

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 4 年 5 月 27 日現在

機関番号：14401

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2019～2021

課題番号：19K22062

研究課題名（和文）「乱雑さの制御」による新たな透過型光材料の開発

研究課題名（英文）Development of Novel Transmissive Light-Diffusing Material based on the Control of Disorder

研究代表者

齋藤 彰 (SAITO, Akira)

大阪大学・工学研究科・准教授

研究者番号：90294024

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,900,000円

研究成果の概要（和文）：本計画の主題はモルフォ蝶の特異な光学特性、特に「ナノの乱雑さ」に基づく新たな透過型光拡散材料の開発である。光が入射する物体で「入射界面付近に限定したナノスケールの乱雑構造」を工夫することで、「高透過率・広角拡散・波長分散なし」を並立する従来にない「モルフォ型光拡散板」が可能になった。設計と検証から試作を経て、「透過率85%、角度広がりFWHM 66°、波長分散なし」と設計値に近い性能を示し、透過率と拡散性の双方で従来型を凌駕することが分かった。また、構造設計により、従来型では困難だった拡散光形状の異方性制御も確認した。以上の点から、モルフォ型光拡散板の実証を示すことができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

「高透過率・広角拡散・波長分散なし」を並立する従来にない「モルフォ型透過光拡散材」について、構想だった当初段階から、設計・実作による基本性能の実証ができた。これにより、理想的な採光窓、およびディフューザーへ開発の道筋が開けた。冒頭の3条件を並立できるだけでなく、フィルム状でコンパクトな上、特に拡散後の光形状制御が可能な点は、従来型に全くない特長である。まず省エネルギーで価値が高い上、ディフューザーは照明への応用に大きな意義がある。特に明るさ・光効率に加えて演色性、つまりカラーレンダリングにおいて色再現性の高さ、の点で従来の照明に対する大きな変革になり得る。

研究成果の概要（英文）：This project aims for the development of a new transmissive light-diffusing material based on the unique optical properties of Morpho butterflies, especially "nano-disorder". A new "Morpho-type light diffuser" having "high transmittance, wide-angle spread, and no color dispersion" at the same time was enabled by contriving a "nanoscale random structure" limited at the incident interface of the material. After feedback among the design, trial production and verification, it showed performance close to the design value of "transmittance of 85%, FWHM 66° in angular spread, and no wavelength dispersion", and it was found that it surpasses the conventional-type diffusers in both transmittance and diffusivity. We also confirmed anisotropic diffusion that was enabled by the anisotropic structural design, which was difficult with the conventional type. From the above points, we were able to demonstrate the effectiveness of the Morpho-type optical diffuser.

研究分野：応用光学、表面科学、バイオミメティクス、放射光、プローブ顕微鏡

キーワード：ナノ構造 乱雑さ 透過光 モルフォ蝶 ディフューザー 採光窓 バイオミメティクス 照明

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

通常、窓を通る太陽光は直進し、ゆえに室内を広く照らすには照明が必要である。光を大きく曲げられれば照明を大幅に減らせるが、それには散乱か、屈折・回折格子の手段があり得る。しかし、散乱では広角拡散のために散乱を増やすと多重散乱で透過率が減ってしまう。また屈折や回折格子を使うと、色分散で虹色になってしまう。よって外部の光を「高透過で」「広角に通し」「色づかない」3条件が並立する理想的な透過特性は、原理的に不可能であった。ほかに照明を使わず外部光を室内に導くには「光ダクト」がある。しかし、建物の屋上に明かり取りの窓を設け、それをダクトで室内の天井に導く方式では大規模な設備を要し、後で変更などの融通性が乏しい上、天候に大きく左右されてしまう。

