

# クラスターイオン生成装置の開発

日高 宏<sup>1</sup>、小島 隆夫<sup>2</sup>、中井 陽一<sup>2</sup>、渡部 直樹<sup>1</sup>、中鉢 健太<sup>3</sup>、藤田 和之<sup>3</sup>

1. 雪氷新領域部門・宇宙雪氷学グループ
2. 理化学研究所
3. 技術部装置開発室

## 1. 背景

大気化学において微粒子核生成の研究は、エアロゾルや雲生成過程において重要なテーマである。地球の大気はたえず宇宙線にさらされており、宇宙線は地球大気との衝突により電離を誘発し、多くのイオン（正、負どちらも）を生成している。イオンは電荷をもっているために、大気構成している分子を引き寄せ凝集することにより、ナノメートルサイズの微粒子核を生成する。このように、イオンがトリガーとなる微粒子核生成反応はイオン誘発核生成とよばれ、太陽活動と雲の発生量に相関関係があるとの観測結果の報告[1]から、この反応過程は大気中における微粒子核生成において非常に重要な役割を果たすと考えられている。イオン誘発核生成に関して、理論的にはギブスの自由エネルギー<sup>\*1</sup>を用いた熱力学的アプローチによる古典核生成理論[2]が提案されてから修正や拡張が行われてきたが、定量的な理解は得られていない。定量的な理解への妨げは、微粒子核が安定に成長する核のサイズ（臨界核）に至るまでの、結合分子数の比較的小さい（ $n < 10$ ）クラスターイオンの成長過程が十分理解されていないことにある。イオン誘発核生成に関する実験研究では、大気における電離状態をシミュレートし（電子衝撃や高エネルギーイオンによる電離）、生成された微粒子の数密度や粒径の化学組成依存性を調べるものがほとんどである。この種の実験では、大気組成ガス内でイオンを生成しているため、様々なイオン種によるクラスターイオン生成反応が同時に生じ、これらの複合的な結果を測定することになるため、反応経路の特定が困難であり、かつ核生成を考える上で重要なクラスターイオン生成過程における自由エネルギー変化をクラスターイオン種ごとに決定することも困難である。大気中におけるイオン誘発核生成を理解するためには、種類を特定した小さいサイズのクラスターイオンの成長過程を定量的に理解することが必要となる。

## 2. 目的

イオン誘発核生成反応による微粒子核生成を定量的に理解するために重要となる、イオン種を選別した小さいサイズのクラスターイオンの熱力学的物理量（ギブスの自由エネルギーの変化）の測定を目的とし、イオン生成領域とクラスターイオン生成領域を分離したクラスターイオン生成装置の開発を行った。

