

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 6 月 6 日現在

機関番号：12102

研究種目：若手研究

研究期間：2022～2023

課題番号：22K14656

研究課題名（和文）イオン液滴レーザー共振器による革新的光モジュレータの開発

研究課題名（英文）Development of novel light modulator using laser oscillator made from ionic liquid

研究代表者

山岸 洋（Yamagishi, Hiroshi）

筑波大学・数理物質系・助教

研究者番号：40824678

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,600,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では不揮発性に優れるイオン液体の液滴に着目し、その形状変化に応じて光の透過・屈折・反射・共振特性が変化する現象を利用することで、新しい光モジュレーターを実現できるのではないかと着想し、研究を進めた。イオン液体の中では表面張力に優れたイミダゾール塩を素材として選び、フッ素化した基盤上に滴下したところ、大気中でも1ヶ月以上にわたって安定で、真球に近い形状を有する液滴を作成することに成功した。この液滴を利用することで高性能な有機レーザー、高感度な圧力センサーを実現することに成功している。また、この研究の途上で有機材料の柔軟性・膨張性を利用した新しい有機光共振器の開発・論文発表に至っている。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、機能性有機材料の分野で研究されてきた液体材料を利用することで新たなレーザー発振子、光共振器、光センサーの作成に成功した。これらの光デバイスはいずれも材料の分子構造に由来する構造的柔軟性、高いプロセス性、化学的な親和性を有している。これらの特徴は無機固体を利用する従来の光デバイスでは実現が極めて困難であり、光デバイスの新たな価値を開拓したと言える。また、無機レーザーに代わる新たなレーザー光源としての研究が進められている有機レーザーの分野において、有機デバイスが光源以外にも多様な価値を生み出しうる事が明らかになった点は、大きな学術的意義を持つ。

研究成果の概要（英文）：In this study, I focused on self-standing and robust droplets made from ionic liquids with an aim to develop novel light modulators that convert the light via transmission, refraction, reflection, and resonance in response to the transformation of the droplet. Among reported ionic liquids, I selected imidazolium salts, which have excellent surface tension, and successfully created droplets with an ideal spherical shape and robustness even under atmosphere. By using these droplets, we succeeded in achieving a high-performance organic laser and a highly sensitive pressure sensor. In addition, in the course of this study, we found several types of organic optical resonators with structural flexibility and affinity toward vapors, demonstrating potential outcomes achievable with organic resonators. These achievements were presented in conference and were published in scientific journals.

研究分野：超分子化学

キーワード：光共振器 有機レーザー 光センサー 分子集合

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

鏡面で囲われた容器の内部へ入射した光は、全反射を繰り返してその中に閉じ込められる。このような容器は光共振器と呼ばれており、光回路、レーザー発振装置など様々な光デバイスの基盤を担う素子として広く研究されている。光共振器には、合わせ鏡型 (FP 共振器)、周期的な屈折率分布型 (DFB 共振器)、球体型 (WGM 共振器) などいくつかの種類が知られているが、いずれにおいても光共振器の機能は「屈折率」と「容器の形状」という2つの変数によって決定される。

一般に、光共振の機能を変調するためには屈折率の変化を利用する。屈折率変調の技術は著しく発展しており、例えば電気光学効果を用いた屈折率変調により、光スイッチなど多様な光学素子が既に実現されている。一方で、光の進行方向変化や局在化など、形状変調であれば容易かつ精緻に制御できる光機能も数多く知られている。しかし、長い光工学の歴史にも関わらず、容器形状を自在に変調する技術は未だに確立されていない。光を効率的に閉じ込めるためには緻密な微細加工と素子の精密な位置調整を行う必要があり、鏡や媒質には加工性に優れるものの柔軟性に乏しい堅い材料を利用せざるを得ない。共振機能を損ねずに素子配置を変更することも容易でない。このため、従来は「容器形状」を一定のまま「屈折率」のみを変える”変数1つ”の状態での光を変調してきた。

