

クラスターイオンの非線形効果

京都大学工学部附属イオン工学実験施設
瀬木利夫、田能村昌宏、松尾二郎、山田公

1. はじめに

クラスターイオンビームは、従来の単原子・分子イオンビームと比較して非常に大きな質量のイオンを輸送することができる。また、固体表面との衝突において、クラスター構成原子、クラスターと固体原子との間の多体衝突が顕著になり、単原子衝突では見られない特徴ある照射効果(非線形効果)を生ずる。

一方、分子であるフラーレンは、数十個の炭素原子で構成された炭素クラスターである。そのためフラーレンイオンを用いることで、小さなサイズのクラスターの照射効果を調べることができる。今回、この炭素クラスターを主に用いてクラスターイオンの非線形効果について述べる。

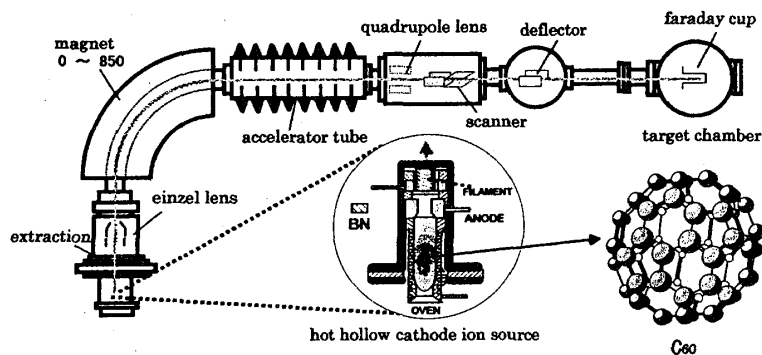


図 1.1 フラーレンイオン注入装置

図 1.1 にフラーレンイオン注入装置の概略図を載せる。フラーレン原料は C_{60} 、 C_{70} 混合粉末試料を用いた。この原料をイオン源(hot-hollow cathode 型)部のオープンに入れ加熱後イオン化する。10kV で引き出した後、分析電磁石で質量分離を行い、最大 380kV まで加速後ターゲットに照射する。

図 1.2 にイオン源部フィラメント電流 20A、オープン電流 10A の時のマススペクトルを示す。 C_{60}^+ 、 C_{70}^+ 、だけでなくこれらのクラッキングイオン及びダブルチャージが存在している。さらに、 C_{60}^+ 、 C_{58}^+ など、 C_2 ロスの傾向がみられ、並びに非常

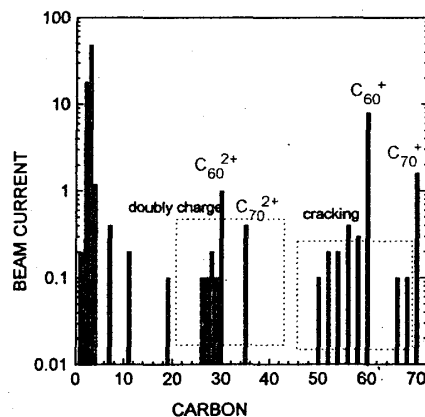


図 1.2 マススペクトル

に精度良く質量分離が行われていることがわかる。

2. 炭素クラスターイオンによる固体損傷

種々のサイズの炭素クラスターをサファイア基板に照射し、照射により生じた損傷数を調べることで、炭素クラスターイオンの照射効果を調べる。損傷数はSi及びサファイアのRBS(Rutherford Back Scattering)チャネリングスペクトルにおける表面ピークの面積から求めた。

図2.1にサファイアに300keVで C_{60}^+ を照射したさいのアトミックドーズ依存性を示す。図中の実線はTRIM(Transport Ions in the Matter)による炭素モノマーイ

