

International Training Program ドイツ ルール大学ボッフム校 派遣報告

名古屋大学工学研究科電子情報システム専攻 阿部祐介

International Training Program (ITP)長期派遣にて、平成 22 年 10 月 1 日から 11 月 29 日までの二ヶ月間、ドイツ、ルール大学ボッフム校に派遣され、Uwe Czarnetzki 教授の研究室で研究活動に従事させていただいたので、ここに報告します。

ボッフムとルール大学について

ボッフムは、ドイツ、ノルトライン＝ヴェストファーレン州(Land Nordrhein-Westfalen)に属する、人口約 40 万人の都市である。ライン川の東方に位置し、ルール工業地帯の工業都市のひとつである。19 世紀には、炭坑の街として発展したが、1970 年代までに全ての炭坑は閉鎖された。その後、自動車工業や金融業の誘致、大学の新設による再興が図られた。閉鎖された炭坑は博物館として利用されているものがあり、当時の様子を知ることができる。

ルール大学ボッフム (Ruhr-Universität Bochum) はボッフムにある州立大学である。1962 年、西ドイツで第二次世界大戦のあと最初に発足した大学である。街の中心であるボッフム中央駅から地下鉄で 10 分程南下したところに位置している。20 の学部を抱える総合大学であり、学生数は約 3 万 4 千人、教職員数は約 5000 人である。大学の周りは自然にあふれて、とても閑静であり、勉学、研究に専念できる環境である。一方で街の中心部にも地下鉄で簡単にアクセスできるため、とりわけ不便というわけではない。また、大学に隣接して Uni-Center というショッピングセンターがあるために大学付近でも生活しやすい。今回は大学から徒歩 15 分程度のアパートを用意していただき、2 ヶ月間滞在していたが、大学からの帰りに Uni-Center で買い物をすることができるため、特に不自由することはなかった。

派遣先研究室について

私が派遣された Uwe Czarnetzki 教授の研究室は、物理学専攻でプラズマの基礎研究を行っており、Center for Plasma Science and Technology (CPST) に属している。この研究室では発光分光法、レーザー誘起蛍光法、吸収分光法、トムソン散乱計測など、主に光学的手法を用いたプラズマ診断を行っている。今回、私はこの研究室で、電氣的非対



