

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 6 月 18 日現在

機関番号：12605

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21H01781

研究課題名（和文）可変焦点メタレンズを利用した超小型複眼イメージングシステムの構築

研究課題名（英文）Development of ultrasmall compound-eye imaging system based on varifocal metalens

研究代表者

岩見 健太郎（Iwami, Kentaro）

東京農工大学・工学（系）研究科（研究院）・准教授

研究者番号：80514710

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,700,000円

研究成果の概要（和文）：2021年度には、近赤外線で複眼Alvarezメタレンズを実証し、アモルファスシリコンを用いた4x4レンズアレイの製作と撮像に成功しました。2022年度はメタレンズとアクチュエータの統合および偏光分離機能の実現に取り組み、設計通りの機能を確認しました。2023年度には、偏光分離と可変焦点機能を統合したメタレンズを構築し、焦点距離の可変範囲と消光比の性能を確認しました。また、多色動画像ホログラフィの実現にも成功しました。

研究成果の学術的意義や社会的意義

この研究の学術的意義は、新しいメタレンズ技術の開発と応用にある。特に、複眼Alvarezメタレンズや偏光分離・可変焦点機能を持つメタレンズの設計・製作に成功し、その性能を実証したことは、光学デバイスの新たな可能性を示している。これにより、高性能で小型な光学機器の開発が進むと考えられる。

社会的意義としては、この技術がカメラ、顕微鏡、VR/ARデバイスなどに応用されることで、より高精度で鮮明な映像や画像を提供できるようになる。また、ホログラフィ技術の進展により、医療や教育、エンターテインメント分野での応用も期待され、社会全体の技術革新と生活の質向上に寄与する可能性がある。

研究成果の概要（英文）：In 2021, we demonstrated the Alvarez metalens using near-infrared light, fabricating a 4x4 lens array and confirming variable focus. In 2022, we integrated metalenses with actuators and developed polarization-separating metalenses. Using the Tsubame 3.0 supercomputer, we confirmed the designed variable focus functionality. In 2023, we integrated polarization-separation and variable focus functionalities, verifying their performance. Holography achieved multicolor video display, optimizing silicon nitride meta-atoms for high transmittance and efficiency. These advancements promise improved optical devices for cameras, microscopes, and AR/VR applications, enhancing technology and quality of life.

研究分野：マイクロ・ナノシステム

キーワード：メタサーフェス メタレンズ メタマテリアル MEMS NEMS

### 1. 研究開始当初の背景

サブ波長スケールの単位構造の配列で構成されるメタマテリアルは、実効屈折率の巨視的な分布を任意に制御できる。このコンセプトに基づき、平面的なメタマテリアルからなるメタ集光素子(メタレンズ)が可視波長で実証され(Harvard Univ., Capasso ら、Science 352, 1190 (2016))、以後世界的にこの分野の研究が活発化していた。メタレンズは、基板上に形成されたナノ柱構造の配列からなる。柱寸法に依存した位相遅延を入射波面に与えることで、屈折機能やレンズ同様の位相分布が得られ、集光・結像機能が得られる。

微小電気機械システム(MEMS)とメタレンズを集積化し、メタレンズに可変焦点などの機能を付与する研究がおこなわれていた。凸レンズ機能と凹レンズ機能とを有する2枚のメタレンズ間の距離を、平行平板型静電アクチュエータで調整することで、可変焦点機能を実現した例があった(Caltech., Faraon ら、Nature Commun., 9 812 (2018))。しかしプルイン現象によりレンズの可動範囲が狭いため、焦点距離の可変範囲が小さかった。またレンズ厚さ自体の小型化は達成されたが、基板厚さや焦点距離を含めた光学系全体の小型化は未達成であり、幅広い焦点距離調整と小型化の両立は達成されていなかった。

### 2. 研究の目的

本研究の核心をなす学問的問いは、「メタレンズと MEMS を融合することによって、従来のレンズ系では実現不可能な機能性や、小型化などの利点・有用性を発現しうるか?」とした。本研究の目的は、メタレンズと MEMS を融合した「複眼可変焦点メタレンズデバイス」の製作を通じて、従来のレンズ系では実現不可能な超小型イメージングシステムを実証することとした。

