

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 6 月 9 日現在

機関番号：32682

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K03755

研究課題名（和文）折紙の数理によるコア構造の機械的特性の設計

研究課題名（英文）Design of mechanical properties of core structures based on science of origami

研究代表者

石田 祥子 (Ishida, Sachiko)

明治大学・理工学部・専任准教授

研究者番号：40636502

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,100,000円

研究成果の概要（和文）：ハニカムコアは軽量高強度な構造として普及しているが、高い機械特性を有するのは面外方向に対してであり、一様な正六角形で構成されるハニカムコアは、ある荷重で座屈が一気に進展するため、衝撃吸収性能が良いとは言えない。本研究では、甲虫の外殻に見られる形状を取り入れた新ハニカムコアを設計し、面外強度、プラトー応力、エネルギー吸収量が従来の正六角形ハニカムコアと同等あるいはそれよりも数十%向上することを明らかにした。また、クランクスライダ機構を用いたせん断実験手法を構築し、半径方向の荷重を支持できる円筒ハニカムコアに円周方向のせん断力を負荷した場合のせん断剛性と設計パラメータの関係を定量的に明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

構造の軽量高強度化は、輸送機器や産業機械等の燃費の向上、建築物等においても資源の大幅な節約、ごみの削減につながる。本研究の甲虫の外殻に見られる形状を取り入れた新ハニカムコアは従来のハニカムコアと同等あるいはそれよりも高い機械的特性を有することから、従来のハニカムコアに置き換えることにより、持続可能な社会の実現へと貢献できる。

本研究の甲虫の外殻に見られる形状を取り入れた新ハニカムコアおよび円筒ハニカムコアはいずれもハニカムコアの産業的製造手法で製造できるように設計されている。研究段階から学術的知見を産業へ技術移転することを視野に入れており、大量生産可能な形状であることは産業的に価値が高い。

研究成果の概要（英文）：Honeycomb cores are widely used as lightweight-yet-strong structures. However, such high mechanical properties can be obtained only to the out-of-plane direction, and the high energy absorption capability can not be expected as the uniform configuration of regular hexagons yields progressive buckling deformation at a given load. In this study, we designed new honeycomb cores consisting of a combination of regular hexagons with squares, inspired by structures observed on the outer shells in beetles. The out-of-plane strength, plateau stress, and energy absorption of the new bio-inspired honeycomb cores were equivalent or higher than those of the hexagonal honeycomb cores. In addition, we developed an experimental method using a crank-slider mechanism to measure circumferential sharing stiffness of cylindrical honeycomb cores designed for supporting radial load, and clarified the quantitative relations between the circumferential sharing stiffness and the honeycomb configuration.

研究分野：設計工学 折紙工学

キーワード：コア構造 複合材 メタマテリアル 塑性変形 折紙

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

構造の軽量高強度化は、輸送機器や産業機械等の燃費の向上、建築物等においても資源の大幅な節約、ごみの削減につながり、持続可能な社会の実現へと貢献する重要な技術である。ハニカムコアは軽量高強度な構造として広く普及しているが、高い機械特性を有するのは面外方向に対してのみであり、面内方向の荷重に対して剛性は低い。また、衝撃荷重に対しては、ハニカムコアの座屈荷重はコア寸法および材料で決まる。一様な正六角形の連なりで構成されるハニカムコアは、ある荷重値において座屈が一気に進展し荷重値が変動するため、衝撃吸収性能が良いとは言えない。このような観点から、Miura (ISAS Rep., 1972)によるZetaコア、Saito et al. (J. Sol. Mech. Mat. Eng., 2007)によるトラスコア、Kooistra (Mater. Des., 2007)によるLattice トラスコア等、様々なジオメトリを持つコア構造が研究されている。しかし、コア構造の性能、製造方法やコスト、使用環境等を多面的に判断しても、ハニカムコアが現在最も汎用的に使用されていることから、ハニカムコアの優位性は明らかである。

2. 研究の目的

本研究の目的は「コア構造の機械的特性を折紙の数理を用いて設計する手法の確立とその機械的性能の評価」である。予備研究のラジアル荷重を支持する円筒状ハニカムコアの知見を基に、より複雑に荷重が作用するハニカムコアおよび生物に見られる形状を取り入れた高い強度を持つ新ハニカムコアを設計し、実験および有限要素解析により圧潰、せん断に対する性能を評価する。