図 1 ドイツ炭鉱博物館



図 2 ルール大学構内

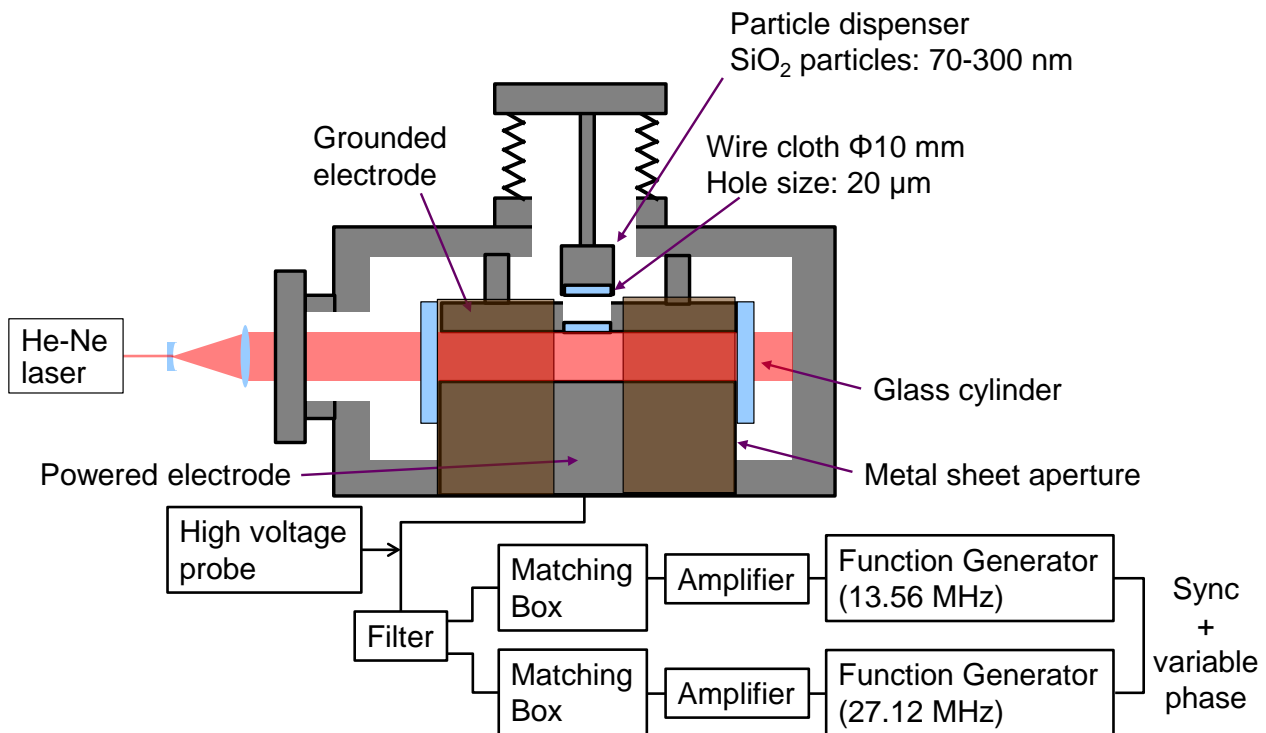


図3 実験装置

称効果を用いたプラズマ中の微粒子輸送とレーザー散乱による微粒子の計測を行ってきた。

研究内容について

近年、ナノサイズの微粒子を含有した薄膜が、従来の材料とは異なる新たな特性を示すことから、発光素子、太陽電池光吸収層、センサー等への応用が期待されている[1,2,3]。微粒子生成方法の一つとしてプラズマ化学気相堆積法が挙げられる。プラズマ気相中には、微粒子、ラジカル、イオンが存在する。基板に到達し、堆積する微粒子のサイズや、微粒子とラジカルの比によって、薄膜の特性が決定づけられる。そこで、プラズマ中の微粒子輸送を制御することが、膜特性の制御や高速成膜の実現に必要不可欠である。

Uwe Czarnetzki 教授の研究グループから、自己バイアスを制御する方法として、電気的非対称効果に基づいた方法が提案された[4]。この方法は二周波励起容量結合型プラズマにおいて、基本波と二倍波の位相差を変化させることで、イオンフラックスは変化させず自己バイアスを変化させる方法である。本研究では電気的非対称効果の応用として、微粒子輸送に着目した。プラズマ中の

微粒子は、イオンドラッグ力、静電気力、クーロン力、熱泳動力、ガス流による粘性力、重力などの様々な力を受ける。微粒子生成プラズマにおいて、放電電圧を振幅変調することで陽極付近のプラズマシースに境界に滞在している微粒子が、陰極へと高速で移動することが報告されている[5]。電気的非対称効果により微粒子が受ける静電気力を制御することで、同様に微粒子輸送の制御が可能であり、より詳細な輸送制御が可能であると考えられる。そこで、電気的非対称効果による微粒子輸送制御を確立することが本研究の目的である。

図3に実験装置の概略図を示す。2つのファンクションジェネレーターを用いて、13.56 MHzと27.12 MHzの波形を発生させた。二つの波形は同期されており、その位相差を変化させることができる。それぞれの波形は増幅器により増幅され、整合器により整合された後に、フィルターを通じて、チャンバーの下部電極に印加される。電極間隔は3 cmとした。プラズマを幾何学的対照放電とするために、プラズマはガラスの筒を用いて、周囲の設置されたチャンバー壁から遮蔽されている。電気的非対称効果が微粒子プラズマでも使用できること、それにより微粒子を輸送することができ

