

走査型トンネル顕微鏡による多価イオン照射痕の観測

中村信行研究室

0713028 工藤孝弘

1. 背景

1-1. 多価イオンの特徴

多価イオンとは原子から複数の電子を奪った粒子である。q 個の電子を失ったイオンが q 価の多価イオンであり、多価イオンは価数に依存したポテンシャルエネルギーを持つ。

ポテンシャルエネルギーとは電子を 1 個ずつ奪うために必要なエネルギーの総和であり、イオンが中性原子に戻るまでに外部に成すことのできる仕事量でもある。Fig.1 はビスマス (Bi) のポテンシャルエネルギーの価数依存性を表しており、価数に依存しながら急激に増加していることがわかる。

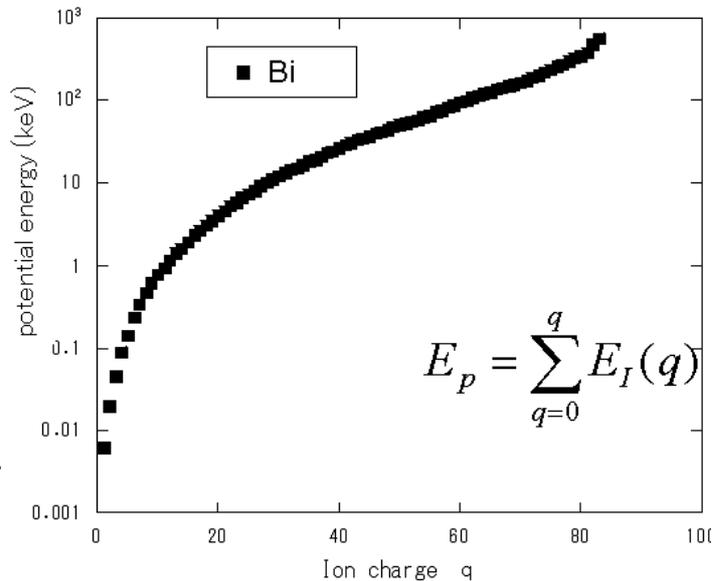
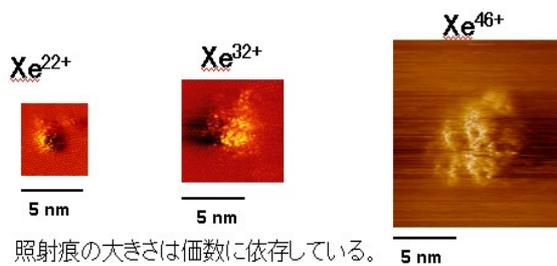


Fig.1 Biイオンのポテンシャルエネルギー

1-2. 多価イオンによる照射痕



照射痕の大きさは価数に依存している。

高価数領域での実験

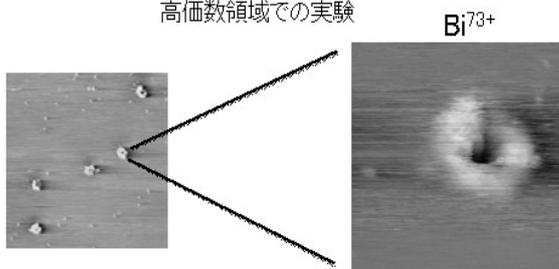


Fig.2 HOPGへの多価イオン照射痕の比較

多価イオンを固体に照射した場合、10 fsec以下の短時間に微小領域に、そのポテンシャルエネルギーを付与し、特殊な照射痕を構築する場合がある。Fig.2の上段はHOPG (Highly Oriented Pyrolytic Graphite ; 高配向性熱分解グラファイト) にキセノン (Xe) の多価イオンを照射したSTM (Scanning Tunneling Microscope ; 走査型トンネル顕微鏡) 像である。隆起状の照射痕が構築され、その大きさは照射したイオンの価数に依存して大きくなっていることがわかる。Fig.2の下段は73価のBiイオンによる照射痕である。このように高価数イオンでは照射痕の形状がクレーター状になることがある。

STMは照射痕観測によく使われる装置である。原子レベルで研磨された探針と固体表面を接

近させ、その間に生じる微小なトンネル電流を感知することで、固体表面の形状や電子状態を観測することができる。照射痕はナノサイズの大きさなので、STMなどの顕微鏡を必要とする。

多価イオンによる照射効果は照射対象物によっても異なる。Fig3は金、シリコン、酸化チタンに50価イオンを照射したSTM像の比較である。金属には照射効果が低く、シリコン、酸化チタンでははっきりと照射痕が観測できている。