### 3. 研究の方法

2021 年度には、近赤外線複眼 Alvarez メタレンズの原理実証を行った。ガラス基板上に製膜したアモルファスシリコンを利用して 4\*4 のレンズからなる Alvarez メタレンズアレイを製作し、1/4 程度の短焦点化を確認した。また、画像の撮像に成功した。さらに、手動マイクロステージ上で変位を与えることで可変焦点を確認した。平行して、Silicon on Sapphire 基板を利用した各種メタレンズ・メタサーフェスを製作した。回転型可変焦点メタレンズであるモアレレンズを可視光域の波長 633, 532, 445 nm で動作することを確認した。同様の基盤を用いてホログラフィを製作し、動画の東映に成功した。これらを通じて可視光で動作する Alvarez メタレンズアレイの設計・製作に関する基礎的知見を蓄積した。

2022 年度には、メタレンズとアクチュエータとの集積化、および偏光分離 Alvarez メタレンズの製作に取り組んだ。アクチュエータ集積化においては、東工大のスーパーコンピュータ Tsubame3.0 を用いた解析によって、設計通りの可変焦点機能が得られることを確認した。偏光分離 Alvarez メタレンズについては、図 1 のように、2 つの直交する偏光成分を別々の場所に結像し、なおかつ可変焦点機能を有する Alvarez メタレンズの設計・製作に成功した。製作したメタレンズを市販カメラにマウントして撮影を行ったところ、図 2 のように長波長赤外線を分離して結像する機能が確認できた。

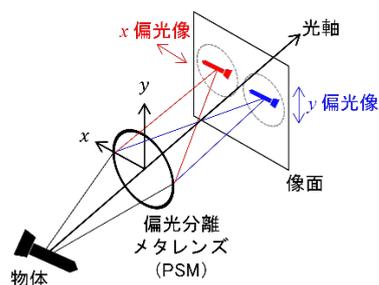


図 1 偏光分離メタレンズの概念図

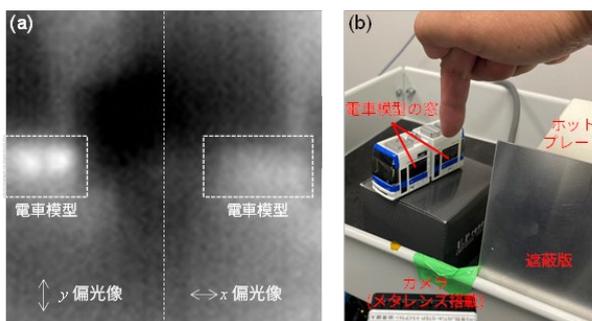


図 2 (a) メタレンズで撮像した偏光分離画像による偏光情報の可視化。電車模型の窓部に反射率の違いが見える。(b) 実験の様子。ホットプレートからの赤外線が模型で反射し、メタレンズを搭載したカメラで観察している。

2023 年度には、偏光分離機能と可変焦点機能を統合した図 3 のような Alvarez メタレンズの構築に取り組んだ。まず、Alvarez メタレンズの位相分布と軸外しレンズの位相分布を重畳させることで、軸外し Alvarez メタレンズに関する位相分布式を得た。この軸外し座標を x 偏光と y 偏光とで別々の座標を与えることで、偏光分離 Alvarez メタレンズの位相分布の解析解を得た。さらに、メタ原子に長方形断面を有する Si 異方性柱形状を採用することで、メタレンズ柱配列の設計解を得ることができた。東京工業大学に設置されたスーパーコンピュータ

TSUBAME3.0 と有限要素法解析ソフト COMSOL Multiphysics6.1 を用いて、設計された偏光分離 Alvarez メタレンズの動作を確認した。この解をもとに文部科学省 ARIM 微細加工拠点（東京大学）の加工装置を用いてメタレンズを製作した。製作したメタレンズを図4に示す。赤外カメラを利用して製作したメタレンズの評価を行ったところ、偏光分離機能と可変焦点機能の両立を確認することができた。図5のように、焦点距離の可変範囲として 0.75~10.65mm を、x-y 両偏光間の消光比として 18.5dB の性能を確認することができた。

