

多価イオン照射痕の顕微鏡観測

量子・物質工学科 大谷研究室 大木野生

1. 背景

我々の研究室では、Tokyo-EBIT (Electron Beam Ion Trap) を用いて多価イオンと固体表面との反応を研究している。多価イオンは中性原子から束縛されている電子を2個以上剥ぎ取ったイオンであり、生成時に要したエネルギーを内部に保有する。このポテンシャルエネルギーは価数と共に増大し、我々が興味の対象としている数10価の多価イオンでは、100keV以上にもなる。固体表面との相互作用においてはその莫大なエネルギーを微小領域 (<10nm) に微小時間 (<10fs) で与える為、表面上に大きな影響が現れる。例えば、多価イオンが物質に近づくと、固体表面上の電子が吸引され、多数の陽イオンが生成される[1]。その結果、原子配置が局所的に変化することで照射痕ができ、その大きさが価数と共に大きくなることが知られている[2]。このような多価イオンの性質を利用して、ナノスケールの表面加工を施す新たなデバイス製作などへの応用が考えられている。

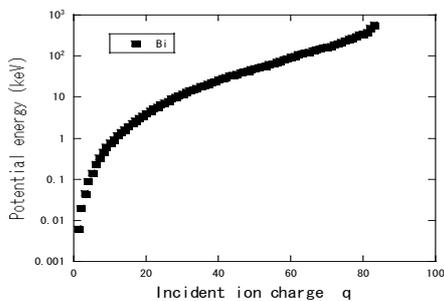


図1：価数とポテンシャルエネルギーの関係

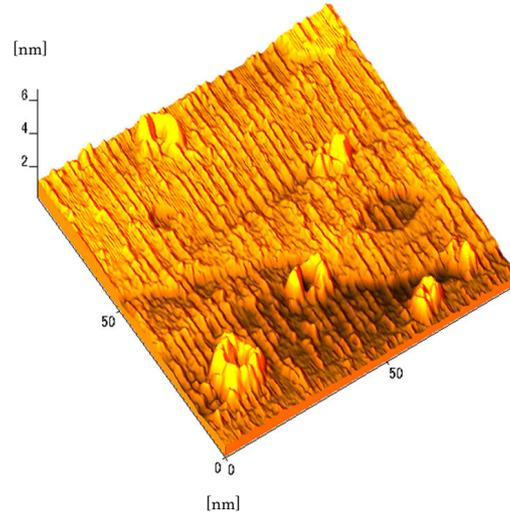


図2： I^{50+} on $TiO_2(111)$ STM像
3次元イメージ図[3]

2. 目的

多価イオンによる照射痕形成は多くの実験によって少しずつ明らかになっている。しかし、50価以上の高価数多価イオンでの実験はほとんどない。そこで、本実験ではHOPG(高配向性熱分解グラファイト)にBi ($Z=83$) 73価イオンを照射し、照射痕をSTM (Scanning Tunneling Microscope: 走査型トンネル顕微鏡) によって観測した。比較の為44価イオンの照射痕も観測し、ナノ構造の変化を調べた。

3. 実験

実験装置の概略図を図2に示す。EBITを用いてBiの多価イオンを生成し、それを加速電圧3kVで引き出し、分析磁石

により価数選別をした。選別した Bi^{73+} の多価イオンビームを照射室へ運搬し、 $\phi 1\text{mm}$ の細孔を通した後に MCP (Micro Channel Plate) で測定しながら、多価イオンの個数が最大になるように静電レンズなどを調整した。その後、HOPG を細孔と MCP の間に入れ、ビームを照射した (図 2)。照射後の HOPG を SPM (Scanning Probe Microscope) 観測室まで真空内移動させ、STM で照射痕を観測した。これを Bi^{44+} でも同様に行った。そして、入射イオンの照射密度 (表 1) と STM 観察による照射痕形成密度との比較を行った。

