（ 様式D－２ ）
（ 別　　紙 ）

令和７年度　海外派遣研究員研究報告書〔研究実績〕

令和　7年　9月　11日

日本大学理事長　　殿
日 本 大 学 学 長　　殿

所　　属　　理工学部　（理工学研究所）
資格・氏名　　教授　・　芦澤　好人

令和７年度海外派遣研究員（　短期Ｂ　）の研究実績を，下記のとおり報告いたします。

記

１　区　　分　　短期Ｂ

２　研 究 課 題

機能性誘電薄膜の作製及び評価手法に関する研究

３　派 遣 期 間　　西暦 2025 年 8 月 4 日　～　2025 年 8 月 31 日

４　派　遣　先　　○ドイツ，フランス

５　研 究 目 的

金属と誘電体との界面を伝播可能な電子の粗密波である表面プラズモンは，光によって励起することが可能であり，その励起条件を用いることで誘電率変化によるバイオセンサ等に応用されている。表面プラズモンの励起条件が界面材料の誘電率変化に大きく依存するため，界面材料の誘電率を外場で変化して表面プラズモンの励起条件を制御することが，表面プラズモンを用いた能動素子を作製する観点から期待される。外部磁界を用いる手法として，磁性体を用いる磁気表面プラズモン効果が注目され，磁性体の磁気光学特性とプラズモン励起材料の励起特性との最適化が検討されてきた。

一方，磁性体による外部磁界ではなく，エレクトレットによる外部電界を用いる方法が考えられるが，その検討は全く十分でない。当研究室では，±2 kV 程度の電位を 10 μm 程度の高い空間分解能で計測可能かつ独創的な静電気力顕微鏡を開発してきており，エレクトレットの表面電位の微小領域を計測可能な状況にある。そのため，測定対象物であるエレクトレット材料及びそのエレクトレット化手法，評価方法に関する直接的経験・知見を得て研究を推進することが極めて重要な状況にある。そこで本研究では，mm 以下の電位分布パターンを用いて表面プラズモン励起特性を変調するために，高い表面電位を有するエレクトレットの作製，荷電手法，電荷分布計測手法等の知見を得ることを目的とする。

（ 様式D-２ ）

6　研 究 概 要

① 研究の方法

およそ１ヵ月の海外派遣期間であるため，期間内の研究完結を目指すのではなく，「帰国後に日本で研究を継続実施できる状況にすること」，「議論を通じて研究推進に重要な知見を得ること」，「訪問先との共同研究体制を構築すること」を中心に研究を行う。海外派遣期間中には，新規エレクトレット材料探査指針を議論した上で，誘電体薄膜の作製，エレクトレット化手法及び評価方法に関する実験を実施する。

② 渡航先での活動内容

アシャッフェンブルク応用科学大学において，当研究室で開発している静電気力顕微鏡についての研究紹介を行い，大変興味を持ってもらった。Christiane Thielemann 教授及び Dennis Flachs 博士が携わってきたサステナブルな生分解性バイオマスプラスチックであるポリ乳酸（Poly Lactic Acid：PLA）を用いた薄膜の作製手法及びコロナ荷電によるエレクトレット化手法，さらにエレクトレットを用いたデバイス作製手法について説明を受け，共同研究可能なテーマを創出して実験を行った。その後，ダルムシュタット工科大学，フライブルク大学，ストラスブール大学を訪問した。トロワ工科大学において，Christophe Couteau 教授及び Rafael Salas-Montiel 博士が計測に成功しているプラズモンアンテナのエッジ部に集中する近接場を光誘起力顕微鏡（Photo-induced Force Microscopy: PiFM）によって観察する手法について説明を受け，当研究室で開発している静電気力顕微鏡と関連する共同研究可能なテーマを議論した。パリ市立工業物理化学高等専門大学において，Stéphane Holé 教授が行っている薄膜内電荷分布計測手法について説明を受け，静電気力顕微鏡における電荷分布計測について議論を行った。

7　研究結果・成果

アシャッフェンブルク応用科学大学（写真１）において，Dennis Flacks 博士と共に，PLA を材料として用いたエレクトレット材料の微細エレクトレット構造形成手法について検討を行った。作製後の試料は今後，本学の静電気力顕微鏡を用いて電位分布の計測を行い，共同研究へと発展する計画である。

まず，従来の手法にて PLA 薄膜の作製を実施した。PLA 顆粒をクロロホルム溶液中で攪拌し溶解させた後，スピンコート法によって薄膜化した。ガラス及び Si を基板とし，その上に剥離剤としてポリビニルアルコール（PVA）をスピンコート法で成膜後，PLA を成膜した。成膜した薄膜は熱処理炉において



写真１アシャッフェンブルク応用科学大学

〔７　研究結果・成果（つづき）〕

200℃で 5 時間加熱して硬化させた。その後，純水に浸漬させることにより，PVA 層を溶解させて PLA 単層薄膜を得た。その後，作製した PLA 薄膜を専用のホルダに固定してコロナ荷電を行い，PLA 薄膜のエレクトレット化を実施した。コロナ荷電用の針電極には-8 kV，グリッド電極には-1 kV の電圧を印加した。荷電後，一般的な mm オーダーの空間分解能を有する表面電位プローブを用いて表面電位を観測した。表面電位は - 700 V 程度で，グリッド電極電圧の 7 割程度にとどまった。PLA 薄膜は生分解性プラスチックであり，サステナブル材料としてのメリットはあるが，フッ化物系材料に比較して得られる表面電位が低く，湿度による電位降下が大きい点が課題である。