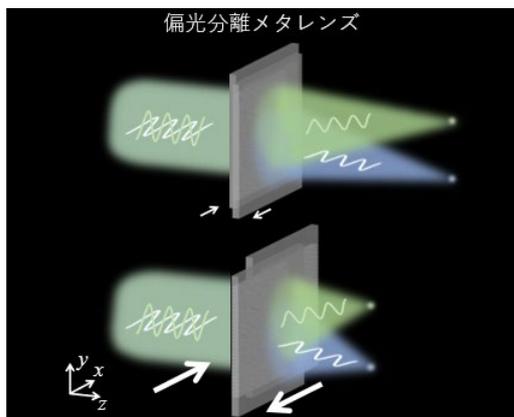


図3 偏光分離機能を持つ可変焦点メタレンズの概念図：重ねた2枚の光学素子が、緑色と青色で示した直線偏光をそれぞれ異なる位置に集光させる様子。またその焦点距離は、2枚の素子の変位が小さいときは長く（上図）、大きいときは短く（下図）なる。

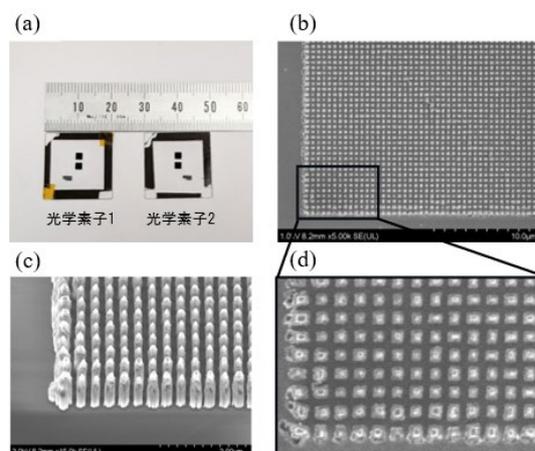


図4 製作結果 (a) メタレンズ写真 (b) 上から撮影した電子顕微鏡写真 (c) 斜め方向から撮影した電子顕微鏡写真 (d) (b) の拡大図長方形の断面構造を持つメタアトム

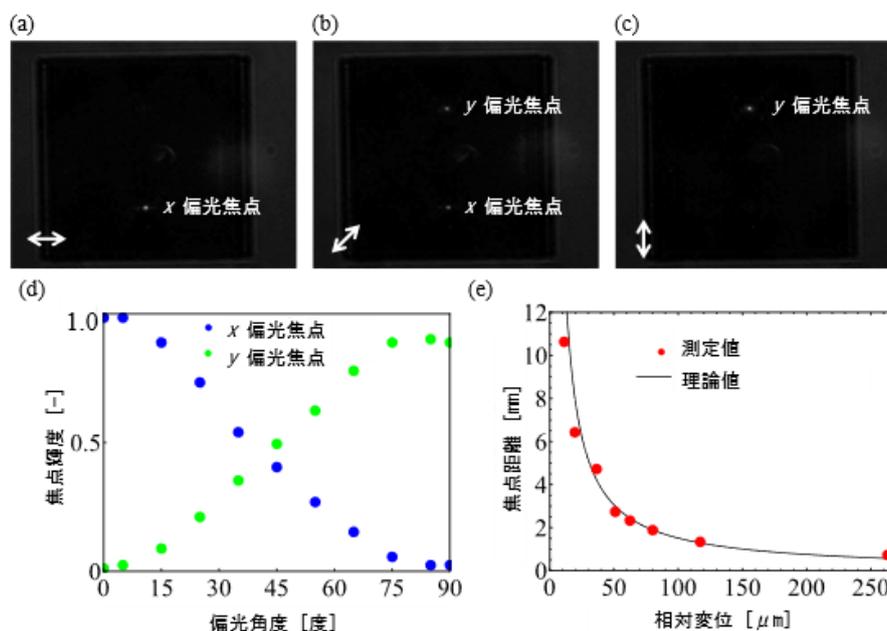


図5 実験結果 (a) x 偏光 (b) 45度偏光 (c) y 偏光 を入射した時の焦点面の様子。x 偏光を入射した時には、設計通り画像下側に集光し、y 偏光を入射した時には画像上側に集光している。また、両方の偏光を含む45度偏光を入射した時には、偏光が分離されてそれぞれの焦点位置に集光している様子が分かる。(d) 入射偏光によって2つの焦点輝度が変化する様子。偏光角度は0度がx偏光、90度がy偏光を表しており、(a) - (c) に示した焦点の明るさが入射光に含まれる各偏光の量に依存していることから偏光を正しく分離できていることが分かる。(e) Alvarez レンズの2つの素子の相対変位 d によって焦点距離 f が変化する様子。黒線で示した理論値に沿って焦点距離を制御できていることが分かる。