光を「明るいまま」「広げて」「色づかない」状態で拡散させる利点は、上記の「採光窓」だけでなく、省エネ型ビニルハウス等、幅広い応用がある。特に光拡散板は、室内の「照らされる」側だけでなく、プロジェクタも含めた照明に至る「照らす側」で大きな需要がある。なぜなら、撮影や展示に代表される「対象を正しく見る」ための照明には「明るさ、拡散、色分散なし」が必要だからである。演色性(色の再現性)の語に代表されるように、対象を正しく見るには、全天空の太陽光における拡散光源が理想的な光源である(ヒトの目はそうした環境で進化してきたため)。しかし、LEDに代表される照明では、スペクトル上は太陽光を再現できても、拡散については別の道具立てが必要である。このため、撮影でも展示でも、反射板や透過拡散板に頼らざるを得ない。ところが反射板では大掛かりになり光路も増して暗くなり、透過拡散板では透過率の低下や色変化、さらに拡散の不足が深刻な問題で、理想的な照明がない、というのが現状である。

2. 研究の目的

本研究の目的は、生物に学んだ「ナノの乱雑さ制御」に基づく、新たな透過型の光材料開発である。その原理は、代表者が研究してきたモルフォ蝶の特異な光学特性に依拠する。本材料は、外部の光を「高透過で」「広角に通し」「色づかない」理想的な透過特性をもつ。通常、上の3条件の並立は不可能で、それは光を広角で曲げるにあたり、屈折や回折格子では色分散があり、散乱では透過率を損なってしまう、不都合なためである。しかしモルフォ蝶の光特性を応用すると、3条件並立は原理的には可能となる(図1)。つまり端的には、ナノスケール幅の細い構造を乱雑に並べる、という方法である。散乱は、従来型の拡散板(拡散板内部に埋め込まれた微小球が多重散乱を生じる)と異なり、入射界面だけで起きるので透過率の損失が少なく、角度広がりも狭い構造幅に基づく回折広がりによって担保できるので広角で、一方で乱雑なので虹色にならない。

しかし当初、前項の通りこうした光透過材料は存在しなかった。そこで、まずはその証明と、そのための設計から開始し、最終的に実作による実証という流れが必要である。そこで本研究では、代表者がモルフォ型の反射光材料で蓄積してきた計測技術、電磁場解析による設計、ナノ加工・作製技術を集約し、上記の新規な透過型光材料の特性を実証することを目的とした。

本材料の実現は、「広角に明るい窓」で室内照明を削減して大きな省エネを実現するだけでなく、採光窓の延長として省エネ型ビニルハウス等、広く役立つことが期待される。特にナノインプリントを用いてフィルム状に形成できるため、既存の窓に貼り付けて使えば、広く簡便に普及できる。さらに、窓でなく光源としての応用も重要な目的である。特に演色性という観点で、レ

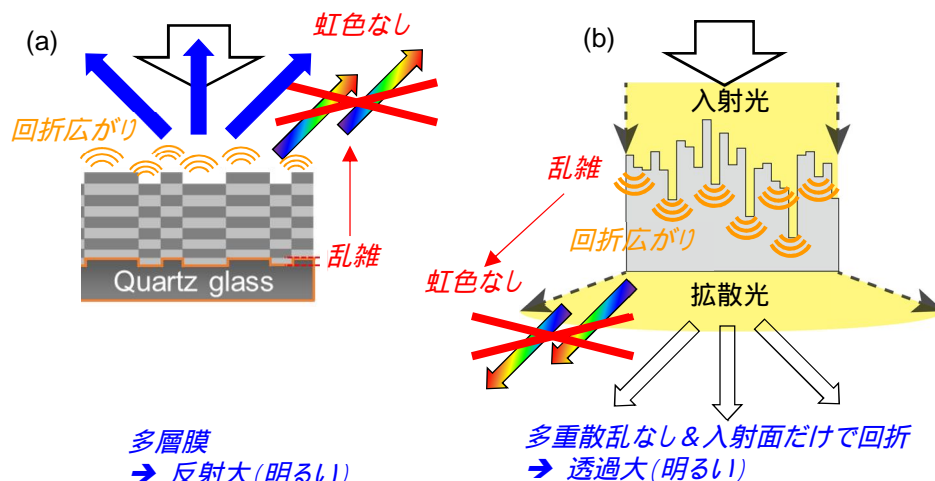


図1 . (a) 反射型モルフォ発色から (b) 透過への転換と、原理的な対応関係。
(A. Saito *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. 61 (2022), SD0801.より改変)

