

小特集

質量分析の中に見るプラズマ

Mass Spectrometry and Plasma Physics

1. はじめに

青木 順

大阪大学

(原稿受付：2019年4月9日)

最初の質量分析装置は、20世紀初頭に原子の質量を測定するために発明され、磁場中での荷電粒子の軌道の曲がり方が質量に依存することを利用したものであった。現在では、質量分析装置は基盤的な計測技術として様々な分野で用いられており、特に1980年代に数万の原子により構成されるタンパク質などの生体試料の測定が可能になったことで生物学分野での応用が急速に広まった。質量分析の測定対象である質量は基本的な物理量であるので、その測定原理にも物理的な性質が色濃く現れる。我々の日常生活で質量を測定する場合には通常は重力を利用して直接的に測定するが、質量分析が対象となる原子や分子は非常に小さく軽いため重力を測定することが難しい。そこで測定対象の試料をまずイオン化して荷電粒子とし、そこへ重力に比べて比較的強い力である電場や磁場を作用させて、質量の違いによる運動の振る舞いの違いを観測することで、間接的に質量を求める手法が用いられている。最初の質量分離は磁場を利用したものであったが、応用研究の発展とともに質量分析手法にも多くのタイプが発明されており、それぞれに用いられている基本的な測定原理は前述のように、イオンの運動の質量依存性を巧みに利用したものである。また、イオン化させる手法についても、測定対象の状態(気相・液相・固相)に応じて様々な手法が開発されている。先に述べた磁場を利用する質量分離方法では、均一磁場中でローレンツ力を受けている荷電粒子の回転半径の質量依存性を利用している。また磁場を用いた別の手法として、さらに強い磁場を用いてイオンサイクロトロン運動の周波数を測定する方法もあり、これはプラズマ分野でも馴染みの深いPenning Trapを用いている(4章, 5章参照)。また同じくプラズマ分野で馴染みの深いPaul Trapを用いた質量分析手法もあり、これはトラップに印加する電圧のDC成分とAC成分の強度によるイオンの閉じ込め安定

性の質量依存性を利用している。この他にも多くの質量分離手法があるが、イオン化して荷電粒子とし電場や磁場を作用させるのは共通である。

本小特集では、荷電粒子を扱う学問としての質量分析学とプラズマ物理学との共通点に着目することで、本学会誌では日頃あまり馴染みのない質量分析学について、プラズマの観点を取り入れた紹介をしていきたい。狭義のプラズマの定義では荷電粒子自体がプラズマであるが、ほとんどのプラズマ物理学的な現象は、多くの荷電粒子が集まった集団相互作用の中に現れる。通常質量分析では、扱っているイオンの密度はそれほど大きくはなく、集団相互作用の要因となる空間電荷効果の影響は無視できるほど小さいが、近年、限定的な状況で空間電荷が質量分離に影響を与える事例が報告されている。また、測定試料をイオン化する段階においては、大量のイオンが生成されプラズマ状態になっている場合もある。本小特集では、質量分析の中からプラズマに関係のある事象をピックアップして、なるべく系統立てて紹介していく。2章と3章ではプラズマ現象に関連のある2つのイオン化手法(大気圧イオン化、レーザー照射イオン化)について最新の研究成果を交えてそれぞれ紹介する。4章と5章では、イオン同士の自己電場による相互作用が質量の測定に影響を及ぼす事例として、フーリエ変換サイクロトロン共鳴質量分析(FT-ICR)で観測される周波数シフト現象について紹介する。この現象はPenning Trapに閉じ込めた非中性プラズマに見られる自己相互作用と全く類似のものであり、荷電粒子の多体系の現象として興味深いものである。この現象について、理論とシミュレーションの研究をそれぞれ紹介する。6章では、実際のプラズマ分野での質量分析の活用事例として、探査機に搭載した質量分析装置を用いた地球圏プラズマの研究について紹介する。