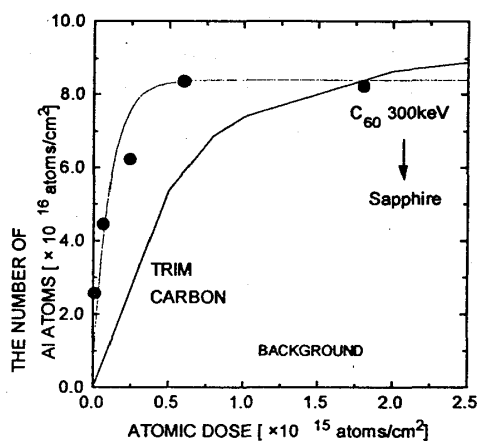


図2.1 アトミックドーズ依存性

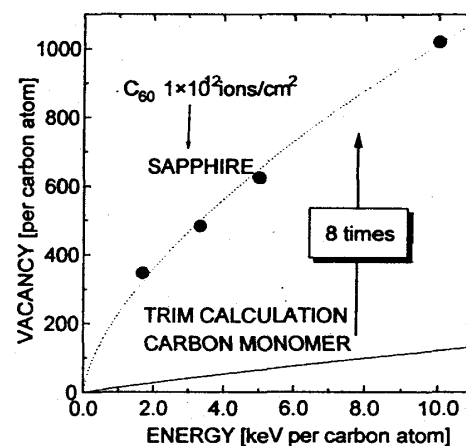


図2.2 エネルギー依存性

オンによる計算結果である。飽和する損傷数はほぼ同じであるが立ち上がりはクラスターのほうが大きいことがわかる。図2.2に、この立ち上がりの領域(アトミックドーズ量 $6 \times 10^{13} \text{ atoms/cm}^2$)における、エネルギー依存性を示す。縦軸は炭素原子一個当たりにより生じるAlの損傷数である。 C_{60}^+ の方がモノマーと比べて約8倍損傷数が多く、そのため炭素モノマーを60個照射するよりも、 C_{60} を1個照射したほうが基板に与える損傷数が多いことがわかる。これらのことから、クラスターによる非線形効果が示された。

3. クラスター照射痕のSTM観察

クラスターイオンビームを基板に照射すると、低エネルギー効果、多体衝突効果、高密度照射効果など、クラスター特有の照射効果が得られると考えられている。クラスターイオンビームの応用を考えたとき、このようなクラスターと固体表面原子との相互作用を原子レベルで解明することが必要となる。そのため単一のクラスターイオン衝突痕をSTM(走査型トンネル顕微鏡)を用いて原子レベルで観察し、ク

ラスタと固体原子の相互作用を解明した。照射基板にはHOPG（高配向性層状グラファイト）を用いた。HOPGは容易に劈開可能で数 μm^2 の範囲で原子レベルの平坦面を得ることができ、優れた導電性を持ち化学的に安定である特徴を持つ。従ってSTMによって容易に原子レベルの像を観察することができる。

3.1 Ar クラスター照射痕

図3.1.1はArモノマー及びArクラスターをHOPGに照射したときのSTM像である。測定は大気中にて機械研磨によるPt-Ir合金製の短針を用い、トンネル電流を0.7nA、バイアス電圧を1.0V（試料側が高電位）に設定し、電流一定モードで行った。Arモノマーは加速電圧1.5kV、Arクラスターは平均サイズ100のものを加速電圧150kVで照射した。モノマー照射の場合、直径が20Å程度の小山状の照射痕が観察されたのに対し、クラスター照射の場合、直径が180Åに及ぶ大きなクレーター状の照射痕が観察された。イオンドーズ量から計算される照射痕の数と観察された照射痕の数がオーダーで一致していることから、これらの照射痕は単一イオン衝突によって形成されたと考えられる。原子1個当たりのエネルギーが等しい、つまり同じイオン速度で照射したにも関わらずモノマー照射痕とクラスター照射痕