ンズフリーで理想的な広角拡散特性をもつ新たな照明を代表に、「透過率が高く」「広く拡散し」「色温度の変化が少ない」拡散光源を作れる等、幅広い応用に利する。

3. 研究の方法

上で述べた「ナノの乱雑さ制御」に基づく、新たな透過型の光材料開発にあたり、最初の手順はシミュレーションによる可能性の証明、そのための設計(3D ナノ構造)である。そこで FDTD 法(電磁場数値計算)を用いた構造設計を行った。乱雑な幅からなるナノパターンを設計し主要パラメータを振って構造を最適化することで、上記の光学特性における所定の値(透過率、角度広がり、波長分散)を見積もる。

一方、その設計をモノづくりに展開する上で、作製上の困難(3D ナノ構造の高アスペクト比)を解消する必要があった。ここで、反射型モルフォ発色材の「構造と光特性の関係」をもとに、3D 構造(深さ方向のナノ乱雑さ)による光学特性を 2D 構造(面内のナノ乱雑さ)で実現するための原理を構築した。

これを受けて、目的の光学特性を実現できる簡便な 2D 構造を設計した。やはりここでも、FDTD 法によるシミュレーションでナノ構造のパラメータを振って構造の最適化を行うが、概念的な設計上の工夫も行う必要があった(具体的には、統計分布関数の考慮、幅広い波長域への対処、材料の選択、など)。

「実現可能な構造」をシミュレーションで得たのちは、最終的に実作による実証という流れで上記の理想的な透過拡散材を作製した。具体的には、設計した構造を半導体ベースのナノ製造技術を用いて基板上に作製する。ここでは、リソグラフィと反応性イオンエッチングによる微細構造作製を駆使し、設計したナノパターンを Si ウエハ上に作製した。さらに光拡散板としての用途を踏まえ、半導体基板上に作製したナノ構造をモールドとして、UV 硬化樹脂にナノインプリントでフィルム形成を行う。最後に作製した光拡散材に対し、構造・光特性とともに精密な光学測定を行い、評価を行った。上記の過程では、代表者がモルフォ型の反射光材料で蓄積してきた計測技術、電磁場解析による設計、ナノ加工・作製技術を集約し、新規な透過型光材料の特性を実証した。

4. 研究成果

上述した方針と、方法・手順に基づく計画を受け、「ナノ乱雑構造」を工夫することで、新たな「モルフォ型透過光拡散材」を作製した。それは「高透過率・広角拡散・波長分散なし」を並立する、従来にない透過光拡散材である。

光学測定の結果、本試作品は「透過率 85%、角度広がり FWHM 66°、波長分散なし」と設計値に近い性能を示し、透過率と拡散性の双方で従来型を凌駕することが分かった。特に高透過率と広角拡散は従来、両立しないトレードオフ関係にあったが、その限界を打破する端緒を開くことができた。

加えて、異方的な構造設計により、従来型では困難だった「拡散形状の異方性」も確認できた。具体的には、従来透過光の分布パターンは等方的な円形であったが、本拡散材を透過した光の分布パターンは長方形に近い形状であった。こうした異方性の実現は、微小球からの散乱に基づく普及型の拡散板では原理的に不可能である。以上の点から、新規なモルフォ型ディフューザの基本性能を実証できた。一方、得られた特性はまだ完全ではなく、指向性の強いコリメート光では、拡散光の分布に不具合が見られる等、改善点も見出されたが、その改善方法についても検討中である。

得られた上記の結果は、前項 1.でも述べた従来型(現在、市場で流通している透過型拡散板)との性能比較を行うことで、より典型的に示すことができる(図 2)。

成果について重要な点として、新たな透過型拡散板を開発したことに加え、その方法論の確立も挙げられる。つまり設計では、FDTD 法(電磁場数値計算)を用いた構造設計を行った。乱雑な幅からなるナノパターンを設計し主要パラメータを振って構造最適化した結果、シミュレーション上で各種物理特性(透過率、角度広がり、色分散など)の評価が可能になった。次に、リソグラフィによる微細構造作製を駆使し、設計したナノパターンを Si ウエハ上に作製し、最後に、UV 硬化樹脂にナノインプリントすることで、モルフォ型ディフューザの試作を行った。