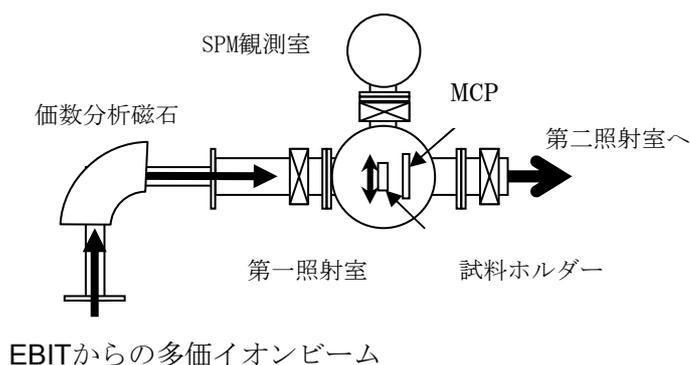


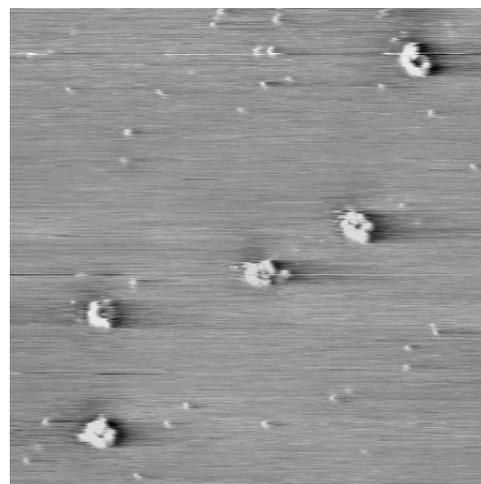
図 2: 実験装置概略図

価数	照射イオン数 ($\phi 1\text{mm}$)	$100\text{nm} \times 100\text{nm}$ 当たりの照射数
Bi^{73+}	5.9×10^8 個	5.6 個
Bi^{44+}	3.5×10^8 個	3.3 個

表 1: 照射イオン数

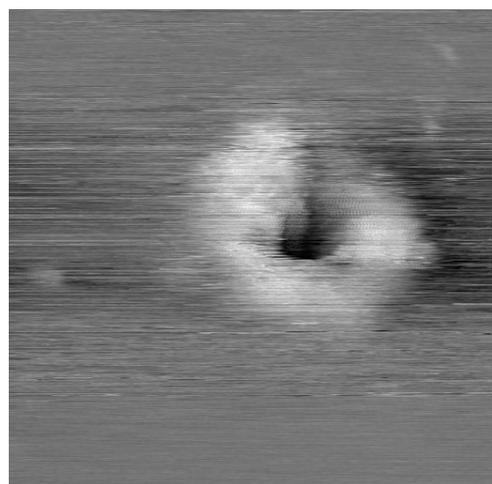
4. 結果

4.1 Bi^{73+} の照射痕



100nm

図 4: Bi^{73+} on HOPG STM 像 ($100\text{nm} \times 100\text{nm}$)

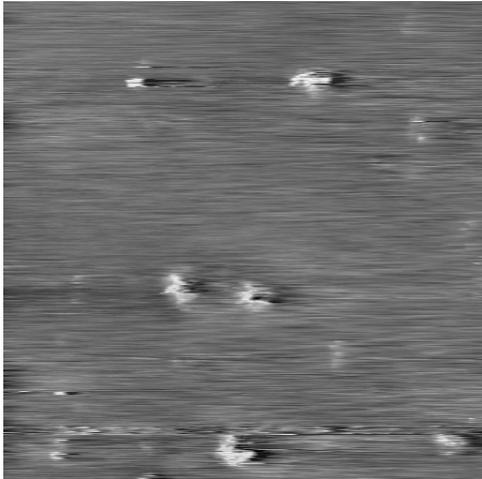


15nm

図 5: Bi^{73+} on HOPG STM 像 ($15\text{nm} \times 15\text{nm}$)

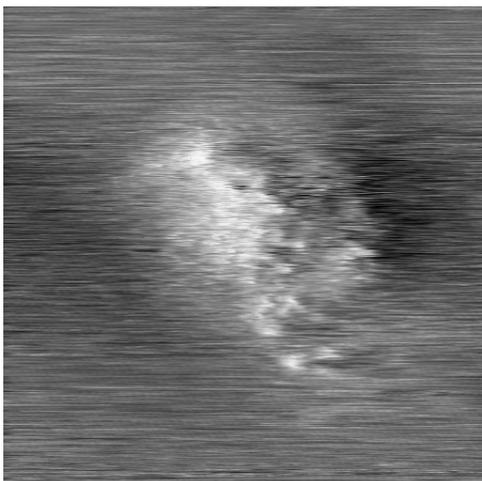
観測の一例を図 4 に示す。この例からも分かるように、観測された照射痕密度はイオン照射密度とほぼ等しかった。次に 1 つの照射痕を拡大した例を図 5 に示す。図のような噴火口状照射痕が多く観測された。その直径は $6 \sim 8\text{nm}$ であった。

4.2 Bi⁴⁴⁺の照射痕



100nm

図 6: Bi⁴⁴⁺ on HOPG STM 像 (100nm×100nm)



15nm

図 7: Bi⁴⁴⁺ on HOPG STM 像 (15nm×15nm)