ることを確認するために Ar プラズマ中に SiO_2 の微粒子を導入し、実験を行った。微粒子は上部接地電極の上部に設けられたディスペンサーからメッシュを通過し、プラズマ内に導入される。プラズマ中の微粒子の動きを観察するために He-Ne レーザーを用いたレーザー散乱計測を行った。レーザーをシリンダリカルレンズによってシート状にし電極間に照射し、パーティクルで散乱された光を ICCD カメラを用いて計測した。ICCD カメラの前部にフィルターを設置することでプラズマの発光を取り除いた。実験条件は印加電圧 75 V、Ar ガス圧力 1 Pa、微粒子サイズ分布 70-300 nm とした。

初めに、微粒子計測を行うための光学系を構築した。シートレーザーの高さが電極間隔である 3 cm となるように光軸調整を行った。構築後、プラズマ中に導入された微粒子の計測を試みたが、散乱光を観測することができなかった。プラズマ中に微粒子が少量しか導入できていなかったことが原因だと考えられたので、メッシュの穴のサイズの最適化を行ったところ、電力印加電極付近に滞在する微粒子からの散乱光を観測することができた。

次に、微粒子が存在するプラズマにおいて電気的非対称効果による自己バイアスの制御が可能で

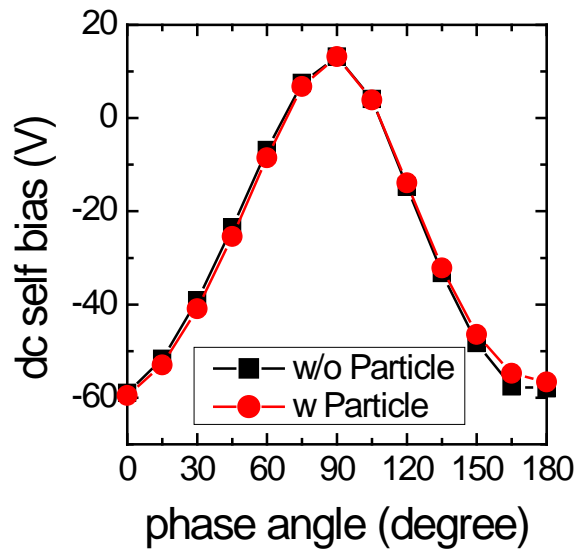


図 4 自己バイアス位相差依存性

あるか確認を行った。図 4 に自己バイアスの位相差依存性を示す。自己バイアスは図 3 に示すように高電圧プローブを用いて測定した。プラズマ中に微粒子が存在している場合も、存在していない場合も位相差を 0 から 90 度まで変化させることで、自己バイアスが -59 から 13.2 V まで変化した。この結果より微粒子プラズマにおいても電気的非

