

令和 4 年 6 月 15 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19H02624

研究課題名（和文）光学クローキングの実証

研究課題名（英文）Experimental Demonstration of Optical Cloaking

研究代表者

梶川 浩太郎 (Kajikawa, Kotaro)

東京工業大学・工学院・教授

研究者番号：10214305

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,600,000円

研究成果の概要（和文）：クローキングとは、物体(対象物)を特定の媒質で覆うことによりそれを不可視化する光学技術であり、これまで理論と計算でしか議論されてこなかった光学周波数でのクローキングを実験で実証することに成功した。具体的には、銀ナノワイヤ（直径0.11マイクロメートル、長さ20マイクロメートル）の表面をクローキング媒質である酸化モリブデンでコートした構造理論計算および実験を行い、厚さ0.045マイクロメートルの酸化モリブデンでコートされた際に波長633ナノメートルのTM偏光に対してクローキングが達成され、光の散乱がほとんど無くなることが示された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

クローキングとは、物体(対象物)を特定の媒質で覆うことによりそれを不可視化する光学技術であり、これまで理論と計算でしか議論されてこなかった光学周波数でのクローキングを実験で実証することに成功した。金属や誘電体、半導体の円柱状のワイヤを不可視化できるため、透明な電気配線材料や光導波路、光ファイバーなどが実現でき、光インターコネクションなどの集積回路の分野への波及効果が期待できる。

研究成果の概要（英文）：Cloaking is an optical technique to make an object invisible by coating it with a specific medium. We have succeeded in experimentally demonstrating cloaking at optical frequencies that have only been discussed theoretically and computationally. Specifically, they performed theoretical calculations and experiments on the structure of silver nanowires (0.11 micrometer in diameter and 20 micrometers in length) coated with molybdenum oxide as a cloaking medium and found that when coated with a 0.045-micrometer-thick molybdenum oxide, cloaking was achieved for TM polarization, and that light scattering is virtually eliminated.

研究分野：光機能性材料

キーワード：メタマテリアル クローキング

1 研究開始当初の背景

クローキングとは、物体（対象物）を特定の媒質で覆うことにより全体を不可視化する光学技術である。ここでいう不可視化とは、対象物の透過率が100%に近くなるだけでなく、位相も含めて、透過光が対象物が存在しない場合と同様にふるまうことを指す。これまでいくつかのクローキング手法が提案されているが、計算によりクローキングが示されているだけである。可視光領域で光学的に自立したクローキング対象物を実験的にクローキングできることを示した研究例は無い。そこで、本研究ではこれまで理論と計算でしか議論されてこなかった光学周波数でのクローキングを、実験により実証することを目的とする。

2 研究の目的

本研究ではこれまで理論と計算でしか議論されてこなかった光学周波数でのクローキングを、実験により実証することを目的とする。具体的には、円柱の表面をクローキング媒質で覆った構造を作製し、実験的に不可視化ができることを明らかにする。図1に示すように、円柱とクローキング媒質の分極の方向が反対になるようにクローキング媒質を設計すれば、散乱光がキャンセルされ不可視化が実現できる。金属や誘電体、半導体の円柱状のワイヤーを不可視化できるため、透明な電気配線材料や光導波路、光ファイバーなどが実現でき、光インターコネクションなどの集積回路の分野への波及効果が期待できる。