光共振器の形状を変調させる従来の技術は、マイクロネジや微小曲げなどの機械的な機構に基づく古典的な手法であり、屈折率で実現されている精密で高速な変調とは比較にならなかった。材料面の研究も未熟なままである。実際、光共振器の分野では今でも堅い無機材料や硬化樹脂が支配的であり、フレキシブル性に着目した研究はごく少数である。液体共振器は其中でもさらに飛躍した材料系であり、液体素子を開放系で利用しようとする研究を展開している研究者はほぼ見当たらない。液体共振器と呼ばれる素子は他にも存在するが、それらは固体の共振器内部に液体を導入した堅い素子である。液体だけで光共振器を構築しようとした研究も過去にいくつか存在するものの、これらの液滴はごく限られた条件 (密閉条件、短時間など) でのみ利用可能な素子であり、形状変調を利用した応用的な展開へとつなげることはできていなかった。

以上の通り、既存の素子構成では「屈折率」変調と同等の「容器形状」変調を実現することが原理的に難しい。そこで本研究では、液体のみで光共振器を構築できればこの限界を打破できると考えた。もし自在な形状変化が実現できれば、光の進行方向やエバネッセント場の調整など従来の屈折率変調では難しかった光の空間的制御が容易に実現でき、革新的な機能の創出を期待できる。

2. 研究の目的

本研究ではまず、液滴共振器の作成および種々の物理的な刺激 (熱・電場・力場) を組み合わせることで、液滴共振器を自在に変形させる技術の確立を目指した。次に、形状とカップリングした光機能の測定を行い、革新的な光走査・光センシングなどの技術を開拓した。

3. 研究の方法

本研究では不揮発性に優れるイオン液体の液滴に着目し、その形状変化に応じて光の透過・屈折・反射・共振特性が変化する現象を利用することで、新しい光モジュレーターを実現できるのではないかと着想し、研究を進めた。イオン液体の中では表面張力に優れたイミダゾール塩を素材として選び、また基盤としてフッ素化および微細加工を施したシリコン、および石英基板を利用した。作成した液滴に外部から励起光源を照射し、発光スペクトルを測定した。

4. 研究成果

1. 気流による変調が可能な液滴マイクロレーザー

曲げたり折ったりできる柔らかいデバイスが注目を集めている。デバイスが柔らかくなれば、人の体に貼り付けたり体の中に埋め込むことができる上に、デバイスを変形させることで機能を変化させることも可能になる。従来、このような柔らかいデバイスの素材としては、主にプラスチックが利用されてきたが、その柔らかさには限界があった。この限界を打ち破るための有望な素材として、液体に注目が集まっている。実際、レーザーを構成する要素の一部に液体を利用したデバイスはすでに存在している。例えば最もよく知られているものでは、レーザー光を生み出す容器 (光共振器) の内部に置かれる発光材料に液体が利用されている。ただし、このタイプの装置では、レーザーを生み出す容器が硬い固体でできており、柔らかさの点では課題があった。

そこで、レーザーを生み出す容器も液体で作ろうとする試みが行われている。そのためには、光が漏れ出さないよう、真球の形状を持つ、直径数マイクロメートルほどの微小な液滴を作製することが不可欠である。しかしながら、特に、基板上で真球の液滴を作製すること、また、液体の蒸発を防ぐことが難しく、大気中で安定して利用できる微小な液滴を得ることは困難であった。例えば、グリセリンなどの水よりもはるかに蒸発しにくい有機物の液体でさえ、微小な液滴にすると数十分から数時間ほどで蒸発してしまう。また、一般的な不揮発性の液体より更に不揮発な液体、真空状態でも蒸発しない液体である、シリコンオイルやイオン液体の場合は、表面張力が小さく、超撥水基板を用いても半球の形状しか作製することができなかった。

