

# 先端国際共同研究推進事業

2023 年度採択

次世代のための ASPIRE

マテリアル分野

2023 年～2024 年度

年次報告書（公開版）

研究課題名	レーザー微細加工と炭素材料の融合による 3 次元 テラヘルツメタマテリアルの創生
日本側研究代表者	小西 邦昭 東京大学 准教授
相手側研究代表者	Yuri Svirko, Professor, University of Eastern Finland
研究期間	2024 年 2 月 1 日～2027 年 3 月 31 日

## 1. 研究成果の概要

### ① 研究構想にかかる成果

#### <実施したこと>

2023～2024 年度は、一番目の研究テーマである“広帯域完全吸収テラヘルツメタマテリアルの開発”について、最初のマイルストーンである、広帯域完全吸収テラヘルツメタマテリアル試料の作製を達成することを目標として研究を進めた。まず、東フィンランド大学の Yuri Svirko 教授から、熱分解カーボンの誘電率スペクトルに関する数値データを提供していただき、東京大学で数値シミュレーションを行うことによって、シリコンモスアイ構造と熱分解カーボン材料を融合した構造の吸収スペクトルを計算した。その結果、適切な熱分解カーボン膜厚にすることによって、0.5～5THz の広いテラヘルツ周波数領域においてほぼ 100%に近い完全吸収が実現することを明らかにした。続いて、日本チームの有するモスアイ構造の超短パルスレーザー加工技術を用いて、シリコンを材料として、シミュレーションで明らかにしたモスアイ無反射構造を作製した。作製したモスアイ構造を、東フィンランド大学の Svirko 教授のグループに持参し、その表面への CVD 熱分解カーボンコートを行った。電子顕微鏡観察などを用いて、レーザー加工シリコンモスアイ構造への最適コーティング条件を明らかにし、設計した膜厚での熱分解カーボン膜を生成することに成功した。

さらに、フィンランドチームにおいて、作製したサンプルの透過率測定および反射率測定を行うことにより、作製した熱分解カーボンコートシリコンモスアイ構造において、ほぼシミュレーション結果と一致する 0.5～5THz の領域での完全吸収を示すスペクトルを計測することに成功し、テラヘルツ広帯域完全吸収体の実現できていることを明らかにした。

#### <得られた成果>

ASPIRE プロジェクトの開始によって、キーとなる熱カーボン材料の誘電率スペクトルの情報を東フィンランド大学から極めてスムーズに入手できたことにより、申請段階ではコンセプトにとどまっていた熱分解カーボンとモスアイ無反射構造の融合による広帯域完全吸収体メタマテリアルが実現可能であることを数値シミュレーションによって実証できた。

さらに、実際に本研究のためのシリコンモスアイ構造を、東京大学のフェムト秒レーザー加工システムを用いて実際に作製し、東フィンランド大学で熱分解カーボンコートを行って、膜厚を狙い通りに制御しつつ、複雑な形状を有するモスアイ構造の表面にくまなくカーボンコートが行えることを実証できた。また、予定を前倒して、作製した熱分解カーボンコートシリコンモスアイ構造のスペクトル計測を行えたのみならず、0.5THz～200THz という、テラヘルツ領域から近赤外領域までに及ぶ広帯域な完全吸収スペクトルを有していることを実験的に明らかにできた。

### ② 国際頭脳循環の促進にかかる成果

#### <実施したこと>

まず、本プロジェクトの開始にあたって 2024 年 3 月に、今後の研究及び研究交流を円滑に行うことを目的として、研究代表者ら 4 名が、相手国研究代表者である Svirko 教授とともに、フィンランド、英国、ギリシャの相手国チームを訪問し、各チームとの議論と見学を行った。

6 月 9 日～6 月 28 日の間、大学院生が東フィンランド大学に滞在し、東京大学で作製したシリコンモスアイ構造に対する CVD 熱カーボンコートを実際に行い、サンプルを作製することに成功した。