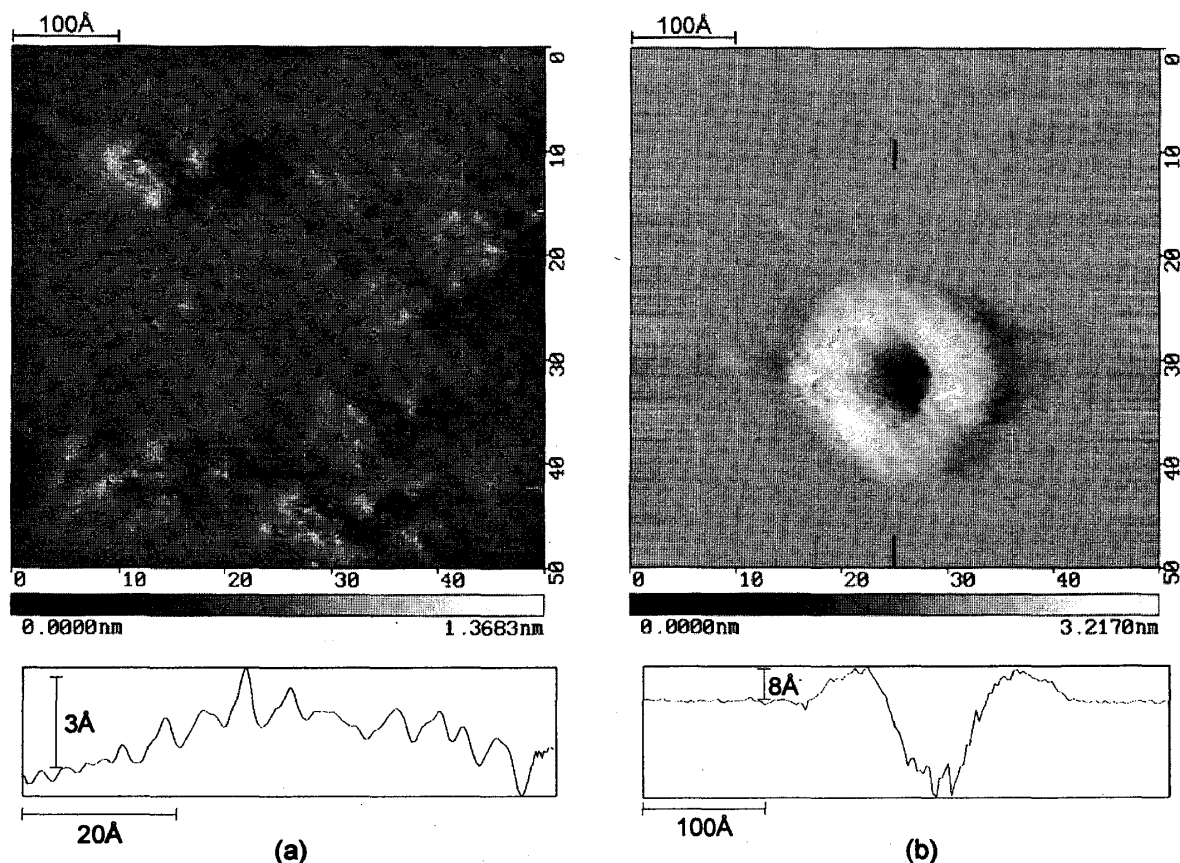


図3.1.1 (a)Arモノマーイオンを照射したHOPG表面のSTM像 ($V_a=1.5\text{kV}$, $\text{Dose}=5\times 10^{11}\text{ ions/cm}^2$)
(b)Arクラスターイオンを照射したHOPG表面のSTM像 ($V_a=150\text{kV}$, $\text{Size}=100$, $\text{Dose}=5\times 10^{10}\text{ ions/cm}^2$)

の間に大きな違いが観察されたことは、クラスター衝突がモノマー衝突の重ね合わせとは全く異なることを示している。

図 3.1.2 は平均サイズ 3000 の Ar クラスターを HOPG に照射したときのクレーター直径の加速電圧依存性である。クレーター直径は加速電圧の $1/3$ 乗に比例して増加していることから、Ar クラスター衝突では、クラスターイオンの持つ運動エネルギーが深さ方向のみならず表面方向にも等方的に分配されていると考えられる。

