

## ダスト(微粒子)を分析する ～ミクロン・ナノメータの微細な世界～

芦川直子・古閑一憲

核融合におけるダスト(微粒子)とは、核融合プラズマ装置の真空容器内部に設置された材料(構造材と対向壁)やコーティング膜等の一部が損耗することによって生じた微細な物質で、かつ材料の表面から完全に剥離した浮遊物質のことを指します。

古くから核融合分野においてプラズマ壁相互作用(プラズマが直接もしくは間接的に材料と触れることにより材料が影響を受けること)の分野では、材料の損耗、その輸送、および再堆積に関する研究が行われており、ダストに関する研究もその一部として行われてきました。現在建設中である大型トカマク装置、国際熱核融合実験炉(ITER)では、サイト内におけるトリチウム許容量から真空容器内におけるトリチウム蓄積量が約1kg以下に制限されます。ダストはトリチウムを吸着することがあることから、このダストに関する研究が特に注目されるようになりました。そこで、大型ヘリカル装置(LHD)を含む世界中の多くの装置においてダストの性質やふるまいに関する研究が行われるようになりました。

LHDでは、プラズマ実験終了後の真空容器内において、メンブレンフィルター(注:レジ袋のようなタイプのビニールですが、拡大してみると図1に示すように小さな穴が開いています)をプラスチック容器の中に入れ、その背面を真空ポンプで排気し、その勢いで真空容器内に堆積していたダストをフィルター上に付着させる手法を使ってダストを採取しています。その様子を図1に示します。

LHDでは、大きく分けて2種類のダストが見つかっています。一つは炭素で球状のことが多く、大きさは主に1 $\mu\text{m}$ (1ミクロン=1000分の1ミリメートル)以下です。もう一つはステン

レスに起因する鉄で、1ミクロン以上の大きさを持ちかつギザギザした形状です。炭素およびステンレスという材質はいずれも炭素はダイバータ板として、ステンレスは第一壁として真空容器内で用いられていることに起因しています。このようなミクロンオーダーの粒子は顕微鏡によって観察しています。通常良く用いられるものは走査型電子顕微鏡(SEM)と呼ばれており、0.1ミクロン(1万分の1ミリメートル)程度までの観測が可能です。LHDではさらに微細なダストを観測するために透過型電子顕微鏡(TEM)による観察が行われ、2つを併用することでこれまでに1nm(1ナノメートル=100万分の1ミリメートル)から10ミクロンに至るまでの広

