

走査型トンネル顕微鏡による グラファイト基板上イオン照射痕の観察

中村信行研究室 加藤 弘行

1. 背景と目的

1.1 多価イオン

一般に多価イオンとは原子や分子が 2 価以上の電荷を帯びた粒子である。我々の研究室では主に 20 価以上の高度に電離した正イオンを扱っている。高価数の多価イオンは中性原子や 1 価イオンとはまったく異なる特徴や振る舞いを見せ、近年世界中で注目されている研究対象である。多価イオンは自然界では太陽コロナなどの高温プラズマ中に存在している。多価イオンの興味深い特徴のひとつとして、その膨大なポテンシャルエネルギーが挙げられる。多価イオンのポテンシャルエネルギーとはそのイオンを生成する為に必要なイオン化エネルギーの総和と定義されており、またそのイオンが中性原子に戻るまでに外部に及ぼす仕事でもある。このポテンシャルエネルギーは価数 q のおよそ 3 乗に比例して急激に増加する。図 1.1 に例として Bi^{q+} イオンのイオン化エネルギーとポテンシャルエネルギーを示す。 Bi^+ のポテンシャルエネルギーは 6eV 程度であるが、 Bi^{83+} では約 600 keV にもなる。

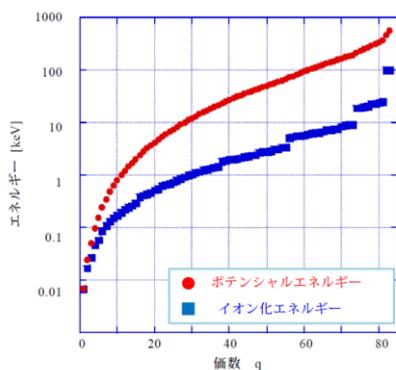


図 1.1 Bi イオンのイオン化エネルギーとポテンシャルエネルギー

1.2 低速多価イオンと固体表面の相互作用

多価イオンは前述のように、多数の電子を失っているため固体表面に低速で接近すると、固体表面から多数の電子を奪い中性化していく。固体表面から奪った電子は、まず多価イオンの外殻に捕らわれ一部の電子は内殻に脱励起する。この脱励起の際のエネルギーを受け取った電子が、真空中にオージェ電子として放出される（オージェ過程）。このような過程を経て多価イオンは中性化しながら固体表面に接近していく。ここで言う「低速」とは、多価イオンを相互作用させる対象の原子、分子等の電子の軌道速度より小さい速度を言う。この速度領域ではイオン表面への移動速度に比べ電子の量子遷移時間はずっと短く、多価イオンへの電子移行やオージェ過程の多くは表面到達前に起こると考えられる。

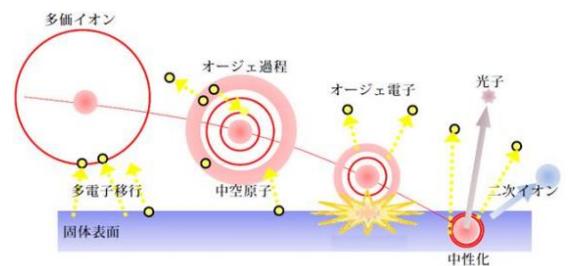


図 1.2 多価イオンと固体表面の相互作用

これらの固体表面相互作用過程は運動エネルギーによる衝突では起こらない特徴的な現象で、多価イオンは衝突の際に自身の価数の数倍という非常に多くの電子を放出する。

1.3 多価イオンによる照射痕

前述のように、多価イオンは膨大なポテンシャルエネルギーを持っているため、低速多価イオンが固体表面に接近すると、多価イオンの持つポテンシャルエネルギーを固体表面に受け渡し、大量の二次電子が放出される。そして、このように二次電子が放出されることによって、固体表面に照射痕が形成されることがある。しかし、その原理は照射対象試料によって様々であり、詳細については未だ不明な点が多い。

1.4 研究目的

近年、この照射痕形成の原理を用いて超精密加工技術を開発することが期待されている。しかし、多価イオンのポテンシャルエネルギーが固体表面に対して、どのようにエネルギーを付与し、照射痕を形成していくかということについては、未だ解明されていないことが多い。また、固体表面に対して垂直に多価イオンを照射した実験が多かったが、垂直入射では多価イオンがポテンシャルエネルギーを付与する時間発展の積分結果のみを得ることしかできず、相互作用の過程の詳細を理解することはできないという問題があった。一方、多価イオンを斜入射させた場合だとのようにポテンシャルエネルギー付与の過程を複数の照射痕として観察できるのではないかと考えられる。