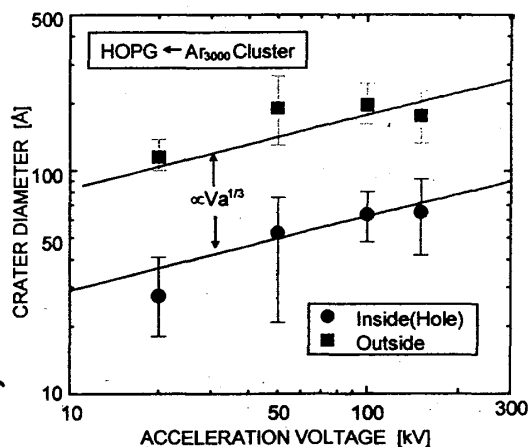


図 3.1.2 クレーター直径の加速電圧依存性

られる。このことからクラスター衝突によるクレーターの形成は、図 3.1.3 に示すような衝突メカニズムによって説明できる。モノマー衝突ではカスケード

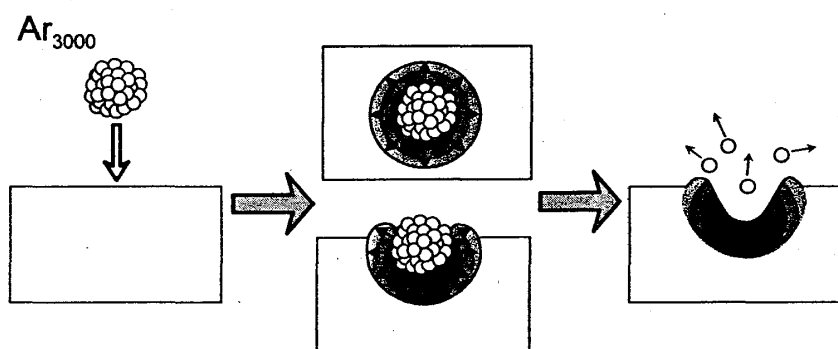


図 3.1.3 Ar クラスター衝突のメカニズムモデル

衝突によって損傷が形成されるが、Ar クラスター衝突ではクラスターは壊れることなく基板の内部に進入し、クラスターの持つ運動エネルギーを基板に対して等方的に分配する事によって大きな半球状の損傷領域を形成する。このとき基板表面付近では表面が盛り上がるように損傷が起こり、クレーターの外輪部が形成される。その後 Ar クラスターは蒸発して、中心部に穴が残りクレーターが形成される。このようにクラスター衝突はモノマー衝突とは全く異なる衝突メカニズムを有していることが分かる。

3.2 フレーレンイオン照射痕

図 3.2.1 はフレーレンイオン (C_{60}) を HOPG に照射したときの STM 像である。 C_{60} は加速電圧 300kV で照射し、測定は

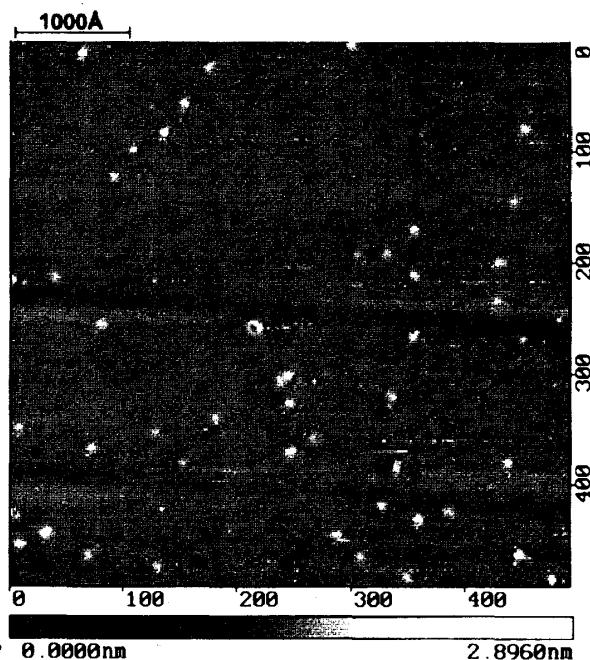


図 3.2.1 C_{60} イオンを照射した HOPG 表面の STM 像 ($V_a=300\text{kV}$, $\text{Dose}=5 \times 10^{10} \text{ ions/cm}^2$)