そのほか、照明系メタサーフェスとして取り組んだホログラフィでは、2次元画像の多色動画

化を達成することができた。窒化シリコンメタ原子の製造条件最適化に取り組み、可視光域の平均透過率 90%、一次光回折効率 70%以上を達成することができた。RGB3 波長×30 フレームからなるホログラフィ配列基盤を製作し、最大再生速度 30fps での再生を行うことができた。

#### 4. 研究成果

上記の研究を通じて、従来のレンズ系では実現不可能な機能性や、小型化などの利点・有用性を発現しうるメタレンズの開発を達成した。その成果は論文 7 報（すべてオープンアクセス）、学会発表 14 件（うち招待講演 13 件、国際会議 10 件）、図書 3 報（いずれも分担執筆）、特許 1 件にまとめられた。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 6件）

1. 著者名 Hada Mitsutoshi、Adegawa Hyo、Aoki Katsuma、Ikezawa Satoshi、Iwami Kentaro	4. 巻 32
2. 論文標題 Polarization-separating Alvarez metalens	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 6672 ~ 6683
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1364/OE.516853	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 Yamaguchi Masakazu、Saito Hiroki、Ikezawa Satoshi、Iwami Kentaro	4. 巻 13
2. 論文標題 Highly-efficient full-color holographic movie based on silicon nitride metasurface	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Nanophotonics	6. 最初と最後の頁 1425 ~ 1433
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1515/nanoph-2023-0756	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 Ishizuka Noe、Li Jie、Fuji Wataru、Ikezawa Satoshi、Iwami Kentaro	4. 巻 31
2. 論文標題 Linear polarization-separating metalens at long-wavelength infrared	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 23372 ~ 23381
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1364/oe.492918	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 Ikezawa Satoshi、Yamada Ryota、Takaki Kosuke、Ogawa Chikara、Iwami Kentaro	4. 巻 22
2. 論文標題 Micro-Optical Line Generator Metalens for a Visible Wavelength Based on Octagonal Nanopillars Made of Single-Crystalline Silicon	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Sensors Journal	6. 最初と最後の頁 14851 ~ 14861
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/JSEN.2022.3186060	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 Ogawa Chikara, Nakamura Sotaro, Aso Takumi, Ikezawa Satoshi, Iwami Kentaro	4. 巻 0
2. 論文標題 Rotational varifocal moiré metalens made of single-crystal silicon meta-atoms for visible wavelengths	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Nanophotonics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1515/nanoph-2021-0690	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 Yamada Naoyuki, Saito Hiroki, Ikezawa Satoshi, Iwami Kentaro	4. 巻 30
2. 論文標題 Demonstration of a multicolor metasurface holographic movie based on a cinematographic approach	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 17591 ~ 17591
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OE.457460	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 Yamada Naoyuki, Ikezawa Satoshi, Iwami Kentaro	4. 巻 -
2. 論文標題 Color animation by dielectric metasurface hologram made of silicon nanopillar	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proc. of 2021 Fifteenth International Congress on Artificial Materials for Novel Wave Phenomena (Metamaterials)	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/Metamaterials52332.2021.9577126	査読の有無 無
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 -

〔学会発表〕 計14件 (うち招待講演 13件 / うち国際学会 10件)