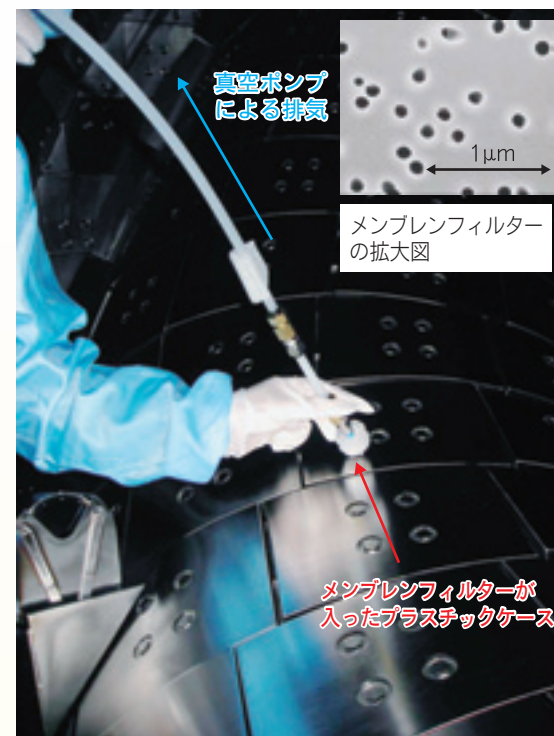


図1 プラズマ実験期間が終了した後に真空容器の中でダストを捕集の様子。(右上)メンブレンフィルターの拡大図。

いサイズ分布について明らかにしています。実際にLHDで採取されたダストの例として、SEMによって観測された直径約0.5ミクロンの炭素ダスト像、およびTEMによって観測された凝集した炭素ダストの像を図2に示します。このような粒子を見た多くの人は、どのようにして形成されたのかという質問を投げかけます。しかしながら実際に見つかったダストがどのように真空容器の中で成長するのかを直接測定することは大変難しい状況です。そのため、パラメータ制御が可能な小型装置による実験で得られた結果との比較が重要になります。例えば、図2にあるLHD内で成長したと考えられている凝集したダスト像は大変興味深く、個々の小さなダストの大きさが約10ナノメートル程度にそろっているという特徴があります。九州大学における実験では、このサイズのダストには電気的に中性なものが多く、このようなダスト粒子の集合に高エネルギー電子が入射されると、中性ダストの一部は電離により正に帯電し、負に帯電したダストとの間の静電力によって正と負のダストが凝集することが知られています。

最近の新たなダストの捕集方法として、シリカ(SiO<sub>2</sub>)エアロゲルというポーラス構造(多孔質構造)で低密度の物質を利用した方法があります。これは宇宙プラズマ中に漂うダスト捕獲に用いられていた手法を核融合プラズマに転用したものです。先に紹介したダスト捕集とは異なり、プラズマ放電中にその近くへエアロゲルを設置し、飛来するダストを捕獲するために用いています。特に、そのダストがエアロゲルの

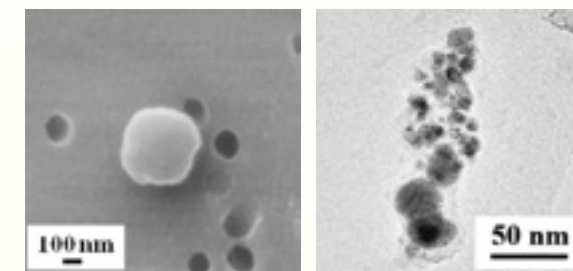


図2 (左)SEMによって観測された炭素ダスト。(右)TEMで観測された炭素ダスト。小さい球状の炭素ダストが凝集し全体として約200nmの大きさになっています。

中へ陥没する形で捕獲されると、その状態を保ったまま真空状態から大気圧状態へ取り出すことができます。それにより、実際にダストがプラズマ対向壁に向かって飛来した状況をより正確に知ることができます。その一例として、デジタル光学顕微鏡で観測した例を図3に示します。顕微鏡の焦点を合わせる際にダストの表面および周辺のエアロゲルの表面に気をつけながら操作を行います。このダストではエアロゲルとダストの表面、両方に焦点が合っているため同じレベルの表面であることがわかります。つまり長さ約20ミクロンのダストがエアロゲル中に捕獲されていることがわかります。この手法を用いることで、プラズマがどのような状況においてダストが発生しやすいのか、を切り分けて実験することが容易になりました。

最近のダスト研究の目的は、先に述べたトリチウム蓄積評価だけではなく、対向材料の損耗および炉内機器の健全性という観点まで含むように移行しつつあると考えています。対向壁に使用されている材料は限られていますが、全く同じ組み合わせの装置は数少ないため、世界中の装置で得られた結果を比較・検討することで、これらの問題の解決につなげたいと考えています。LHDも、中国、ヨーロッパ、アメリカとの共同研究および、国内共同研究を基にデータ提供に寄与しています。

芦川直子:核融合システム研究系 助教  
古閑一憲:九州大学大学院  
システム情報科学研究院 准教授

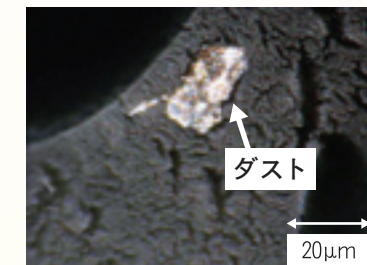


図3 デジタルマイクロスコープで観測された、エアロゲルへ捕捉されたダスト像。ダスト周辺の白く細かな模様がある領域がエアロゲルです。