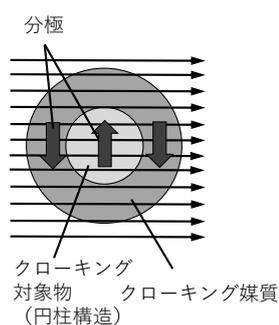


図1 クローキングの原理

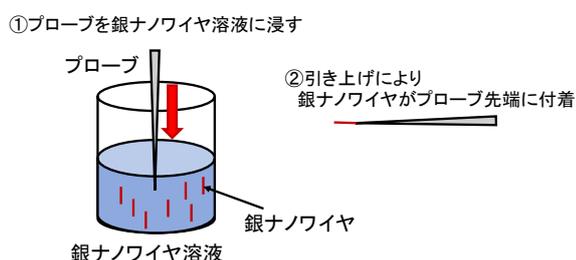


図2 銀ナノワイヤーの固定化

3 研究の方法

- 1. 構造設計** クローキング対象物である円柱構造やクローキング媒質で表面を覆った円柱構造の散乱強度の厳密解をミー散乱理論を用いたプログラムを開発し、その計算を行った。クローキング媒質の厚さや材料を検討した。また、実験を行うにあたって、入手可能な材料かどうかについても考慮した。
- 2. 銀ナノワイヤーのSTM探針への固定** クローキングの実験では、クローキング対象物質である直径100nm、長さ20 μ m程度の銀ナノワイヤーをSTM探針の先端に固定することが必要である。昨年度は銀ナノワイヤーをSTMに固定する方法として、マニピレーターを使って、基板上的銀ナノワイヤーを接着剤を使って固定するようにしていた。しかし、この方法では10%程度の歩留まりにとどまり、実験を進める上で大きな障害となっていた。そこで、図2に示すような水溶液中に分散したSTM探針を引き上げることで、自発的に探針先端に銀ナノワイヤーを固定化する方法を考案して、

比較的高い歩留まりで試料の作成が行えるようにした。また、得られた資料について電顕観察による形状の評価や EDS 測定による組成の評価を行った。クロッキング媒質としては三酸化モリブデンを用いた。三酸化モリブデンは銀ナノワイヤー上に蒸着したが、その際、ワイヤーをモーターにより回転して蒸着を行った。

3. 光学系の作製と測定 図3に示すような波長 543.5 nm および 632.8 nm の HeNe レーザーを使った散乱光の測定ができる光学系を構築した。レーザーから出た光はの偏光を偏光子を使って選んだ後、ビームエキスパンダーでビーム径を広げる。ピンホールを通して空間フィルタリングした後、平行光にして、集光レンズで試料に照射した。散乱光は CCD カメラにより検出して、形状の写真や散乱光強度の計測を行った。ハロゲンランプは試料を観察する際の照明として用いた。

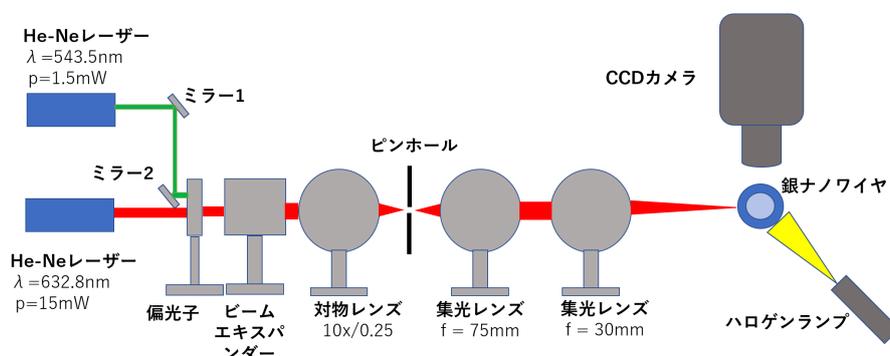


図3 光学系

4 研究成果

設計により、クロッキング対象物としては、長さ直径 115nm、長さ 20 μ m 程度の銀ナノワイヤー (AgNW)(シグマ-アルドリッチ) を用いた。ナノワイヤー溶液の最適な希釈濃度を求め、図2の方法を使って銀ナノワイヤーを STM 探針 (タングステン) 上に固定化した。図4に銀ナノワイヤーの光学顕微鏡像を示す。

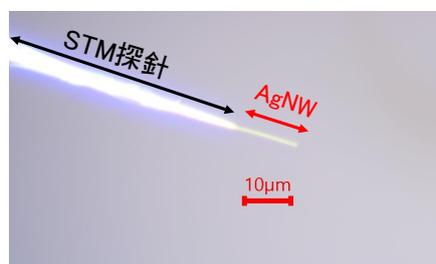


図4 STM 探針上に固定化された銀ナノワイヤーの光学顕微鏡像。

クロッキング媒質で銀ナノワイヤーをコーティングした後の試料の透過型電顕観察像および EDS 像を図5に示す。コーティング膜厚は 35nm である。クロッキング対象物 (AgNW) をほぼ均一にクロッキング媒質が覆っていることがわかる。覆っている媒質の EDS 像から、中心に銀が存在しており、それをモリブデンと