---

\*1 等温等圧下で仕事として取り出すことが可能なエネルギー量。

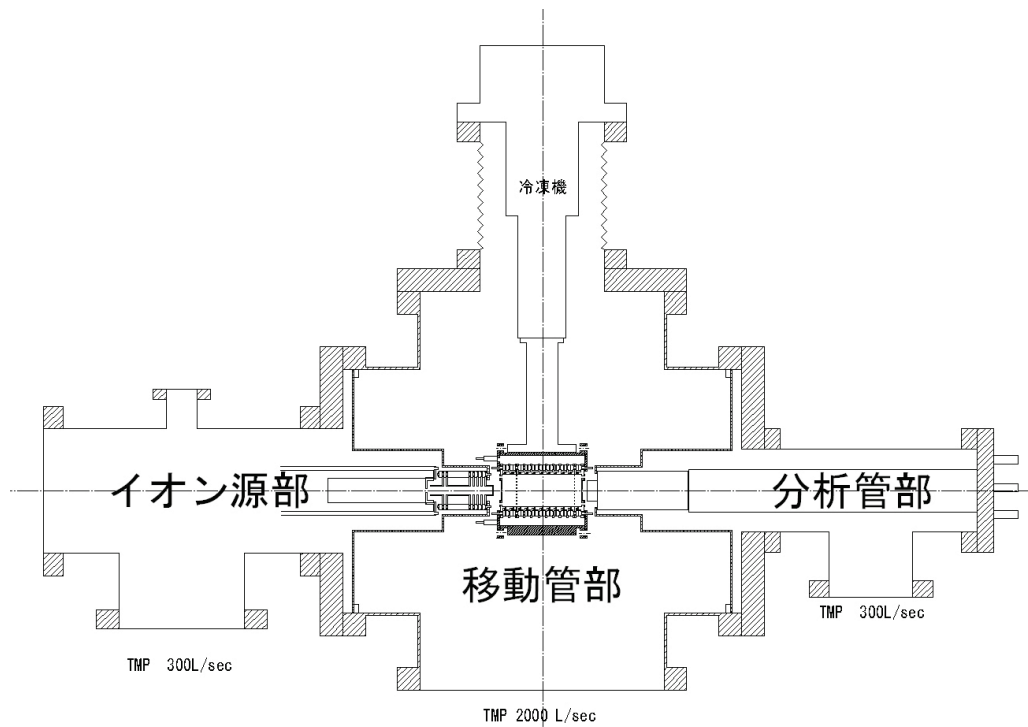


図1 実験装置の概略図。イオン源部、移動管部、分析管部の三つの部分で構成されている。移動管部は上部に取り付けられたヘリウム冷凍機により温度を変化させることができる。

### 3. 実験装置

図1に本研究で設計を行っている実験装置の概略図を示す。実験装置は、真空槽内でイオン源部、移動管部、分析管部の三つの領域に分けられている。イオン源部はイオン源と四重極質量分析器で構成されており、クラスターイオンの種となるイオンを生成・選別し、移動管部に入射させる役割を持つ。移動管部は、一様電場がかかけられている凝縮分子ガスで満たされた容器であり、この移動管内でイオンはガス分子と衝突し結合反応を生じることでクラスターイオンを形成する。クラスターイオンは電荷をもっているため、電場にひかれて移動管を通過し分析管部へ入射される。移動管での衝突結合はガス温度およびイオンの運動エネルギーの大きさ（衝突エネルギー）に依存するため、ガスの温度および電場の大きさを変化させ、様々な条件でクラスターイオンの生成を行う。分析管部は、大きな質量範囲まで測定が可能な四重極質量分析管で構成され、生成された様々なサイズのクラスターイオンを分離・検出する。様々な衝突エネルギーで生成したクラスターイオンのサイズ分布スペクトル測定から、各サイズでのギブスの自由エネルギー変化を決定する。