共同研究への発展を念頭に，エレクトレットを用いたデバイス作製手法について検討を行った。一般にエレクトレットの研究においては，薄膜形態で用いることが大半であるが，Dennis Flacks 博士が用いているエレクトロスピニング技術や３D プリンティング技術を発展させることにした。

まず，エレクトロスピニング法によるナノファイバ型エレクトレット構造物の作製を行った。通常は固定しているファイバ材料の吐出口を X-Y ステージ上に取り付け，ステージを操作しながら高電圧印加によるファイバからの材料吐出を行うことで，所望の形状のファイバシート型エレクトレットの形成を試みた。ファイバ径は 10 μm 程度で十分に細線化はできていないが，ファイバシートの形状を制御できる可能性が確認された。

続いて，３次元構造物を検討するために，３D プリンタを用いる方法を検討した。これまでは，エレクトレットを用いた振動発電用デバイスを３D プリンタで作製し，発電用エレクトレット部分にはコロナ荷電でエレクトレット化した PLA を用いていた。この場合には，荷電する PLA エレクトレットの形態は薄膜形状に限定されるため，自由に 3 次元構造を形成できる３D プリンタの機能を最大限に活用できているとは言えない。そこで，３D プリンタ印刷時に空間的にエレクトレットを配置可能にするために，３D プリンタのノズルに高電圧を印加する機構の構築とエレクトレット特性の評価を検討した。この技術では，mm 以下の電位分布パターンのエレクトレット形成が可能であり，当研究室の静電気力顕微鏡による電位分布評価が可能である。

最大の問題点は，10ｋV の高電圧をノズルに印加する時の絶縁耐性・電気的短絡防止であった。安全性の確保が当然必要であるが，一度でも放電が発生するとシステム自体を破壊してしまう恐れがあるため，実施に対して安全面や具体的な方法・可能性について時間をかけて議論を行った。その後，部材の入手やその加工に時間を要したものの，滞在期間内にノズルに 10ｋV の高電圧を印加して３D プリンタの動作に成功した。３D プリンタの印刷については，高電圧印加用に追加でノズルに設置した治具の温度制御までが十分にはできておらず，一度軟化して押し出された材料が，ノズル先端の治具で再度冷え固まることが問題となった。簡易的なヒータで治具を加熱し

〔７　研究結果・成果（つづき）〕

ながら実施した場合に,印刷できそうな状況までは確認できた。滞在期間中には達成できていないが，概ね実施できそうな状況が確認でき，継続検討することにした。



写真２　トロワ工科大学

トロワ工科大学(写真２)においては，現在トロワ工科大学のグループが行っている PiFM を用いて,光誘起力を観察する手法について説明を受けた後，Rafael Salas-Montiel 博士と共に,当研究室の静電気力顕微鏡において同光誘起力を観測する手法について,議論を交わした。

トロワ工科大学では，PiFM に波長 5～13 μm の赤外光を用いており，市販の原子間力顕微鏡をベースとする高い空間分解能のプローブ顕微鏡に光誘起力観察用の探針を用いて計測を行っている。試料には，波長 8 μm の光で共振する棒状アンテナを用いて,アンテナ端部に発生する近接場による光誘起力を観測している。当研究室で観測するための方針として,2 つのプラズモンアンテナによるギャッププラズモンを利用することで高い強度の近接場光を実現すること，プラズモンアンテナをアレイ状に作製して,アンテナ群による平均的な光誘起力を観測すること,そのために観測しやすいアレイ構造とすること，波長は一波長に固定して設計すること等を方針とした。当研究室において平均的な光誘起力を観測後,同試料をトロワ工科大学に送付し,個々のギャップアンテナにおける光誘起力を PiFM によって観察することにしている。また,当研究室において光誘起力を観測できない場合に,その原因がプラズモンの励起やその強度の問題なのか，静電気力顕微鏡の観測系の問題なのかを切り分けるために，互いの試料を送付して測定を行うことで研究を推進できるようにした。

また，これまで当研究室で開発してきた±2 kV 程度の電位を 10 μm 程度の高い空間分解能で計測可能かつ独創的な静電気力顕微鏡についてのプレゼンテーションを行ったところ,どの研究者も非常に興味を持ってくれた。当研究室の静電気力顕微鏡が一部の狭い業界でしか認知されていなかったことが明確になり，従来と異なる分野においては極めて大きなニーズがあることと，多くの国際共同研究の可能性があることを強く実感できたことは，非常に大きな収穫であった。

以　　上

今回の海外派遣研究の機会により,国内では成し得ない成果を得ることができ,さらに今後の研究の大きな指針を得ることができました。日本大学及び実施に関してご協力いただきました全ての皆様に深く感謝申し上げます。