3. 研究の方法

(1) 折紙の数理による新ハニカムコアの設計

折紙の数理を基に、従来のハニカムコア(図1左)よりも面外強度を向上させた新たなハニカムコア(図1中央、右)を設計した。本ハニカムコアはカブトムシの鞘翅に見られる構造が面外強度の向上に貢献していることから、類似した構造をハニカムコアに内包させたものである。さらに、従来のハニカムコアと同様の製造法(コルゲート法)を踏襲できるように、折紙の数理に基づいて形状を設計した。有限要素解析および実験により、本ハニカムコアを面外方向に圧潰、せん断変形させ、それぞれの変位と荷重の関係を得た。

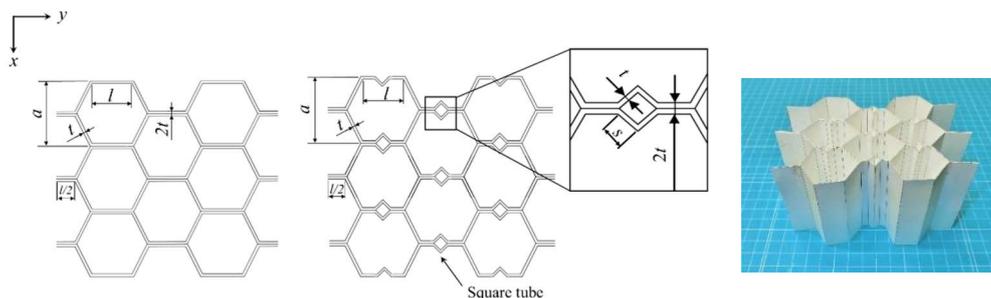


図1 従来ハニカムコア(左)と新ハニカムコア(中央)の概形および新ハニカムコア紙製模型(右)
(文献[1], [2]より抜粋)

(2) 円筒ハニカムコアのせん断剛性

円筒ハニカムコア([Ishida et al., J. Adv. Simulat. Sci. Eng., 2020], [Ishida, Mech. Eng. J., 2018])を自動車用タイヤに適応した際[18, 22], 車重による面外圧潰ではなく駆動トルクによるせん断荷重により圧潰したことから、円筒ハニカム(図2左)の円周方向のせん断剛性を算出できるせん断実験手法を構築した(図2右)。クランクスライダ機構を用いて圧縮試験機の並進距離を回転距離に変換し、与えた変位とトルクの関係から円筒ハニカムコアのせん断剛性を算出した。

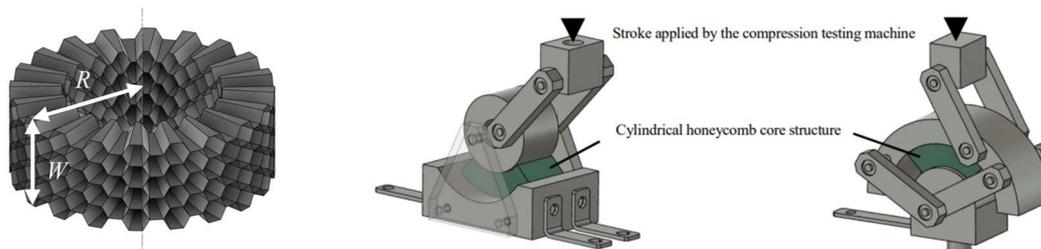


図2 円筒ハニカムコアの概形(左)とクランクスライダ機構を用いたせん断実験装置(中央、右)
(講演論文[8]より抜粋)

4. 研究成果

(1) 折紙の数理による新ハニカムコアの設計

有限要素解析により、ある設計パラメータにおいて本ハニカムコアの面外圧潰強度が従来のハニカムコアに対して数十%向上することが確認できた[2, 14]. 本成果は形状の意匠性、製造法および機械的特性の観点から特許を出願した. 準静的圧潰実験および落錘実験により、コアサイズと面外強度、プラトー応力、エネルギー吸収量との関係を明らかにした. 試験条件にもよるが、一般的に利用されるコアサイズの範囲内において、新ハニカムコアでは従来のハニカムコアと同等あるいはそれよりも数十%良好な結果が得られた[1, 9, 21]. 例として、図3に本ハニカムコアと従来ハニカムコアの面外強度の実験値を示す.