この工程では、作製後の性能チェック(構造評価と光特性評価の両面での結果)を受けて、エラー(光特性のエラーを生む構造エラー)があれば製造工程にフィードバックし、またその過程でシミュレーションを用いて製造工程に調整を加える、といった「作る・測る・予測する」の相互プロセスによる効率化を図ることができた。

上記を受けて、実績として論文 5 件、解説 8 件、書籍 2、招待講演 7、招待以外での国際会議の講演 7、特許出願 1、などの成果が得られた。

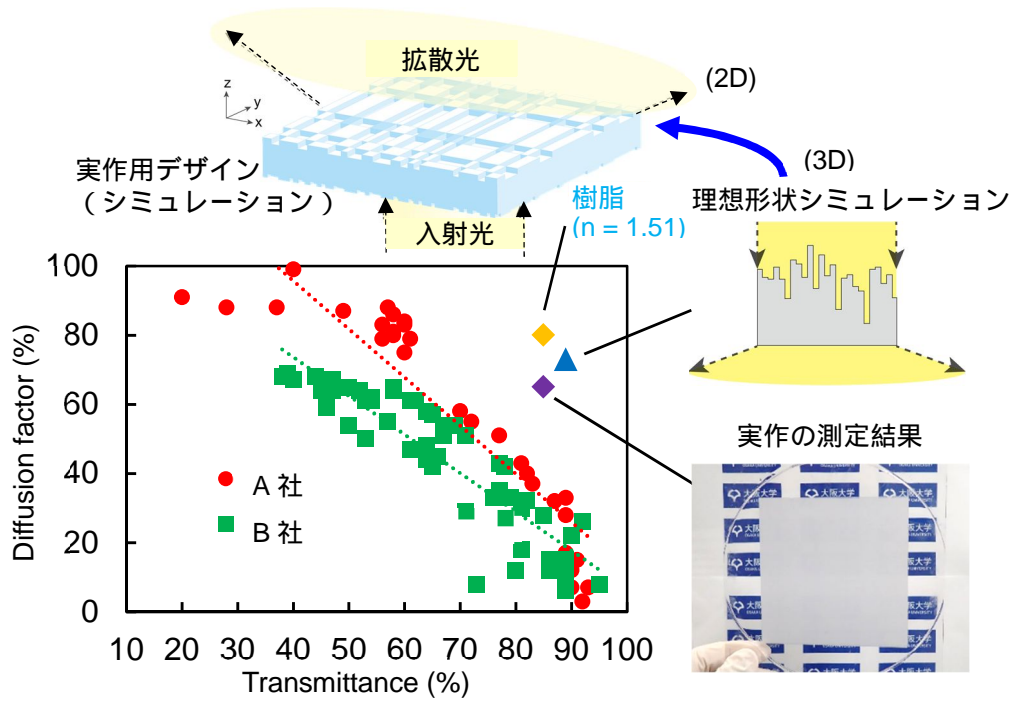


図2 . 異なる光拡散材について、拡散係数と透過率の比較。赤○と緑 ■ のプロットはそれぞれ市販品の結果であり、補助線 (点線) の通り、トレードオフの関係がわかる。他のプロットで青 ▲ は当初の理想形状 (3D) の計算結果、黄色 ◆ はそれを実作用に 2D 化したモデルの計算結果、紫 ■ は実作の測定結果である。