酸素を含む媒質で覆っていることが確認できる。

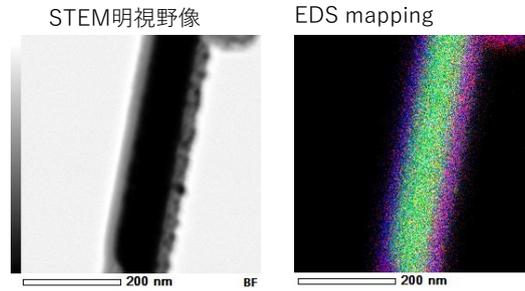


図5 STM 探針上に固定化された銀ナノワイヤーの STEM 像および EDS 像。EDS 像で Ag は緑、Mo は青、O は赤で示されている。

図 6(a) および 6(b) にクロージング前後の散乱光強度比（クロージング指数）をクロージング媒質の膜厚に対してプロットしたものを示す。図 6(a) および 6(b) は、それぞれ 545.5nm および 632.8nm の入射光に対するクロージング指数である。実線はミー理論で求めた理論曲線であり、膜厚 $0.035\mu\text{m}$ 付近で最小となる。実験結果は理論曲線と矛盾が無く、特に 632.8nm の場合はよく一致している。545.5nm の場合、理論曲線とよく一致しないのはレーザーの出力が小さく、十分な強度で散乱光が観測できなかったためである。図 6(c) および 6(d) はクロージング前とクロージング後（クロージング膜厚 $0.035\mu\text{m}$ ）の光学顕微鏡像であり、測定結果を画像で示したものである。以上の結果から、今回行った手法で、これまで達成されなかった可視光領域の光学クロージングの実験的な観察が達成できたと考えられる。