また、従来ハニカムコアのせん断剛性の理論式(Gibson & Ashby, 1999年)を拡張し、新ハニカムコアの付加的な角筒セルを考慮した理論式を立式した. 理論式、有限要素解析および準静的実験により、新ハニカムコアのせん断剛性は従来のハニカムコアのそれと同等という結果が得られた[7, 11]. 面外強度、せん断剛性はトレードオフの関係にないことから総合的に判断して、新ハニカムコアの機械的特性は従来ハニカムコアのそれよりも高いと言える.

さらに、技術移転も視野に入れ、汎用性の高い熱可塑性樹脂を用いて精度よく新ハニカムコアを製造するための成形条件を明らかにした[3, 10].

(2) 円筒ハニカムコアのせん断剛性

従来ハニカムコアのせん断剛性の理論式(Gibson & Ashby, 1999年)を拡張した円筒ハニカムコアの理論式を立式し、さらに有限要素解析によりせん断剛性の解析値を求めた. 実験値、理論値、解析値の定性的な傾向が一致することを確認した[5, 8, 12, 19]. 例として、図4に円筒ハニカムコアの内周側と外周側のせん断剛性の実験値をそれぞれ示す.

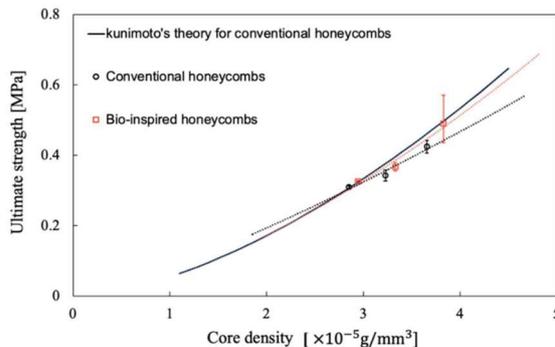


図3 生物を模倣した新ハニカムコアの面外強度
(文献[1]より抜粋)

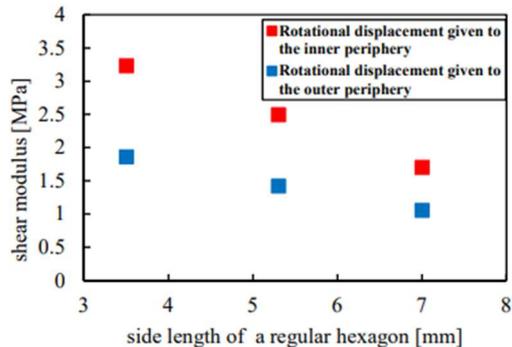


図4 円筒ハニカムコアのせん断剛性
(講演論文[8]より抜粋)

(3) 波及効果

本研究を通して、多様なコア構造を設計・製作する手法に関して海外研究機関(Swinburne University of Technology, Australia)との協力体制を構築できた. 切頂八面体を基にした多層コアパネル[13, 20]の製作を共同実施し、金属シートの多段階プレスによる成形手法とその成形条件を明らかにした[4, 6].

また、国内学会[16]および国際学会[15]から講演依頼があり、本研究の成果について招待講演を行った.

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 2 件)

- [1] Ben Yue, 石田祥子, 斉藤一哉, 大久保洋志, 生物を模倣した角筒を有するハニカムコアの面外圧潰特性, 設計工学, Vol. 56, No. 6, pp. 287-298, 2024年
- [2] 石田祥子, 折紙によるハニカムコア設計と機械的特性, 日本試験機工業技術情報誌 TEST, Vol. 63, pp. 3-6, 2022年

[学会発表] (計 20 件)

- [3] Sachiko Ishida, Enhanced designability of honeycomb cores, 10th International Congress on Industrial and Applied Mathematics, 20-25 August, 2023, Tokyo, Japan
- [4] Sachiko Ishida, Xinyi Zhang, Guoxing Lu, and Kohei Okayasu, Mechanical Properties of Truncated-octahedron-based Metamaterials, The 11th International Symposium on Impact Engineering (ISIE2023), 3-5 December 2023, Perth, Australia
- [5] Sachiko Ishida, Geometrical Design and Mechanical Properties of Origami-inspired Cylindrical Honeycomb Cores, Australia and New Zealand Industrial and Applied Mathematics (ANZIAM2024), 11-15 Feb, 2024, Adelaide, Australia
- [6] Sachiko Ishida, Xinyi Zhang, Guoxing Lu and Kohei Okayasu, Design and Fabrication

of Quasi-isotropic Origami Metamaterials, The 8th International Conference on Origami in Science, Mathematics and Education (8OSME), 16-18 July, 2024, Melbourne, Australia