Ar 照射の場合と同様の条件で行った。直径 $100 \text{ \AA}$ 以上の大きな照射痕が観察され、中には Ar クラスターを照射した時と同様な大きなクレーター状の照射痕が観測された。このように C_{60} のような分子クラスターを照射した場合にもクレーター状の照射痕が観測されたことは、これがクラスター照射特有の照射痕であることを示している。

図 3.2.2 に照射痕直径の 2 乗の 1 原子当たり加速エネルギー依存性を示す。同時にトーマスフェルミのポテンシャルを用いて計算した炭素原子をグラファイトに照射した場合の核的阻止能を示す。

C_{60} の照射痕の大きさは加速電圧の $1/3$ 乗に比例していないことから、 C_{60} は小さいため最表面で全ての運動エネルギーを失うことなく基板の奥まで進入し、深さ方向に異方性を持った

損傷を形成していると考えられる。

また図 3.2.2 から照射痕直径の 2 乗の 1 原子当たり加速エネルギー依存性が核的阻止能とほぼ同じピークを持っていることが

分かる。このことは表面付近で C_{60} が失う運動エネルギーによって表面の大きな照射痕が形成されていることを示している。

これらのことから考えられる C_{60} の衝突メカニズムを図 3.2.3 に示す。 C_{60} が基板に照射されると基板内部に進入し、その時失う運動エネルギーを水平方向に分配することによって表面に大きな衝突痕を形成する。しかし Ar クラスターと異なり C_{60} は小さく速度も速いため表面付近で全ての運動エネルギーを失わず、さらに基板の奥へ進入して深さ方向に異方性を持った損傷を形成していると考えられる。

4. まとめ

C_{60} イオンを用いて損傷数を調べた結果、モノマーイオンを 60 個照射するよりも損傷数が多く非線形効果を示すことが分かった。

Ar クラスターや C_{60} イオンの照射痕を観察しその損傷の形状や大きさを調べることにより、クラスターが照射された時の衝突メカニズムが明らかになった。このことから単一イオン照射痕の観察がクラスターイオン衝突のメカニズムの解明に有効であることが示された。

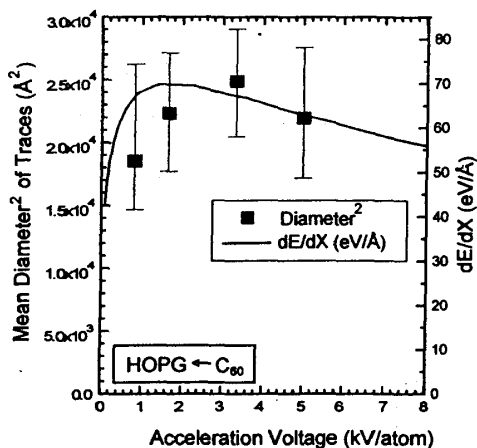


図3.2.2 照射痕直径の2乗の1原子当たり加速エネルギー依存性

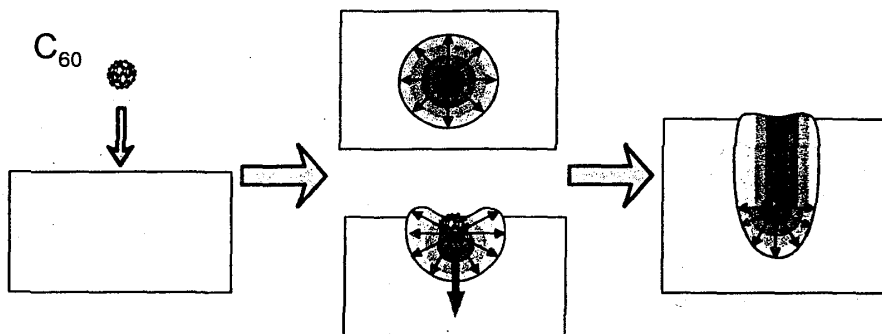


図3.2.3 C_{60} イオン衝突のメカニズムモデル