

[H30-4]

# 高速クラスターイオン照射で誘起される電子励起の理論的研究 Theoretical Study of Electron Excitation induced by Swift Cluster Ions

金子敏明<sup>#)</sup>

Toshiaki Kaneko

Department of Applied Physics, Okayama University of Science

## Abstract

As one of theoretical research on electron excitation processes of solid and gaseous targets induced by swift carbon cluster ions, we have performed on creation and destruction of a cluster in collision with rare gas target.

**Keyword:** cluster ion, production, destruction, ionization

## 1. はじめに

MeV 領域の高速クラスターイオンが固体薄膜を通過する際には、単一イオンでは見られない「クラスター効果」が報告されている。同じ速度の単一イオンに比べて、薄膜透過後の解離イオンの平均電荷の減少<sup>[1,2]</sup>、エネルギー付与の非線形性<sup>[1,3,4]</sup>、1 粒子あたりの生成二次電子収率の強い抑制<sup>[5-7]</sup>とコンボイ電子収量の強い増加<sup>[6]</sup>などが報告されている。最近では、C<sub>60</sub> などの多粒子系クラスターをもちいたエネルギー付与に関する研究<sup>[8]</sup>にも発展している。これは、いずれも複数粒子が同時に入射したことによる時空間相関のためである。今年度は、高速クラスターイオンと希ガスとの衝突過程に関する「断面積のクラスター効果」の考察を進展させると同時に、クラスター衝撃におけるコンボイ電子収量の非線形性の研究を進めた。

## 2. 理論モデルと結果

### 2.1 クラスターイオンの生成率に関する研究

タンデム加速器での正のクラスターイオンを高い効率で生成するには、荷電変換領域における気体との衝突で起きる荷電変換過程とクラスターの分解過程を考慮しなければならない。その上で、クラスターイオンを効率よく生成するには荷電変換気体の種類と圧力を最適化する必要がある。この問題に関する実験データは斎藤・鳴海グループで収集され検討されている<sup>[9]</sup>。われわれは、この問題を理論面から考えることで協力している。粒子数が少ないクラスターイオンでは、2 価イオンがほとんど存在しないという実験結果を考慮すると、レート方程式で-1 価から出発して+1 価になるクラスターイオン収率は、荷電状態に依存する 3 つの分解断面積と 3 つの電子損失断面積で記述できる。C<sub>60</sub> などの多粒子クラスターでは+2 価のイオンも観測されるため、+2 価も含めてイオン収率を決定するには、4 つの分解断面積と 6 つの電子損失断面積が必要になる。これらを用いれば、各荷電状態のイオン収率を解析的に求めることができる。これらの断面積を評価するには、衝突径

数の関数として炭素原子(またはイオン)の 1s, 2s, 2p 状態にある殻電子がクーロン場の連続状態に電離される確率をボルン近似で評価した。各原子あるいはイオンの電子状態はハートリー・フォック波動関数で得られている。ここでは、クラスターの電荷が+2 価以上になった場合を分解するものとみなした。クラスターの電荷は独立電子モデルで評価する。そこで、クラスターの配向を固定して、一回の希ガスとの衝突によって各粒子から電離する電子個数の確率を求め、それを配向平均すればクラスター全体に対する電子の電離断面積および分解断面積が求められる。その結果、C<sub>4</sub> までの少数クラスターに対して弱線形性のクラスター効果の存在が示された。また、C<sub>3</sub> では、線状構造と環状構造での違いが出現することがわかった。

### 2.2 コンボイ電子収量の強線形性に関する研究

クラスター衝撃におけるコンボイ電子収量の粒子数に関する強線形性は、実験データの報告<sup>[6]</sup>以来解決していない。この問題に対して、時間に依存する摂動論を駆使して定式化した結果、粒子数  $n$  に関する強線形性および単一イオン入射の電荷依存性を概ね説明することができることがわかった。今後はこれをより詳細に発展させたい。

## 参考文献

- [1] T. Kaneko, Phys. Rev. A 66, 052901 (2002).
- [2] A. Chiba et al., Phys. Rev. A 76, 063201(2007).
- [3] S. Tomita et al., Phys. Res. A 82, 044901 (2010).
- [4] T. Kaneko, Phys. Rev. A 86, 012901 (2012).
- [5] H. Kudo et al., Jpn. J. Appl. Phys. 45, L565 (2006).
- [6] S. Tomita et al., Phys. Rev. A 73, 060910(R) (2006).
- [7] T. Kaneko et al., J. Phys. Soc. Jpn. 75, 034717 (2006).
- [8] T. Kaneko, Bull. Okayama Univ. Sci., 53A, 1 (2017).
- [9] Y. Saitoh et al., private communication