本研究では、大気中で安定して働く 100%液体でできたレーザー光源の開発に成功した。不揮発性のイオン液体のうち、比較的 surface tension が大きなイミダゾール塩を選び、フッ素化した微粒子を塗布した基板上へ滴下した。過去の研究と同様に、通常の滴下手法では接触角が十分に大きくならず、半球状の液滴しか形成しない。そこで、滴下する際の水滴の落下速度を抑え、かつ液滴を十分に小さくした状態で滴下すると、接触角が大きくなり、真球に近い形状の液滴を生成することができた。実験から明らかになった接触角の分散と理論的な考察を合わせて、このとき実現される接触角が準安定状態であることを明らかにした。このようにして得られた液滴は、大気中でも 1 ヶ月以上にわたって安定で、その蒸発速度は顕微鏡や光学的な測定では検出できないほど抑えられていた。また、基板に強く吸着し、基板を垂直に立てたり振動させたりしても、落下や移動は生じない。

この液滴にレーザー色素を添加してレーザー光源としての機能を調べたところ、およそ $1 \mu\text{J}/\text{cm}^2$ という、最も優れた有機マイクロ球体固体レーザーと同等のしきい値でレーザー発振することが明らかになった。液滴は極めて弱い力、例えばごく微量な空気の流れによって変形し、それに伴ってレーザー発振波長が変化する。この変化量は風速によって変化させることができる。また、風による液滴変形のシミュレーション、および変形した液滴内部における電磁場のシミュレーションから、風速による液滴変形の計算結果、および変形によるレーザー波長変化の計算結果が実験結果と符合することを明らかにした。さらに、同様の滴下方法をインクジェットプリンターで実現する手法を開発した。これにより、一定の大きさの液滴を、素早く大量に決まった位置に作製することができる。

液体は、形や位置が定まらないことから、光デバイスとしての利用は限定的であった。本研究で開発した手法により、安定な液体レーザーデバイスを構築することができる上、変形や外部刺激応答性といった液体本来の性質を十分に発揮することができる。この性質はレーザー光源およびセンシングデバイスとして有用であり、新たな柔らかな光デバイスの実現につながることを期待できる。

Robust & Self-standing Lasing Droplet

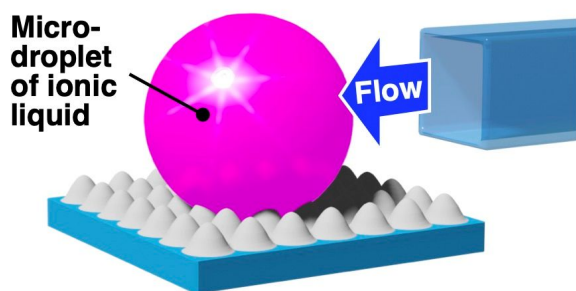


図 1 微小な気流に対して敏感に応答する液滴レーザーの模式図。

2. レンズ不要のリモート光検出に向けた等方的に放射するシクロデキストリンによる包括された蛍光色素を含む液滴レーザー

光センサーの特徴の一つに、配線を必要としない点が挙げられる。一般的な電氣的なセンサーやその他の原理を利用するセンサーとは異なり、センサーチップを小型かつ分離した状態で作成できるため、特にバイオ用途や環境中での測定での活躍が期待されている。本研究では、光センサーの中でも特に優れた感度と精度を持つことが知られている光共振器センサーを利用した、リモートな化学センサー実現を目指し、その素子の光特性の向上を進めた。

我々が過去に報告したイオン液体の液滴で構成される液滴レーザーに対して、シクロデキストリンに包摂される有機色素を添加した。包摂効果によって色素の耐久性が高まり、高強度の励起光により、強いレーザー発光を等方的に放射することに成功した。この成果は、厳密な角度調整をすることなく光センサーからの信号を受信するためのデバイス構築への重要な要素技術となる。