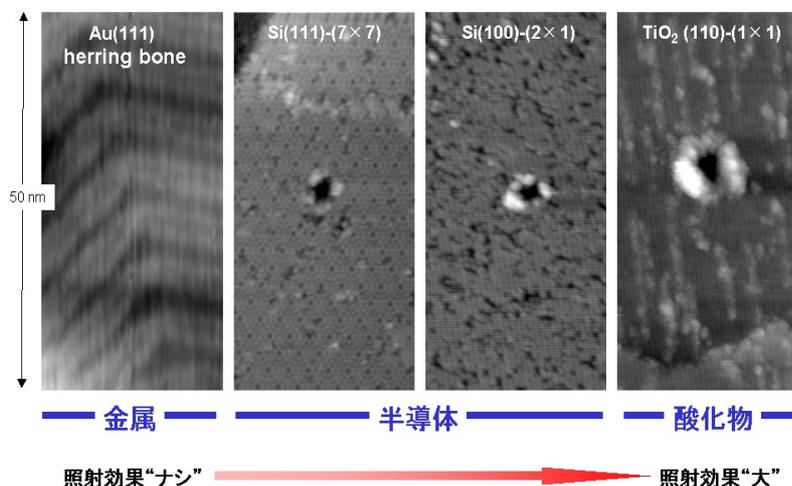


Fig.3 照射痕の照射対象による比較

HOPGは層状構造の炭素原子の塊であり、層と層の間の結合が弱く、比較的簡単にきれいな表面が作れ、電気伝導性も良いのでSTMのサンプルとしてよく用いられている。また、多価イオンによる照射効果も高いことがわかっており、多価イオン照射実験の試料として好まれている。

1-3. 照射痕構築の過程

照射痕構築の原理として、「Coulomb Explosion」という考え方が一般的に知られている。これは固体表面が局所的に電子を奪われた際に起こる現象で、電子を奪われた部分が正に帯電することによって斥力が生じ、その斥力が固体の結合力を超えた時爆発するというものである。多価イオンによる照射痕では、数百～千個程度の原子を吹き飛ばす爆発が起こっていると考えられている。

2. 目的

多価イオンによる照射痕は以上のような特徴を持っているが、高価数イオンの生成には大型イオン源が必要であり、詳細はまだ明らかになっていない。そこで照射痕の大きさの価数依存性をより詳細に調べることと、照射痕形状の変化する価数を特定することを目的として、HOPG試料にBiイオンを照射し、STMにて観測する実験を行った。

3. 実験

3-1. 条件

イオン源:Tokyo-EBIT

イオン:Bi⁶⁰⁺

引き出し電圧:3.0 kV

粒子数:3000~4000 cps

照射時間:17時間

照射対象:HOPG

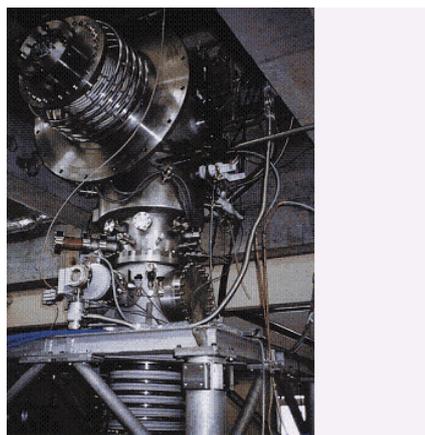


Fig.5 Tokyo-EBIT(Electron Beam Ion Trap)

3-2. 実験装置概略図

Tokyo-EBITでBiをイオン化し、3.0 kVの電圧をかけてビーム状に引き出した。この時点では様々な価数のイオンが混ざっているため、価数分析磁石を用いて60価イオンのみを取り出した。

照射痕の密度が小さい場合、照射痕を発見、断定することが困難となる。そこで試料背後にあるMCP(Micro Channel Plate)でイオンの粒子数を計測しながら、十分な照射密度となるまで照射を続けた。