1. 発表者名 Kentaro Iwami
2. 発表標題 Design, Fabrication, and Application of Metasurface/ Metalens based on Dielectric Waveguide
3. 学会等名 The 14th Asia-Pacific Conference on Near-Field Optics (APNF014) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Kentaro Iwami
2. 発表標題 Dielectric metasurface for wavefront manipulation in the visible and near-ir region
3. 学会等名 The 7th A3 Metamaterials Forum (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Kentaro Iwami
2. 発表標題 Multicolor metasurface holographic movie based on a silicon nitride metasurface
3. 学会等名 SPIE/COS Photonics Asia 2024 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 岩見健太郎
2. 発表標題 誘電体メタレンズ・メタサーフェスを利用した高機能光学素子
3. 学会等名 レーザー学会第44回年次大会 (招待講演)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 岩見健太郎
2. 発表標題 偏光感受性メタサーフェス・メタレンズで拓く計測技術
3. 学会等名 応用物理学会第71回春季講演会 (招待講演)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Kentaro Iwami
2. 発表標題 Dielectric metasurfaces for holography and focusing at visible wavelengths
3. 学会等名 The 13th International Conference on Optics-photonics Design and Fabrication (ODF'22) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kentaro Iwami
2. 発表標題 Multicolor metasurface holographic movie based on a cinematographic approach
3. 学会等名 SPIE/COS Photonics Asia, 2022 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 岩見健太郎
2. 発表標題 誘電体導波路型メタサーフェスによる機能性光学素子
3. 学会等名 第70回応用物理学会春季学術講演会 (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 岩見健太郎
2. 発表標題 誘電体メタサーフェスを利用した光学素子：レンズからホログラムまで
3. 学会等名 2022年電子情報通信学会ソサイエティ大会 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Masakazu Yamaguchi Hiroki Saito, Satoshi Ikezawa, and Kentaro Iwami
2. 発表標題 High Transmittance Metasurface Holograms Using Silicon Nitride
3. 学会等名 The 36th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (IEEE MEMS 2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Kentaro Iwami
2. 発表標題 Metasurface holographic movie based on a cinematographic approach
3. 学会等名 International Workshop on Holography and related technologies (IWH2021) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kentaro Iwami
2. 発表標題 Dielectric metasurface for imaging and visualization
3. 学会等名 International Symposium on Imaging, Sensing, and Optical Memory (ISOM) 2021 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kentaro Iwami, Yuta Otome, Azusa Tahara, and Satoshi Ikezawa
2. 発表標題 A Suspended TiN Film for Thermal Plasmonics Platform
3. 学会等名 META 2021 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kentaro Iwami
2. 発表標題 Rotational varifocal moire metalens at the visible wavelength
3. 学会等名 The 5th A3 (China-Japan-Korea) Metamaterials Symposium, (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計2件

1. 著者名 バイオ計測のための材料と微細加工編集委員会、松永 忠雄、鶴岡 典子、小野寺 武、山口 明啓、池沢 聡、土肥 徹次、神田 健介、岩見 健太郎、峯田 貴、林 育菁、津守 不二夫、笠原 崇史、水野 潤、和泉 慎太郎、田畑 美幸、野田 和俊、荒川 貴博	4. 発行年 2022年
2. 出版社 コロナ社	5. 総ページ数 240
3. 書名 バイオ計測のための材料と微細加工	

1. 著者名 高原 淳一、岩長 祐伸、長崎 裕介、田中 拓男、佐野 栄一、松井 龍之介、岡本 敏弘、納谷 昌之、金森 義明、岩見 健太郎、玉山 泰宏、堀 俊和、宮崎 英樹、久保 若奈	4. 発行年 2022年
2. 出版社 技術情報協会	5. 総ページ数 508
3. 書名 メタマテリアルの設計、作製と新材料、デバイス開発への応用	

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 光学素子、光学セル、分析装置、及び光学素子の設計方法	発明者 岩見健太郎、原基揚、矢野雄一郎、井戸哲也	権利者 国立大学法人東京農工大学、国立研究開発法人
産業財産権の種類、番号 特許、特願2022-062908	出願年 2022年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

東京農工大学岩見研究室  
https://nmems.lab.tuat.ac.jp

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	池沢 聡  (Ikezawa Satoshi)  (00571613)	早稲田大学・理工学術院・次席研究員(研究院講師)   (32689)	
研究分担者	田中 雄一  (Yuichi Tanaka)  (10547029)	大阪大学・大学院工学研究科・教授   (14401)	

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
---------	---------