

第1章 序論

1.1 高エネルギーイオン照射による欠陥生成

本研究において研究対象としているのは、固体における高エネルギーイオン照射効果である。数十 MeV から数 GeV のエネルギー範囲の高エネルギーイオンが固体に照射されるとイオンが固体中を通る間に高密度電子励起、さらにそれに起因した原子変位を起こすことが知られている。原子変位により格子欠陥が生成される場合には、様々な測定手段により欠陥生成を反映した照射効果を観測することができる。本論文では高密度電子励起を介した固体内原子変位過程が主に焦点となる。

固体中に入射されたイオンは種々の機構によってターゲット固体にエネルギーを伝達し、その結果欠陥が生成されると考えるのが自然である。したがって、エネルギー伝達と照射欠陥との関係を考えることが欠陥生成過程を考える際の近道であろう。本研究で扱うエネルギー範囲での主なエネルギー伝達機構は、(1) ターゲット原子との弾性衝突によるエネルギー伝達、(2) ターゲット原子の電子を励起、イオン化することによるエネルギー伝達である。前者の機構で伝達されるエネルギーは核的阻止能(nuclear stopping power, S_n) で表現され、入射イオンが単位距離進む間に弾性衝突により入射イオンからターゲット原子に伝達されるエネルギーと定義される。後者の機構で伝達されるエネルギーは電子的阻止能(electronic stopping power, S_e)で表現され、入射イオンが単位距離進む間に入射イオンからターゲット中の電子に与えられるエネルギーと定義される。両者を使って全阻止能は以下のように核的阻止能と電子的阻止能の和の形に書くことができる。

$$\frac{dE}{dx} = S_n + S_e \quad (1.1)$$

ここで、 E は入射イオンからターゲットに伝達されるエネルギー、 x は入射イオンの軌道に沿った距離を表す。弾性衝突によるエネルギー伝達は、入射イオンとターゲット原子の最近接距離を表す衝突係数が小さい場合に起こりやすいのに対して、電子励起と電離によるエネルギー伝達は衝突係数が遮蔽定数の程度に大きい場合に起こりやすいので両方のエネルギー伝達過程は一応独立であると考えることができる。したがって、イオン照射による欠陥生成は、弾性衝突による欠陥生成と電子励起を介した欠陥生成の2つの独立な効果の足し合わせとして考えることができる。前者は、入射イオンから原子のほとんどの質量を占める原子核への直接的なエネルギー伝達に起因すると考えられ

るので、弾性衝突による欠陥生成過程は比較的単純である。それに対して後者は複雑で、入射イオンから電子系へのエネルギー伝達、さらにその一部が格子系に伝達される過程を考えなければならない。電子励起を介した欠陥生成過程を記述するために様々なモデルが提唱されており、サーマルスパイクモデル[1-4]やクーロン爆発モデル[5-11]等をその例として挙げることができるが、これまではっきりした結論は出ていない。

1.2 酸化物超伝導体における高エネルギーイオン照射効果

酸化物超伝導体は高エネルギーイオン照射による電子励起に敏感で、電子励起がイオンの軌跡に沿って連続的に起きることを反映して柱状欠陥と呼ばれる連続的な欠陥集合体が生成される。高エネルギーイオン照射した酸化物超伝導体において生成される柱状欠陥は磁束ピンニングセンターとして高い有効性を持つことが知られており、柱状欠陥と磁束との相互作用の研究が盛んに行われている[12-14]。このように柱状欠陥が磁束ピンニングセンターとして注目されているにもかかわらず、その研究の多くは磁束ピンニング自体に主眼が置かれ、柱状欠陥の数を変化させることができることを利用したものがほとんどである。その欠陥の形態や構造についての格子欠陥分野からのアプローチは少なく、また、照射欠陥を制御する指針とその欠陥生成過程について言及した放射線物理分野からアプローチは更に少ない。これらの分野からの柱状欠陥に対する理解が進めば照射欠陥のサイズや構造の制御が可能になり、それを基盤とした磁束ピンニング研究を進展させることが期待できる。

これまでの柱状欠陥に対する理解は以下のとおりである。高エネルギーイオン照射した酸化物超伝導体における柱状欠陥の欠陥構造については、局所的にアモルファス化した領域が電子顕微鏡によって観測されており、柱状欠陥はこのアモルファス領域のみで構成されていると考えられている[15-19]。しかしながら、このことは電子顕微鏡以外の測定手段により確かめる必要がある。また、電子励起を介した欠陥生成を支配する物理的パラメータは無条件に電子的阻止能だとされている[15,20-22]が、広いエネルギー範囲に渡ってそれが成り立つのかどうかを調べた系統的実験の報告はない。また、電子励起による欠陥生成の効果を評価する為には弾性衝突による欠陥生成の効果を定量的に評価する必要がある。なぜなら、イオンエネルギーが低くなると弾性衝突による欠陥生成の寄与が無視できなくなるからである。以上の理由で、高エネルギーイオン照射した酸化物超伝導体における欠陥生成過程・欠陥構造を調べるためには弾性衝突による欠陥生成の寄与を考慮しつつ広いエネルギー範囲にわたって精密な電子励起効果の測定を行う必要がある。

1.3 本研究の目的と本論文の構成

本研究の目的は、 ~ 1 MeV から数 GeV までの広いエネルギー範囲に渡って系統的に電子励起効果を測定することによって、電子励起を介した欠陥生成を決定する物理的パラメータが電子的阻止能であるか、あるいは別の物理的パラメータによって支配されているのかを詳細に調べ、照射欠陥自体とその欠陥生成過程をより深く理解することにある。またその理解を基に新しい視点での磁束ピンニング研究を行なうことである。

その目的のために、以下のような3つの互いに関連した研究を通して酸化物超伝導体における高エネルギーイオン照射効果を調べた。

- (a) イオン照射した酸化物超伝導体の格子定数測定による欠陥生成過程の研究
- (b) イオン照射した酸化物超伝導体の電気抵抗測定による欠陥生成過程の研究
- (c) イオン照射した酸化物超伝導体における柱状欠陥と磁束との相互作用の研究

(a)と(b)の研究を通じて、高エネルギーイオン照射した酸化物超伝導体において電子励起が欠陥を生成する過程を調べた。(b)ではさらに、電子励起により生成された欠陥の構造について考察した。(c)では、柱状欠陥と磁束との相互作用を調べるための低温照射・「その場」測定用クライオスタットを製作し、さらにその装置を使って近年注目を集めているスプレー照射効果について精密に調べた研究結果について報告する。