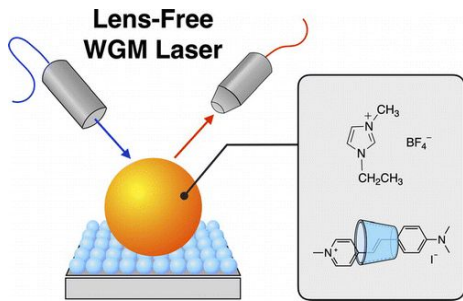


図2 イオン液体からなるレーザー発振子に、シクロデキストリンに包摂した色素を添加し、リモートで光センシングを行うデバイスの模式図。

3. 高い耐熱特性をもつポリ乳酸マイクロ球体光共振器

耐熱性ポリマー光共振器は、水中油型ミニエマルジョン法によりポリ(L-乳酸)とポリ(D-乳酸)のステレオコンプレックスから作製される。ステレオコンプレックスポリ乳酸 (SC-PLA) のマイクロ球体の熱安定性は、ホモキラルポリ乳酸 (HC-PLA) のマイクロ球体よりも優れている。高い熱安定性の結果、SC-PLA マイクロ球体の光共振器特性は、HC-PLA から形成されたマイクロ球体よりも 70 高い 230 までの高温でも維持されることを明らかにした。

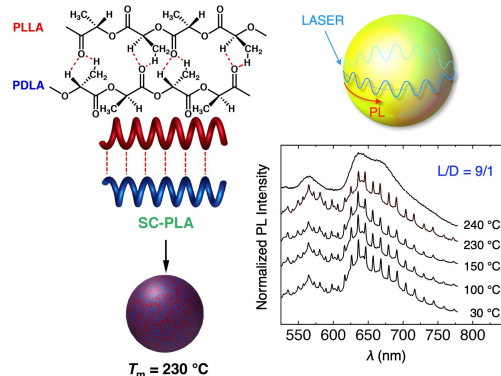


図3 ステレオコンプレックスポリ乳酸マイクロ球体からなる光熱耐性光共振器の模式図。

4. 酵素加水分解のマイクロプローブが可能な光共振器

2021 年に報告したシルク球体を用いてタンパク質の分解反応速度を分光学的に極めて高精度で測定できることを見出した。非水溶性生体高分子の分解反応は分子生物学的に極めて重要な現象であるものの、固液界面での反応を測定する手法の乏しさから、その反応速度を顕微鏡で精密に測定することは困難であった。我々は、この困難を克服した新たな測定手法の開拓に成功した。タンパク質分解酵素を含む水溶液に作成したシルク球体を浸したところ、シルク球体は表面から徐々に分解され、その直径が減少した。この直径減少量は数十 nm ほどと顕微鏡画像で解析することは極めて困難な微小さである。一方で、この球体から発せられる光共振スペクトルを確認したところ、このサイズ減少に対応したピークシフトが有意に観測された。すなわち、光共振を利用することで顕微鏡画像からは判別困難なサイズ減少を直接測定できることが示された。

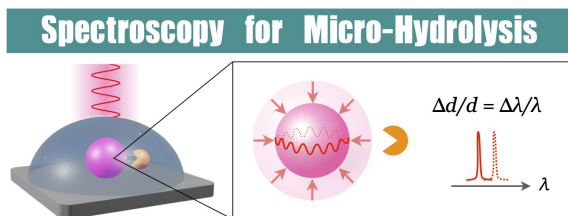


図4 シルク球体光共振器による、酵素分解モニタリングの模式図。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Takeuchi Akihide, Heah Wey Yih, Yamamoto Yohei, Yamagishi Hiroshi	4. 巻 59
2. 論文標題 Degradable optical resonators as in situ microprobes for microscopy-based observation of enzymatic hydrolysis	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Chemical Communications	6. 最初と最後の頁 1477 ~ 1480
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/D2CC05597J	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 Yamagishi Hiroshi, Fujita Keitaro, Miyagawa Junnosuke, Mikami Yuya, Yoshioka Hiroaki, Oki Yuji, Takada Naoki, Baba Soumei, Saito Shimpei, Someya Satoshi, Lin Zhan Hong, Huang Jer Shing, Yamamoto Yohei	4. 巻 17
2. 論文標題 Pneumatically Tunable Droplet Microlaser	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Laser & Photonics Reviews	6. 最初と最後の頁 2200874
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/lpor.202200874	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 該当する