(K. Yamashita, A. Saito *et al.*, Opt. Express 29(19) (2021), 30927. より改変。)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計14件（うち査読付論文 11件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 K. Yamashita, M. Fukihara, Y. Hirai, Y. Kuwahara, A. Saito	4. 巻 59 (5)
2. 論文標題 Elucidating the mystery of Morpho-blue using in-plane randomness: toward simple nanofabrication	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Jpn. J. Appl. Phys.	6. 最初と最後の頁 052009_1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/ab8c19	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 K. Yamashita, Y. Kuwahara, A. Saito	4. 巻 11374
2. 論文標題 Optical analysis on the Morpho butterfly's in-plane randomness using three-dimensional FDTD simulations	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proc. SPIE.	6. 最初と最後の頁 1137406_1-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1117/12.2558469	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 齋藤彰	4. 巻 3
2. 論文標題 Biomimexpo2019	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Biomimetica	6. 最初と最後の頁 25-26
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 齋藤彰、山下和真、桑原裕司	4. 巻 90(5)
2. 論文標題 構造色を用いたバイオミメティクス：光材料の現状と展望	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 金属	6. 最初と最後の頁 384-391
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 齋藤彰	4. 巻 55(7)
2. 論文標題 総説: バイオミメティクスとは何か? 昆虫工学	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 昆虫と自然	6. 最初と最後の頁 2-4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 齋藤彰、山下和真、桑原裕司	4. 巻 63(11)
2. 論文標題 構造発色型光材料とナノインプリントの新たな関係	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 表面と真空	6. 最初と最後の頁 580-585
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1380/vss.63.580	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 齋藤彰	4. 巻 2
2. 論文標題 Biomimeticsフランスの動向: Biomimexpo2018	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Biomimetica	6. 最初と最後の頁 44-46
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 -

1. 著者名 齋藤彰	4. 巻 1
2. 論文標題 第三の色「構造色」~生物の多彩な戦略と、意外な応用	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 アカデミスト	6. 最初と最後の頁 12-13
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 齋藤彰	4. 巻 106
2. 論文標題 生物学と工学で見る電気系技術者のためのよく分かるバイオミメティクス モルフォ蝶	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 月刊オーム	6. 最初と最後の頁 30-31
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 -

1. 著者名 A. Saito, K. Yamashita, T. Shibuya, and Y. Kuwahara	4. 巻 38 (5)
2. 論文標題 Daylight window based on the nano-disorder inspired by Morpho butterflies' coloration	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 J. Opt. Soc. Am. B	6. 最初と最後の頁 1532-1537
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/JOSAB.422426	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 K. Yamashita, K. Kunitsu, T. Hattory, Y. Kuwahara, A. Saito	4. 巻 29 (19)
2. 論文標題 Demonstration of a diffraction-based optical diffuser inspired by the Morpho butterfly	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Opt. Express	6. 最初と最後の頁 30927-30936
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OE.436193	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 齋藤彰	4. 巻 76 (7)
2. 論文標題 化学掲示板：モルフォ蝶の青い翅をヒントに明るい採光窓を考案	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 化学	6. 最初と最後の頁 73
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 -

1. 著者名 A. Saito, K. Yamashita, T. Hattori, and Y. Kuwahara	4. 巻 61
2. 論文標題 Novel optical applications inspired by the Morpho butterfly's coloration: technology transfer from reflection to transmission	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Jpn.J.Appl.Phys.	6. 最初と最後の頁 SD0801
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/ac571d	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 齋藤彰	4. 巻 61
2. 論文標題 反射に加え透過でも役に立つモルフォチョウの光学特性	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 あたりあ(日本金属学会)	6. 最初と最後の頁 in press
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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15件(うち招待講演 8件/うち国際学会 9件)