7 月に、ギリシャチームの助教授と大学院生が東京大学に 1 か月間滞在し、メタサーフェスに関するセミナーを行っていただくとともに、テラヘルツカイラルメタマテリアルの新構造について議論を行った。また、ギリシャチームの別の研究員 2 名も 7 月 20 日～8 月 2 日の間、東京大学に滞在し、セミナーを行って頂くとともに、レーザー

造形の 3D プリンティング材料の屈折率評価に関する共同実験を行った。

8 月にフィンランドで開催される、相手国研究代表者である Svirko 教授が主催するナノカーボン材料に関する国際ワークショップ NPO2024 (Nanocarbon Photonics and Optoelectronics) に日本側チームのメンバーが 7 名で参加し、口頭およびポスターでの研究発表を行った。

また、9 月 1 日～11 月 30 日の 3 か月間、東京大学の大学院生が、サウサンプトン大学の Peter Kazansky 教授の研究室に滞在し、来年度に行う研究テーマ 2 の予備実験として、フェムト秒レーザー加工を用いた誘電体内部加工による偏光制御素子開発に関する研究を行った。

相手国代表者である東フィンランド大学の Yuri Svirko 教授を 5 月 10 日～5 月 24 日および 10 月 11 日～11 月 5 日の間、東京大学に招へいして共同研究を進めた。前半の滞在時には、熱分解カーボンコートシリコンモスアイ構造のシミュレーション手法に関して議論を行い、後半の滞在時には、熱分解カーボンコートシリコンモスアイ構造の測定結果について対面で議論を行うことができたため、研究を迅速に進めることができた。

#### <得られた成果>

プロジェクトが始まった直後の 3 月に、共同研究を進めるフィンランド、ギリシャ、英国の 3 サイトを回ったことによって、その後の国際交流を非常にスムーズに進めることができた。これによって当初予定していなかったギリシャメンバーによる 7 月の来日を実現した。

6 月の東フィンランド大学での共同実験によりサンプル作製が迅速に進み、本プロジェクトの目標達成に極めて重要な熱分解カーボンコートシリコンモスアイ構造の作製への成功につながった。7 月のギリシャメンバーの訪問では、東京大学の有するメタマテリアル技術の詳細を詳しく説明できたことにより、新規テラヘルツキラルメタマテリアル構造の発見につながった。また、東大で取り組んでいたシミュレーション計算の方法に関して専門家のアドバイスを頂くことにより、その計算精度を大きく向上させることに成功した。

9 月から 11 月にかけての大学院生のサウサンプトン大学滞在によって、研究テーマ 2 に関する Peter Kazansky 教授との共同研究を良い形で開始できた。作製した広帯域テラヘルツベクトルビーム発生用偏光制御素子はそれ自体に新規性があり、来年度に向けた本プロジェクトのガラス内部レーザー加工のための装置を理解する上でも重要であった。

## 2. 研究実施体制

研究テーマ	中心となる研究者氏名	所属機関・部署・役職名
研究テーマ1 広帯域完全吸収 テラヘルツメタマ テリアルの開発	小西 邦昭 櫻井 治之 神田 夏輝  Yuri Svirko	東京大学・理学系研究科・准教授 東京大学・理学系研究科・助教 理化学研究所・光量子工学研究センター・ 研究員  University of Eastern Finland ・Department of Physics and Mathematics・Professor
研究テーマ2 三次元スパイラル テラヘルツキラルメ タマテリアルの開 発	小西 邦昭 櫻井 治之 神田 夏輝  Yuri Svirko Peter Kazansky	東京大学・理学系研究科・准教授 東京大学・理学系研究科・助教 理化学研究所・光量子工学研究センター・ 研究員  University of Eastern Finland ・Department of Physics and Mathematics・Professor University of Southampton・

		Optoelectronics Research Centre (ORC)・Professor
--	--	--

3. 代表的な業績（原著論文、プレスリリース、表彰など）

無し