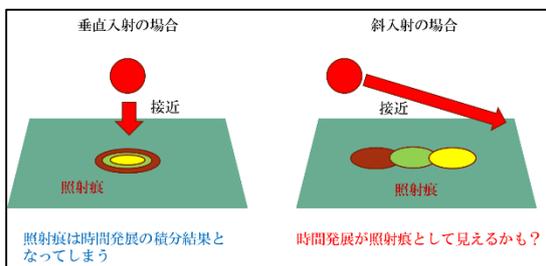


図 1.4 垂直入射と斜入射の概略図

そこで本研究では、Tokyo-EBIT を用いて、超高価数の多価イオンを HOPG 表面に対して垂直と 10° で照射し、これにより形成された照射痕を STM を用いて観察し、照射痕の形成過程について検討することを目

的としている。

2. 実験装置

2.1 試料設置台の作製

標的試料を図 2.1 のように今回作製した試料設置台に取付けた。今回斜入射の実験を行うにあたって、試料設置台の部分を外部のマニピュレーターで回転させることができるフランジを新たに用意した。さらに回転させた際に標的試料が元の位置からずれないように、標的試料が真横から見た時と真上から見たときに回転軸上に来るように調整を行った。

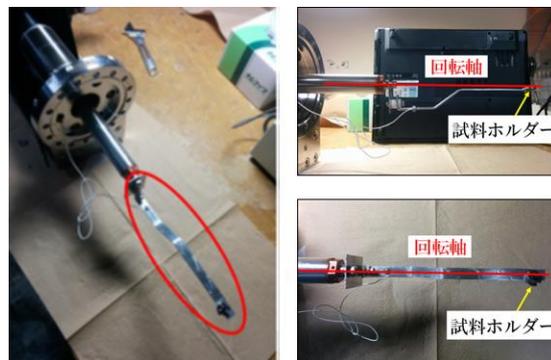


図 2.1 作成した試料設置台

2.2 試料設置台のビームラインへの設置

図 2.2 は試料設置台を取付けたフランジをビームライン内のイオン照射室に設置したときのものである。また、イオンビームの照射位置を限定するために直径 1mm の穴を開けたアルミニウム板もイオン照射室に設置した。これらのフランジにはいくつかのマニピュレーターが備わっており、図 2.3 のように試料設置台を前後・左右・上下に平行移動させることができ、さらに、上下の軸を中心に回転させることができる。また、穴あき板は左右に平行移動させることができる。これらのように動かすことによって、イオンビームが板に開けた穴を通り、標的試料の中心部に当たるように位置の調整を行った。

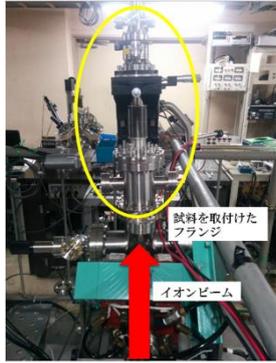


図 2.2 フランジを設置したビームライン

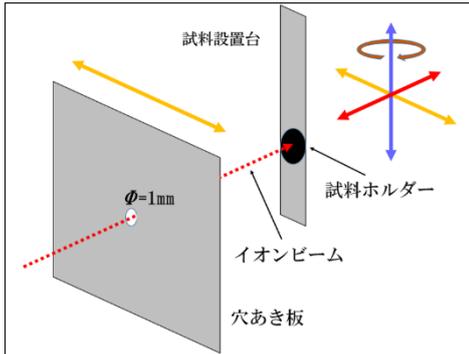


図 2.3 イオン照射室内の可動の概略図

3. イオン照射実験

今回の実験では、多価イオンによる照射痕観察の準備実験として、イオン銃を用いてイオンを生成し、イオンビームを標的試料に照射する実験を行った。また、図 3.1 のように照射痕を比較するために、斜入射での実験だけでなく垂直入射での照射実験も行った。実験条件は表 3.1 のように行った。ここで、照射イオン密度は図 3.1 のように試料設置台に取付けた電流計によって測定されたイオンビーム電流の値から計算で求めた。

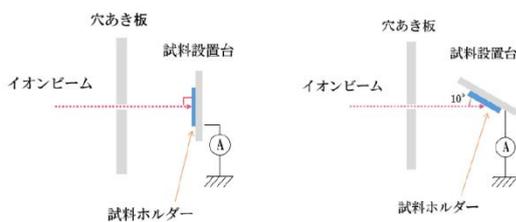


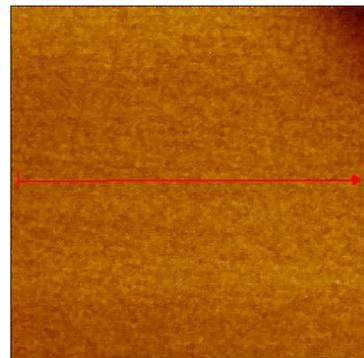
図 3.1 照射実験の概略図

表 3.1 実験条件

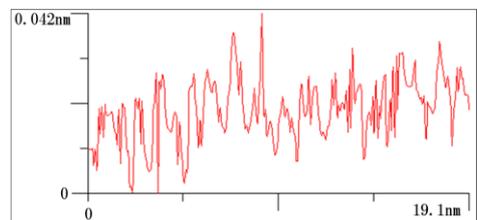
照射イオン	Ne ⁺
運動エネルギー	3 keV
照射イオン密度	3×10^{13} ions/cm ²