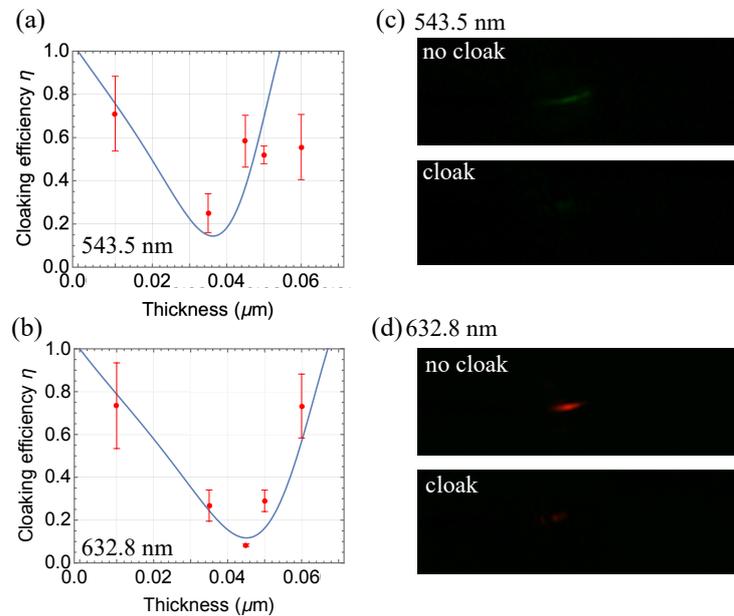


図6 測定されたクロージング指数。クロージング媒質の膜厚を変えて測定した結果。右側はクロージング前後の試料の光学顕微鏡写真。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 9件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 Yuki Nakamura, Mana Toma, Kotaro Kajikawa	4. 巻 13
2. 論文標題 A visible and near-infrared broadband light absorber of cone-shaped metallic cavities	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Applied Physics Express	6. 最初と最後の頁 62001
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.35848/1882-0786/ab8964	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Naoto Akashi, Mana Toma, and Kotaro Kajikawa	4. 巻 13
2. 論文標題 Design by neural network of concentric multilayered cylindrical metamaterials	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Applied Physics Express	6. 最初と最後の頁 42003
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.35848/1882-0786/ab7cf1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Kumar Rahul, Kajikawa Kotaro	4. 巻 11289
2. 論文標題 Cylindrical hyperbolic metamaterials exhibiting superscattering with whispering gallery-like resonance	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceeding of SPIE	6. 最初と最後の頁 1128911
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1117/12.2543110	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Kumar Rahul, Kajikawa Kotaro	4. 巻 28
2. 論文標題 Superscattering from cylindrical hyperbolic metamaterials in the visible region	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 1507 ~ 1517
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1364/OE.379547	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Kobayashi Mariko, Katori Yuki, Yamaguchi Masatoshi, Shimojo Masayuki, Kajikawa Kotaro	4. 巻 9
2. 論文標題 Broadband light absorber of gold-coated moth-eye film	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Optical Materials Express	6. 最初と最後の頁 3744 ~ 3752
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OME.9.003744	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Kobayashi Mariko, Furusawa Takaya, Chikuta Taiki, Shimojo Masayuki, Kajikawa Kotaro	4. 巻 9
2. 論文標題 Broadband light absorber property of metal-coated pillars on cicada wings	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Optical Materials Express	6. 最初と最後の頁 2761 ~ 2768
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OME.9.002761	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Kiyota Kengo, Kajikawa Kotaro	4. 巻 2
2. 論文標題 Effective medium and equivalent circuit analysis of extraordinary transmission through metallic grating in the infrared range	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 OSA Continuum	6. 最初と最後の頁 1639 ~ 1651
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OSAC.2.001639	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Tam Hoang Thi Thanh, Toma Mana, Kajikawa Kotaro	4. 巻 N/A
2. 論文標題 Investigation of polyesters as daytime radiative cooling materials	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Molecular Crystals and Liquid Crystals	6. 最初と最後の頁 1 ~ 7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/15421406.2022.2038458	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Thanh Tam Hoang Thi, Kajikawa Kotaro	4. 巻 29
2. 論文標題 Extraordinary transmission of gold-capped sphere arrays in mid-infrared range	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 35191-35205
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OE.439357	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計32件 (うち招待講演 6件 / うち国際学会 11件)