1. 発表者名 A. Saito, K.Yamashita, Y. Kuwahara
2. 発表標題 Optical analysis on the Morpho butterfly's in-plane randomness using three-dimensional FDTD simulations
3. 学会等名 SPIE Smart Structures and Materials & Nondestructive Evaluation and Health Monitoring (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 K.Yamashita, K.Kunitsu, Y.Kuwahara, and A. Saito
2. 発表標題 Fabrication of a novel optical diffuser inspired by the Morpho butterfly
3. 学会等名 MNC 2020 (33rd MNC) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 K.Yamashita, M. Fukihara, Y. Hirai, Y. Kuwahara, and A. Saito
2. 発表標題 Investigation of the remaining mystery on in-plane randomness of the Morpho-blue using FDTD simulations; toward easier nano-fabrication design
3. 学会等名 32nd Inter'l Microprocesses and Nanotechnology Conference, MNC2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 K.Yamashita, Y. Kuwahara, and A. Saito
2. 発表標題 Simplification of 3D nanodesign inspired by Morpho butterfly's randomness
3. 学会等名 RIE Cooperative Research Workshop (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Akira Saito
2. 発表標題 Concept of the Workshop "Living MateriArchitecture"
3. 学会等名 Workshop Living MateriArchitecture (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 齋藤彰
2. 発表標題 陣羽織の羽根は誰のもの？
3. 学会等名 兵庫県立人と自然の博物館：企画展「JAPAN COLOR」(招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 齋藤彰
2. 発表標題 Biomim'expo 2019と、その周辺
3. 学会等名 バイオミメティクス研究会19-3 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 A. Saito, K.Yamashita, T.Hattori, Y. Kuwahara
2. 発表標題 Novel design of optical diffuser inspired by the Morpho butterfly
3. 学会等名 34th International Microprocesses and Nanotechnology Conference (MNC2021) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 K.Yamashita,Y. Hirai, Y. Kuwahara, and A. Saito
2. 発表標題 Development of a Morpho butterfly-inspired optical diffuser with high controllability
3. 学会等名 34th International Microprocesses and Nanotechnology Conference (MNC2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kazuma Yamashita, Kentaro Kunitsu, Takuma Hattori, Yuji Kuwahara, and Akira Saito
2. 発表標題 Demonstration of a diffraction-based optical diffuser: inspiration from the Morpho butterfly's nanostructure
3. 学会等名 47th Micro and Nano Engineering Conference (MNE 2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 齋藤彰
2. 発表標題 生物の「表面」がもつ驚きの光機能と、その応用 ~蝶の色から建築まで~
3. 学会等名 表面真空学会 市民講座（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 齋藤彰
2. 発表標題 生物の優れた光学特性に学ぶ表面技術 ~反射から透過へ、発色から採光まで~
3. 学会等名 表面真空学会 実用新技術セミナー（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 齋藤彰
2. 発表標題 反射でなく透過にも広く役立つ、モルフォ蝶の乱雑ナノ構造
3. 学会等名 2022年第1回ナノインプリント技術研究会（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 A. Saito, J. Ohga, K. Yamashita, T. Hattori, Y. Kuwahara
2. 発表標題 Realistic design to fabricate the daylight window inspired by Morpho butterfly's optical property
3. 学会等名 SPIE Smart Structures + NDE（国際学会）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 齋藤彰
2. 発表標題 蝶のナノ構造に基づく新たな透過型光材料
3. 学会等名 応用物理学会 次世代リソグラフィ技術研究会ワークショップ(招待講演)
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計3件

1. 著者名 齋藤彰(分担執筆)	4. 発行年 2021年
2. 出版社 CMC出版	5. 総ページ数 367
3. 書名 バイオミメティクス・エコミメティクス 持続可能な循環型社会へ導く技術革新のヒント	

1. 著者名 齋藤彰(分担執筆)	4. 発行年 2019年
2. 出版社 オーム社	5. 総ページ数 802
3. 書名 ナノインプリント技術ハンドブック(Chap. 13, p12-16)	

1. 著者名 Akira SAITO(分担執筆)	4. 発行年 2022年
2. 出版社 Pan Stanford Publishing Pte. Ltd.	5. 総ページ数 340
3. 書名 Ed. A. Miyauchi and M. Shimomura, Biomimetics -Connecting Ecology and Engineering by Informatics- (Chap. 9)	

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 積層薄膜片	発明者 齋藤彰、山下和真、 國津健太郎、大谷紘 平、渡辺恵悟、紺野	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特願2022-029842	出願年 2022年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔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
--	---------------------------	-----------------------	----

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1件

国際研究集会 Workshop on Living MateriArchitecture	開催年 2020年～2020年
---	--------------------

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