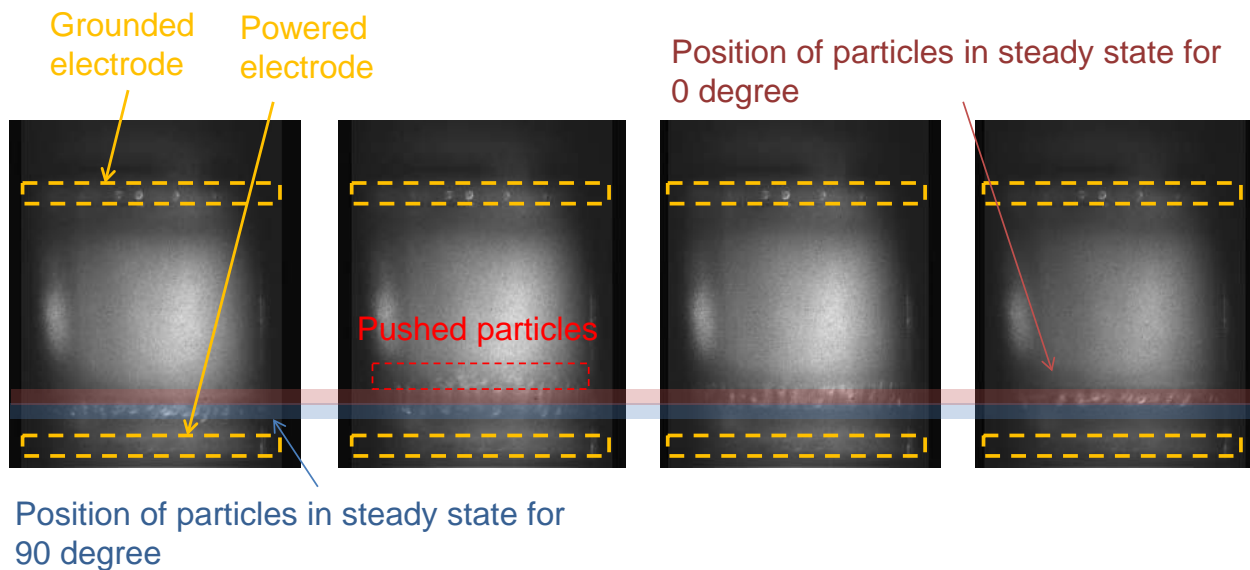


図 5 レーザー散乱光二次元画像

対称効果による自己バイアス制御が可能であることが示された。

続いて、位相差を 90 から 0 度に変化させると、微粒子がどのように移動するかを計測した。図 5 に位相差を変化させたときのレーザー散乱光の二次元画像の時間変化を示す。今回は、ファンクションジェネレーターと ICCD カメラを同期することができなかつたため、正確なタイミングを把握することができなかつたが、位相差が 90 度の定常状態に滞在している微粒子が、位相を変化させた瞬間に上部電極に押し上げられ、位相差が 0 度の定常状態に滞在するという変化が観測された。しかし、報告されているように接地電極側にまで微粒子が到達することは確認できなかつた。今回の実験では、導入していた微粒子のサイズ(70 から 300 nm)よりも、大きなサイズ(μm オーダー)の微粒子しか観測されなかつた。これは微粒子が凝集してしまったことが一つの原因だと考えられる。反応性プラズマではナノサイズの微粒子の制御を目的としているため、凝集しないように微粒子を導入できるようにする必要がある。さらに使用できたレーザーの出力が 15 mW と低いことも、小さい微粒子が計測できなかつた原因だと考えられる。また、今回使用したファンクションジェネレーターと ICCD カメラは同期することができなかつたため、同期をするためのプログラムを作成する必要がある。今後、これらの改良を行い、詳細な微粒子輸送制御、計測を行う予定である。また、その結果を基に反応性プラズマ中で微粒子作成、その輸送制御を行っていく予定である。

以上のように、今回の派遣は研究を始めとして、教員、学生との交流、海外での生活などを通して、日本での研究の発展、日独の文化の理解を深めるよいきっかけとなり、私にとってとても貴重な二ヶ月間になったと思います。

最後に、このような素晴らしい機会を与えて下さった Czarnetzki 教授、堀勝教授、関根誠教授、豊田浩孝教授、諸先生方、名古屋大学工学研究センター ITP 事務局、この度の ITP 長期派遣プログラムに携わって頂いた全ての方々に心より感謝申し上げます。

参考文献

- [1] Mangolini L, Thimsen E, and Kortshagen U 2005 Nano Lett. **5** 655.
- [2] Solanki C S, Bilyalov R R, Poortmans J, Beaucame G, Van Nieuwenhuysen K, Nijs J and Mertens R 2004 Thin Solid Films **451** 649
- [3] Barillaro G, Diligenti A, Marola G and Strambini L M 2005 Sensors Actuators B-Chem. **105** 278
- [4] Schulze J, Schüngel, and Czarnetzki U 2009 J. Phys. D: Appl. Phys. **42** 092005
- [5] Koga K, Iwashita S, and Shiratani M, 2007 J. Phys. D: Appl. Phys. **40** 2267