1. 発表者名 Hoang ThiThanh Tam, Mana Toma, Takayuki Okamoto, Mio Hidaka, Kensuke Fujii, Yasuhiro Kuwana, Kotaro Kajikawa
2. 発表標題 Transparent fluoropolymer for daytime radiative cooling
3. 学会等名 第67回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 梶川浩太郎
2. 発表標題 光学設計への機械学習の応用
3. 学会等名 日本顕微鏡学会 第45回関東支部講演会 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小林 佑輔、當麻 真奈、岡野 瑛飛、下条 雅幸、梶川浩太郎
2. 発表標題 銀ナノワイヤーのクローキングによる不可視化の実証
3. 学会等名 第81回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 中村 佑希、當麻 真奈、梶川 浩太郎
2. 発表標題 黒体メタサーフェスのための有効媒質近似
3. 学会等名 第67回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 明石 直人、當間 真奈、梶川 浩太郎
2. 発表標題 ニューラルネットワークを用いたメタマテリアルの形状推定
3. 学会等名 第67回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 中村佑希、當麻真奈、梶川浩太郎
2. 発表標題 モスアイフィルムを利用した黒体メタ表面
3. 学会等名 電子情報通信学会 有機エレクトロニクス研究会 (OME)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 梶川浩太郎
2. 発表標題 機械学習を使ったメタマテリアルの設計
3. 学会等名 日本光学会ナノオプティクス研究グループ 第26回研究討論会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kotaro Kajikawa
2. 発表標題 Design of metamaterials based on neural networks
3. 学会等名 iSPN2019 The International Symposium on Plasmonics and Nanophotonics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Naoto Akashi, Mana Toma, Kotaro Kajikawa
2. 発表標題 Design of metamaterials using neural networks
3. 学会等名 SPIE Photonics Asia
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 明石 直人、梶川 浩太郎、當麻 真奈
2. 発表標題 ニューラルネットワークを用いたメタマテリアルの設計
3. 学会等名 第80回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hoang Thi Thanh Tam, Kotaro Kajikawa
2. 発表標題 Extraordinary transmission of gold-capped silica-sphere array
3. 学会等名 JSAP-OSA Joint Symposia 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kotaro Kajikawa
2. 発表標題 Surface phonon polariton in silica for effective radiative cooling
3. 学会等名 KJF International Conference on Organic Materials for Electronics and Photonics (KJF-ICOMEF 2019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yusuke Kobayashi and Kotaro Kajikawa
2. 発表標題 Invisible Dielectric Cylinders at Optical Frequency
3. 学会等名 A3 Metamaterials Forum (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kotaro Kajikawa and Yusuke Kobayashi
2. 発表標題 Invisible Dielectric Cylinders at Optical Frequency
3. 学会等名 META2019 10th International Conference on Metamaterials (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 明石直人, 當麻真奈, 梶川浩太郎
2. 発表標題 ニューラルネットワークを使ったメタマテリアルの設計
3. 学会等名 第16回プラズモニクスシンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 伊藤有輝、當麻 真奈、梶川 浩太郎
2. 発表標題 放射冷却を使った熱電モジュールによる環境発電
3. 学会等名 第69回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 百瀬 智也、當麻 真奈、梶川 浩太郎
2. 発表標題 遺伝的アルゴリズムとニューラルネットワークを用いた光学クロッキング設計
3. 学会等名 第69回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 並原慎之輔、梶川 浩太郎、當麻 真奈
2. 発表標題 比色型プラズモンバイオセンサによる生体分子の直接検出
3. 学会等名 第69回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 杉本陽祐、當麻 真奈、梶川 浩太郎
2. 発表標題 金属ナノピラーアレイのプラズモニック色
3. 学会等名 第69回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Hoang ThiThanh Tam, Mana Toma, Kotaro Kajikawa
2. 発表標題 Transparent non-radiative cooling materials
3. 学会等名 第69回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 碓 真一、當麻 真奈、梶川 浩太郎
2. 発表標題 クローキングによる単一銀ナノワイヤの不可視化
3. 学会等名 第18回プラズモニクスシンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 百瀬 智也、當麻 真奈、梶川 浩太郎
2. 発表標題 光学クローキング設計における機械学習と遺伝的アルゴリズムの比較
3. 学会等名 第82回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 伊藤有輝、當麻 真奈、梶川 浩太郎
2. 発表標題 放射冷却を使った熱電モジュールによる発電
3. 学会等名 第82回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 當麻 真奈、板倉雄士、梶川 浩太郎
2. 発表標題 比色型プラズモニックバイオセンサーを目指した高感度な銀ナノドーム構造
3. 学会等名 第82回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 杉本陽祐、當麻 真奈、梶川 浩太郎
2. 発表標題 銀ナノドーム配列によるプラズモニック色の入射角度依存性
3. 学会等名 第82回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hoang ThiThanh, Kotaro Kajikawa
2. 発表標題 Mid-infrared extraordinary transmission through gold-covered dielectric microsphere monolayer
3. 学会等名 第82回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Shinnosuke Namihara, Mana Toma, and Kotaro Kajikawa
2. 発表標題 Direct immunoassay by colorimetric plasmonic biosensor utilizing Ag nanodome arrays
3. 学会等名 Korea-Japan Joint Forum on Organic Materials for Electronics and Photonics (KJF-ICOMEPE) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yosuke Sugimoto, Mana Toma, and Kotaro Kajikawa
2. 発表標題 Plasmonic color generation by Ag nanopillar arrays
3. 学会等名 Korea-Japan Joint Forum on Organic Materials for Electronics and Photonics (KJF-ICOMEF) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yuki Ito, Mana Toma, and Kotaro Kajikawa,
2. 発表標題 Power generation with thermoelectric modules using radiative cooling
3. 学会等名 Korea-Japan Joint Forum on Organic Materials for Electronics and Photonics (KJF-ICOMEF) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hoang Thi Thanh Tam, Mana Toma, and Kotaro
2. 発表標題 Polyethylene Terephthalate (PET) film for daytime radiative cooling
3. 学会等名 Korea-Japan Joint Forum on Organic Materials for Electronics and Photonics (KJF-ICOMEF) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hoang ThiThanhTam, Mana Toma, Takayuki Okamoto, Mio Hidaka, Kensuke Fujii, Yasuhiro Kuwana, Kotaro Kajikawa
2. 発表標題 A transparent fluoropolymer for daytime radiative cooling
3. 学会等名 The 11th International Conference on Metamaterials, Photonic Crystals and Plasmonics (META2011) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kotaro Kajikawa
2. 発表標題 Waveguiding of Radiation from Silica Plates
3. 学会等名 The 11th International Conference on Metamaterials, Photonic Crystals and Plasmonics (META2011) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	下条 雅幸 (Shimojo Masayuki) (00242313)	芝浦工業大学・工学部・教授 (32619)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------