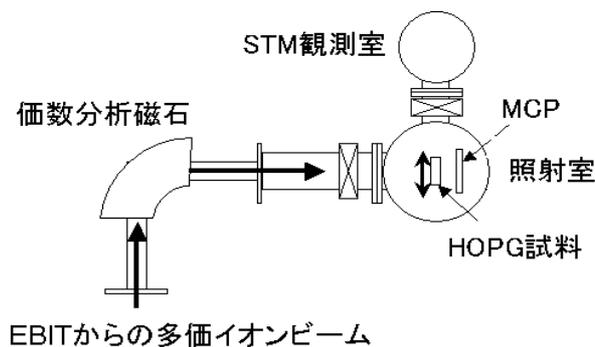


Fig.6 実験装置外略図

4. 結果

Fig.7は今回観測した照射痕である。照射痕を無作為に9個選び、各々の縦と横の平均を取り、さらにその標準偏差を取ったところ、照射痕の大きさは直径 7.3 ± 1.2 nmであり、形状は隆起状であった。これを過去の報告例と比較すると(Fig.8)、Xe⁴⁶⁺、Bi⁷³⁺と同程度であり、40価以上の照射痕は価数に依存して肥大しないことを示唆している。また隆起状からクレーター状への照射痕形状の変化は61価から72価の間で起こると予測できる。

同じ間隔で照射痕が観測されているので、STMの探針の先端が3つに分裂し、同じ照射痕を複数回観測した可能性がある。

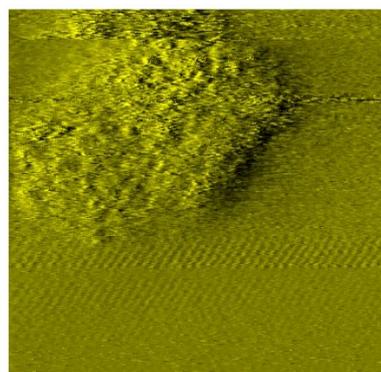
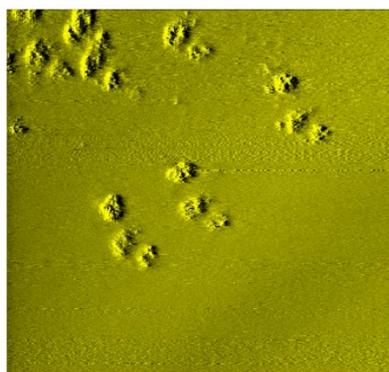


Fig.7 60価Biによる照射痕

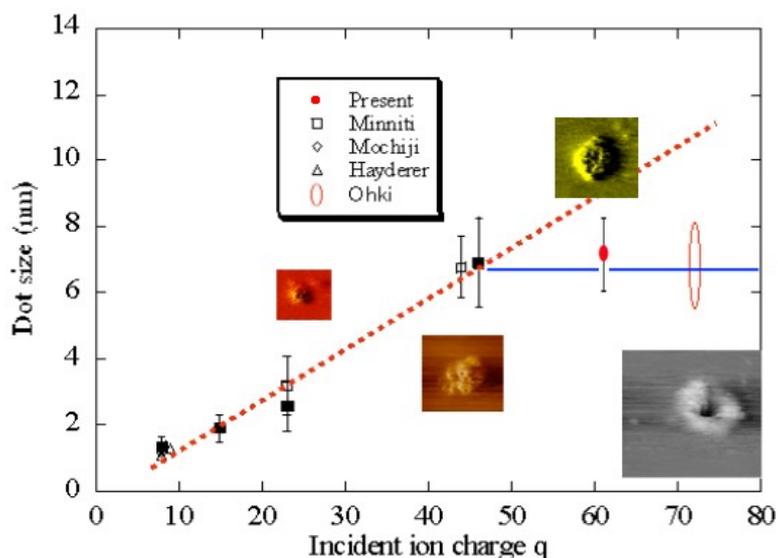


Fig.8 照射痕の大きさの価数依存性

5. まとめ

低価数イオンでは価数依存性を示している多価イオン照射痕サイズの高価数イオンでの価数依存性を調べるため、 Bi^{60+} をHOPG試料に照射し、STMで観測する実験を行った。結果として Xe^{46+} 、 Bi^{73+} での報告例と同程度の大きさの隆起状構造物が観測された。この結果により高価数イオンでは価数依存性が小さいこと、60価イオンでは照射痕形状が変化しないことがわかった。

今後は $\text{Bi}^{61+ \sim 72+}$ で実験を行い、照射痕形状が変化する価数を特定する。

参考文献

- Hai-Ping Cheng PHYSICAL REVIEW B VOL 55, 2628 (1997)
- 大木野生 2008年度卒業研究 電気通信大学 大谷研 (2009)
- 阿部崇 2006年度卒業研究 電気通信大学 山田研 (2007)
- 日本表面科学会編 ナノテクノロジーのための走査型顕微鏡 (2003)