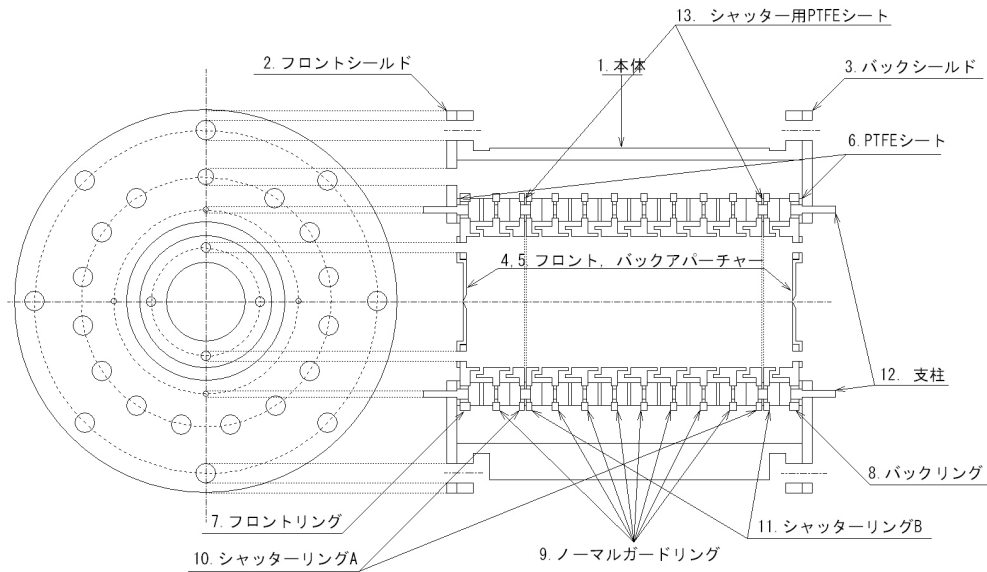


図 2 移動管の組み立て図。14 枚のリング電極により高精度の均一電場を作る。

実験装置の開発状況は、移動管部の設計が終了し技術部装置開発室の中鉢・藤田氏に製作して頂いたところである。よって、本稿では移動管部のみ詳しく紹介する。図 2、3 に、移動管の組み立て図および実際に製作された移動管を示す。移動管は、無酸素銅で作られた円筒形の容器内に、14 枚のリング状電極を配置した構造になっている（図 2）。このリング電極は互いに絶縁されており、それぞれに別々の電位を印加することができるようになっている。実験では、移動管の中心軸上に一様電場が形成されるように適当な電位をそれぞれ印加する。移動管外部からリング電極へ電圧を印加するため、移動管際前面のフロントシールドに 14 個のターミナルを溶接した。すべてのリング電極は、フロントシールドから延びた支柱に重ねていく構造にしているため、リング一つ一つの工作精度は非常に高いものが要求されたが、納品された移動管は設計どおりに組みあがっていることが確認された。

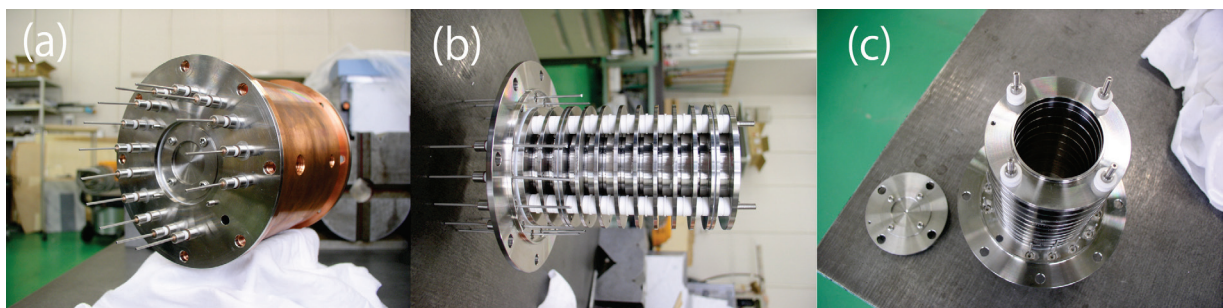


図 3 作成した移動管。(a)外観、(b)移動管内部側面、(c)移動管電極内部。

#### 4. まとめ

イオン誘発核生成反応による微粒子核生成を定量的に理解するために、クラスターイオン生成装置の開発を始めた。本稿では完成している移動管部を紹介したが、現在、イオン軌道計算を行いながら、イオン源部のイオン輸送用レンズ電極、および、分析管部のクラスターイオン輸送用のレンズ電極を設計している。設計終了後には、順次、技術部装置開発室にて製作し、装置の完成を目指したい。

#### 参考文献

1. Svensmark, H. and Friis-Christensen, E., 1997. Variation of Cosmic Ray Flux and Global Cloud Coverage – A Missing Link in Solar-Climate Relationships. *J. Atm. Soc. Terr. Phys.* **59**, 1225–1232.
2. Thomson, J. J., *Conduction of Electricity through Gases*. (Cambridge University Press, London, 1906)