1. 著者名 Ihara Yuta, Yamagishi Hiroshi, Naito Masanobu, Yamamoto Yohei	4. 巻 4
2. 論文標題 Machine learning of organic solvents reveals an extraordinary axis in Hansen space as indicator of spherical precipitation of polymers	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Aggregate	6. 最初と最後の頁 e365
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/agt2.365	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 Tanji Noriharu, Miyagawa Junnosuke, Yamamoto Yohei, Nakashima Takuya, Yamagishi Hiroshi	4. 巻 52
2. 論文標題 Inclusion of Dye in Cyclodextrin for Isotropically Radiative Robust Droplet Laser toward Lens-free Remote Optical Detection	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Chemistry Letters	6. 最初と最後の頁 696 ~ 699
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1246/cl.230275	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 Ihara Yuta, Yamagishi Hiroshi, Lin Chen, Jhu Cang-He, Tsai Meng-Che, Horie Masaki, Yamamoto Yohei	4. 巻 55
2. 論文標題 Hydrothermal crosslinking of poly(fluorenylamine) with styryl side chains to produce insoluble fluorescent microparticles	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Polymer Journal	6. 最初と最後の頁 547 ~ 553
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41428-022-00679-z	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 該当する

1. 著者名 Yamagishi Hiroshi	4. 巻 58
2. 論文標題 Functions and fundamentals of porous molecular crystals sustained by labile bonds	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Chemical Communications	6. 最初と最後の頁 11887 ~ 11897
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/D2CC04719E	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 -

〔学会発表〕 計24件 (うち招待講演 4件 / うち国際学会 9件)

