯電した試料表面の電子は, 電気的に強い相互作用をしており, スピンの向きはランダムと考えられるが, 外部磁場の印加によるトルクにより, スピンの向きは磁場印加方向に揃うものと予想される.

また, 電子間での電荷の相互作用に比べ, スピンによる磁氣的相互作用は小さいことが知られている. 例えば, 磁気双極子的な作用による電子間の距離 r での磁氣的な相互作用エネルギー $|U_m| (\propto 1/r^3)$ は, r が 0.1-10 nm の範囲では電気的な相互作用エネルギー $U_e (\propto 1/r)$ に比べ小さく, 具体的には, $r=1 \text{ nm}$ では, $U_e (= 2.31 \times 10^{-19} \text{ J})$ は $|U_m| (= 1.72 \times 10^{-26} \text{ J})$ の約 10^7 倍の大きさである.

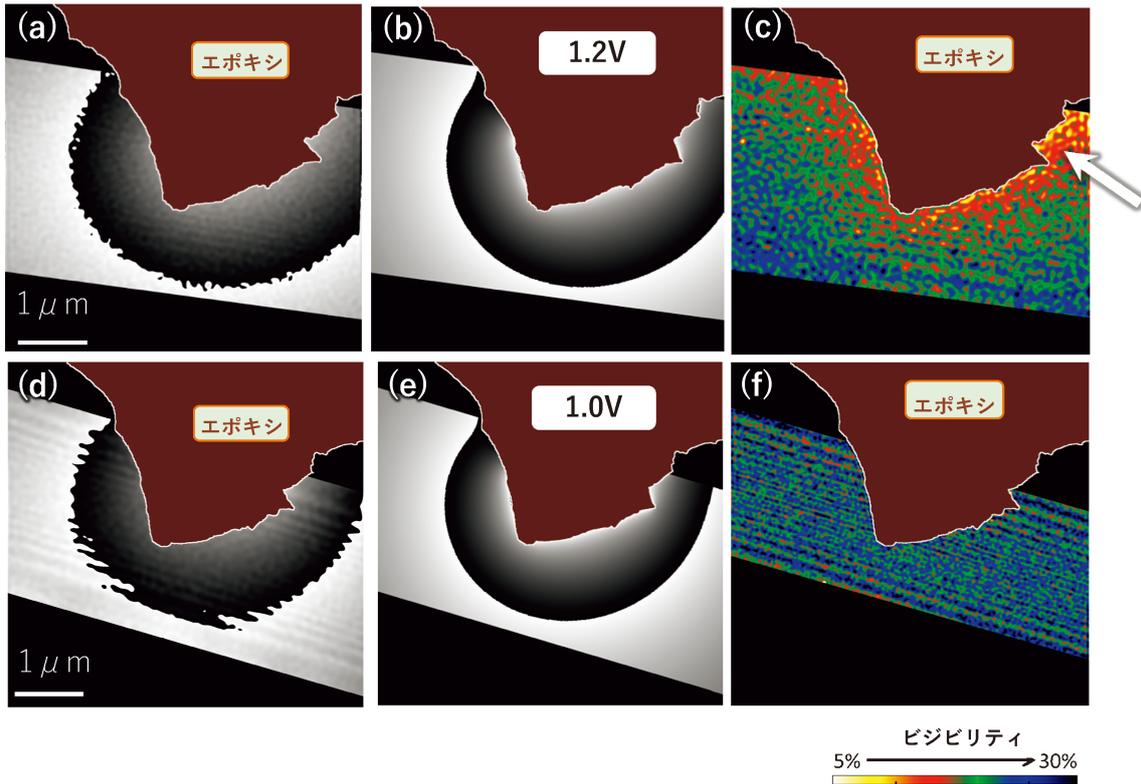


図3-6 エポキシ樹脂の帯電状態と2次電子挙動の変化。(a) ミクロトームにより切削して得られた位相再生像。(b) 位相再生像のシミュレーション。帯電した試料表面の電位は約1.2 Vであることがわかる。(c) 振幅再生像で2次電子の蓄積に伴う赤や黄領域が認められる。(d) ミクロトームで薄片化した試料の両面に弱くGa イオンを照射した後得られた位相再生像。(e) 表面電位を約1.0 Vと仮定して得られた位相再生像のシミュレーション。(f) Ga イオン照射後の振幅再生像で、試料表面近傍で観察された2次電子の蓄積に対応する赤や黄の領域は認められない。

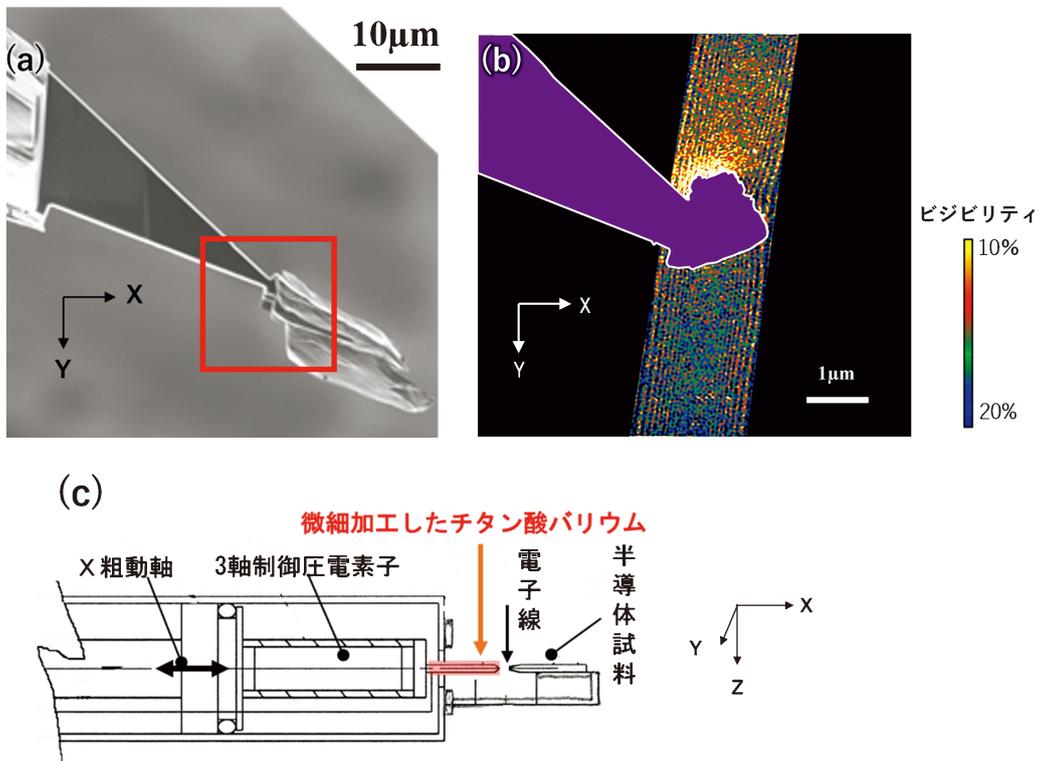


図3-7 (a) Ga イオンビームにより微細加工を施したチタン酸バリウム(BaTiO_3)の走査イオン顕微鏡像。(b) 透過電子顕微鏡に入れる直前に、機械的衝撃を加え、試料先端の未加工部の付け根部分で破壊(劈開)して得られた振幅再生像。(c) (b)の試料をピエゾ駆動探針ホルダーに装着し、2次電子マニピュレータを構築できる。