観測の一例を図 6 に示す。この例にもあるように、観測された照射痕密度がイオン照射密度よりも多いことが分かった。これは観測例が少なく、照射密度の多い箇所を観測してた可能性や、入射イオン数の測定方法になんらかの問題があった可能性が考えられる。

次に1つの照射痕を拡大した例を図 7 に示す。図のような隆起状照射痕が多く観測された。その直径は 6~9nm であった。

5. まとめ

Bi⁴⁴⁺では、直径 6~8nm の隆起状構造の照射痕が観測できた。これは我々の研究室で以前観測された Xe⁴⁶⁺ と同様の結果 [4] であった。しかし、Bi⁷³⁺ では 6~9nm の噴火口状照射痕が観測された。これは我々の研究室及び他の研究グループで行われた HOPG への照射実験 [4] では観測されたことのない形状であった。Bi⁷³⁺ ではより多くの電子を吸引し、その後の爆発も激しいため噴火口状になったと考えられる。

今後の課題として、Bi⁷³⁺ と Bi⁴⁴⁺ の照射痕の照射痕の直径がほぼ等しくなったことなどから、Bi の価数を変化させ、照射痕を系統的に観測していく必要があると考えている。また、照射痕形成メカニズムを明らかにしていく為にも、照射標的試料を、多価イオンの影響を受けにくい金属、半導体、他の層状結晶、Si 等の異なる結晶試料にも照射し、観測していく必要があると考えている。

付録 [5, 6, 7]

a. STM 原理

STM は導電性探針と固体表面との間に流れるトンネル電流を利用し、原子レベルで物体を観察できる顕微鏡である (図 8)。探針を固体表面上に近づけ、相互間に数百 mV の電圧をかける。相互間距離 (S) が 1nm 以下になるとトンネル電流 (I) が流れる。このトンネル電流は距離が小さくなるほど大きくなる (式 (1)) ので、これを検出信号として探針を走査することで画像を得る。

$$I \cong \exp \left(-2S \sqrt{\frac{2m}{\hbar^2} \left(\langle \phi \rangle - \frac{e|V|}{2} \right)} \right) \dots (1)$$

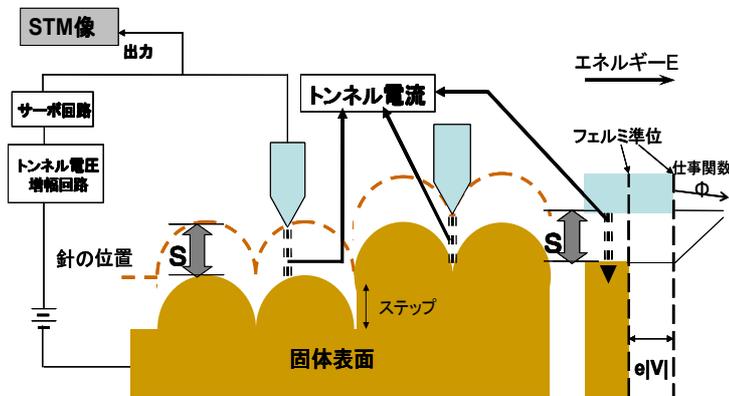


図 8 : STM 概略図

b. STM 探針作成

STM は原子レベルでの観察ができる為、探針の先鋭度が高解像度の STM 像を得る為に重要になる。本実験では電解研磨法を用いた。白金ワイヤーで円形をつくり環状陰極にし、表面張力によって NaOH (濃度 2N : 1ℓ中に 2g) 溶液の表面を約 1

mm 引き上げるように図 9 のようにする。環状陰極の中心に、タングステン線 (φ 0.3mm) を 3mm 程度液面に入れ、環状陰極との間に 20mA 程度の電流を流すことで電解研磨した。タングステンの先が環状の中心からずれてしまうと、斜めになってしまう。また電流を多く流しても、先を長めに液面に入れてしまっても、十分な先鋭度が得られない。実際に原子像が得られる探針を作るまで多くの経験を要した。



図 9 : 環状陰極と液面

参考文献

- [1] H. Ryufuku, et al, Phys. Rev. A21 745(1980)
- [2] N. Nakamura, et al. : NIMB. B23 2261-265 (2005)
- [3] 藤田祐崇 平成 19 年度 修士論文 電気通信大学
- [4] M. Terada et al. : NIMB 235 452 (2005) 他
- [5] 日本表面科学会編
ナノテクノロジーのための走査プローブ顕微鏡 (2003)
- [6] 満田康晴 平成 19 年度 修士論文 電気通信大学
- [7] 御子柴宣夫 走査型トンネル顕微鏡 電子通信情報学会(1991)