1. 発表者名 Suharman, Heah Wey Yih, Hiroshi Yamagishi, Yohei Yamamoto
2. 発表標題 Poly(lactic acid) Stereocomplex Microspheres as Thermally Tolerant Optical Resonators
3. 学会等名 SACSEM 9th (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Kentaro Maejima, Hiroshi Yamagishi, Ken Albrecht, Youhei Takeda, Yohei Yamamoto
2. 発表標題 Photo-responsive ultrafast water vapor release from porous molecular crystal for space humidification and actuation of plain film
3. 学会等名 SACSEM 9th (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Hsin Yen Liao, Yohei Yamamoto, Hiroshi Yamagishi, Heah Wey Yih
2. 発表標題 Self-assembly microsphere WGM sensor based on hyaluronic acid
3. 学会等名 SACSEM 9th (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 山本 洋平、大木理、山岸洋、Wenbo Lin、岩本敏
2. 発表標題 キラル 共役ポリマーからなるねじれ双極マイクロ球体における方位選択的な光閉じ込め
3. 学会等名 第72回高分子討論会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 野口俊一郎、山岸洋、山本 洋平
2. 発表標題 共役ポリマーの共集合によるパッチ状コロイド粒子の自発形成と経時モニタリングによる形成機構の解明
3. 学会等名 第72回高分子討論会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 山岸洋、丹治憲治、山本 洋平
2. 発表標題 微小液滴共振器を利用した光センサーの開発
3. 学会等名 第84回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 山岸 洋, 山本 洋平
2. 発表標題 機能性有機材料を用いた微小光共振器の開発
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 Hiroshi Yamagishi
2. 発表標題 Optical Micro-resonators from Functional Organic Materials
3. 学会等名 Spring Meeting of PSK (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Hiroshi Yamagishi, Keitaro Fujita, Yohei Yamamoto
2. 発表標題 Highly robust and pneumatically tunable organic droplet laser
3. 学会等名 Gordon Research Conference (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Masato Kato, Hiroshi Yamagishi, Yohei Yamamoto
2. 発表標題 Electrically Switchable Organic Droplet Laser
3. 学会等名 Gordon Research Conference (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Sota Nakayama, Hiroshi Yamagishi, Yohei Yamamoto
2. 発表標題 Anisotropic Circularly Polarized Luminescence from Self-assembled Prolate Microspheroids of Conjugated Polymer with Chiral Dopant
3. 学会等名 Gordon Research Conference (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Hiroshi Yamagishi, Akihide Takeuchi, Yohei Yamamoto
2. 発表標題 Microscopic observation of hydrolysis reaction of polymer particles by optical resonance
3. 学会等名 第72回高分子学会年次大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Wey Yih Heah, Hsinyen Liao, Junnosuke Miyagawa, Hiroshi Yamagishi, Yohei Yamamoto
2. 発表標題 High monodispersity microspheres through inkjet technique for whispering gallery mode resonator fabrication
3. 学会等名 第72回高分子学会年次大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Suharman, Wey Yih Heah, Hiroshi Yamagishi, Yohei Yamamoto
2. 発表標題 Stereocomplex Crystalization of PLLA/PDLA Microsphere as Heat Resistant Microresonator
3. 学会等名 第72回高分子学会年次大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 佐藤駿里、山岸洋、山本 洋平
2. 発表標題 温度応答性高分子を用いたマイクロ光共振器の作製
3. 学会等名 第72回高分子学会年次大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 中山颯大、大木理、山岸洋、山本 洋平
2. 発表標題 キラロドーパントを混合した共役ポリマー自己組織化楕円球体からの異方的な円偏光発光
3. 学会等名 第72回高分子学会年次大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 青柳舜也、山岸洋、山本 洋平
2. 発表標題 共役ポリマーによる極小螺旋リング共振器の開発
3. 学会等名 第72回高分子学会年次大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 野口俊一郎、大木理、山岸洋、山本 洋平
2. 発表標題 共役ポリマーの共集合によるパッチ状マイクロ構造体の形成
3. 学会等名 第72回高分子学会年次大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 宮川順乃介、山岸洋、馬場宗明、山本 洋平
2. 発表標題 インクジェットプリントによる液滴レーザーアレイの大規模構築
3. 学会等名 レーザー学会学術講演会第43回年次大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Noriharu Tanji, Hiroshi Yamagishi, Keitaro Fujita, Yohei Yamamoto
2. 発表標題 An Active Nanoporous Optical Resonator for Detection of Gaseous Pollutant at ultra-low Concentration
3. 学会等名 International Conference on the Science and Technology of Synthetic Metals (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 山岸洋
2. 発表標題 Chemically Tailored Optical Resonators for Sensing and Energy Harvesting
3. 学会等名 第71回高分子学会年次大会 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 井原悠太、Chen Lin、Can-He Jhu、山岸洋、堀江正樹、山本洋平
2. 発表標題 熱架橋性発光ポリマーの微粒子化と水熱不溶化法の開発
3. 学会等名 第71回高分子学会年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Hiroshi Yamagishi, Noriharu Tanji, and Yohei Yamamoto
2. 発表標題 Self-assembly of luminescent microporous polymer toward optical resonators and lasers with enhanced gas adsorption capability
3. 学会等名 27th Microoptics Conference (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 山岸 洋
2. 発表標題 自己組織化を用いた有機光共振器センサーの開発
3. 学会等名 高分子加工技術研究会 第96回例会 (招待講演)
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計4件

産業財産権の名称 超撥イオン液体基板、レーザー発振装置、ディスプレイ、レーザー発振装置の製造方法	発明者 国立大学法人筑波大学	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特願2023-015332	出願年 2023年	国内・外国の別 国内

産業財産権の名称 光学素子、光線制御装置とその製造方法、およびディスプレイ	発明者 国立大学法人筑波大学	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特願2024-062366	出願年 2024年	国内・外国の別 国内

産業財産権の名称 光共振器とその製造方法	発明者 山岸洋	権利者 筑波大学
産業財産権の種類、番号 特許、特願2022-128956	出願年 2022年	国内・外国の別 国内

産業財産権の名称 超撥イオン液体基板、レーザー発振装置、ディスプレイ、レーザー発振装置の製造方法	発明者 山岸洋	権利者 筑波大学
産業財産権の種類、番号 特許、特願2023-015332	出願年 2022年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

山本・山岸研究室
https://www.ims.tsukuba.ac.jp/~yamamoto_lab/publication.html

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

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		
ドイツ	University of Jena	Leibniz Institute of Photonic Technology	
中国	National yang ming chiao tung university	National Tsing Hua University	