4. 実験結果

図 4.1 は、イオンを照射する前の HOPG 表面の STM による観察画像であり図 4.1(b)は、図 4.1(a)の赤い線に沿って断面をとったものである。この観察では、原子を観察することはできなかったが、図から、高低差は最大で 0.042nm とノイズレベルであり、表面が平坦であることが確認できた。また、図 4.2、4.3 はそれぞれ、イオンを垂直に照射した試料(試料 A) とイオンを 10° の入射角で照射した試料(試料 B) の表面を STM で観察したものである。照射前の表面と異なり、白い部分が目立っている。この白い部分には突起状の照射痕が形成されている。これらの突起状照射痕のうちの 1 つをそれぞれの図 4.2(a)、4.3(a)中の赤い線に沿って断面をとったものがそれぞれ図 4.2(b)、4.3(b) となっている。さらに、これらの試料 A,B のそれぞれの突起状照射痕の高さと幅の 10 個の平均をとったものを表 4.1 にまとめた。



(a)



(b)

図 4.1 イオン照射前の試料表面

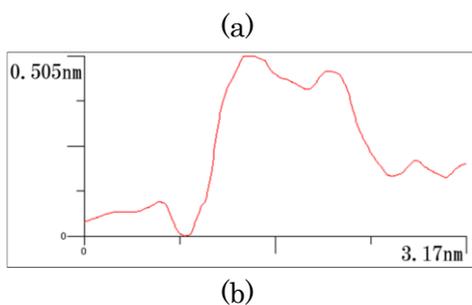
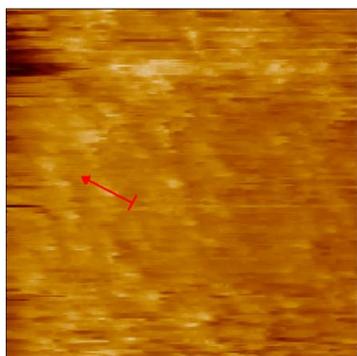


図 4.2 イオン照射後の試料 A の表面

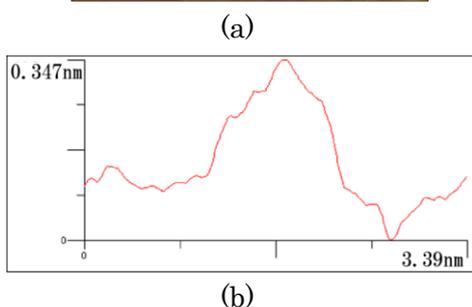
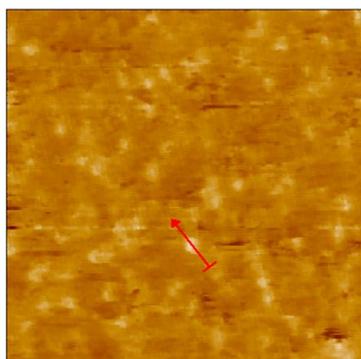


図 4.3 イオン照射後の試料 B の表面

表 4.1 照射痕の高さと幅の平均

	高さ \bar{h} [nm]	幅 \bar{w} [nm]
垂直照射	0.5 ± 0.1	1.8 ± 0.7
10° 照射	0.17 ± 0.04	1.2 ± 0.2

それぞれの場合で形成された照射痕を比較すると、高さは明らかに 10° の入射角で照射した場合のほうが低くなったが、幅に関してはほとんど変化は見られなかった。また、照射痕の形状については角度を変えても変化は見られなかった。形状に変化がなかったことから、今回の実験ではポテンシャルエネルギー付与の過程を照射痕として観察することはできなかった。

5. まとめと今後の展望

今回、イオン銃を用いて Ne^+ を角度を変えて HOPG に照射し、STM による表面観察を行った。形成された照射痕の高さは垂直照射の場合よりも 10° の入射角で照射した場合のほうが低くなることがわかった。一方、幅と形状については変化が見られなかった。また、形状に変化が見られなかったので、 Ne^+ を照射した場合には、固体表面へのポテンシャルエネルギー付与の過程を照射痕として観察できなかった。今回の実験では、Tokyo-EBIT がトラブルに見舞われたため、多価イオンを用いた照射実験は行うことができなかった。Tokyo-EBIT が復旧し次第、多価イオン照射実験を行い、今回の表面観察の結果との比較を行っていきたい。