- [7] 羽山涼介, 石田祥子, 生物を模倣した新形状ハニカムコアの設計変数による横弾性係数への影響, 日本機械学会 2023 年度年次大会, ポスター講演 J122p-11, 東京都立大学, 2023 年 9 月 3 日~6 日
- [8] 関澤光亮, 石田祥子, 円筒ハニカムコア構造のせん断実験による横弾性係数評価, 日本機械学会 2023 年度年次大会, ポスター講演 J191p-03, 東京都立大学, 2023 年 9 月 3 日~6 日
- [9] BEN YUE, 石田祥子, 館野寿丈, 生物を模倣した新形状ハニカムコアの衝撃エネルギー吸収特性, 日本設計工学会 2023 年度秋季研究発表講演会, 日本大学, 2023 年 9 月 22 日~23 日
- [10] 富岡由希, 石田祥子, 熱プレス成形による樹脂製生物模倣ハニカムコアの製法, 日本機械学会関東学生会第 62 回学生員卒業研究発表講演会, No. 311, オンライン, 2023 年 3 月 16 日
- [11] 羽山涼介, 石田祥子, 有限要素解析による生物を模倣した新形状ハニカムコアの横弾性係数評価, 日本応用数学会 研究部会連合発表会, 岡山理科大学, 2023 年 3 月 10 日
- [12] 関澤光亮, 石田祥子, 円筒ハニカムコア構造のせん断実験手法の提案, 日本応用数学会 研究部会連合発表会, 岡山理科大学, 2023 年 3 月 10 日
- [13] 岡安晃平, 石田祥子, 切頂八面体を基にした多層コアパネルのエネルギー吸収特性, 日本応用数学会 2022 年度年会, ポスター講演 No. P11, オンライン, 2022 年 9 月 8~10 日
- [14] Sachiko Ishida, Mudong Li, Kazuya Saito, Out-of-plane stiffness and strength of bio-inspired honeycomb cores with extra hollows, JSST2022 International Conference on Simulation Technology, pp. 379-381, 31 Aug -2 Sep, 2022, Online, Japan
- [15] Sachiko Ishida, Out-of-plane Strength of Cylindrical Honeycomb Cores: Application to Origami Tires, Asia Pacific Conference on Fracture and Strength, 6-9 Dec, 2022, Adelaide, Australia [招待講演]
- [16] 石田祥子, 折紙の数理と機械工学, 日本機械学会材料力学部門異分野融合研究会, 中央大学, 2023 年 3 月 8 日 [招待講演]
- [17] Mudong Li, Sachiko Ishida, Kazuya Saito, Numerical evaluation on the out-of-plane properties of bio-inspired honeycomb cores with extra hollows, JSST2021 International Conference on Simulation Technology, pp. 35-38, 1-3 Sep, 2021, Kyoto, Japan
- [18] 山口航矢, 浅上隆登, 稲本知也, 水谷建太, 伊藤大悟, 白瑩雪, 歌田大夢, 大石知宏, 田宰根, 須藤光, Fareez Ameerul Bin Rosdi, Mohamad Imran Shah Bin Said Akbar, 石田祥子, 折紙タイヤの設計と実車試験, 日本機械学会 第 31 回設計工学・システム部門講演会, No. 2502, オンライン, 2021 年 9 月 15~17 日
- [19] 山口雅貴, 石田祥子, 曲率半径を変更した円筒ハニカム構造のせん断弾性係数の評価, 日本応用数学会 2021 年度年会, 芝浦工業大学(オンライン), 2021 年 9 月 13~17 日
- [20] 岡安晃平, 石田祥子, 切頂八面体を基にした多層コアパネルの衝撃吸収特性, 日本機械学会 第 34 回計算力学講演会, 講演予稿集電子版 No. 57, 北海道大学(オンライン), 2021 年 9 月 21~23 日
- [21] BEN YUE, 山口峻平, 石田祥子, 生物を模倣した新形状ハニカムコアの強度とエネルギー吸収量の評価, 日本応用数学会 研究部会連合発表会, オンライン, 2022 年 3 月 9 日
- [22] 石田祥子, 折紙タイヤプロジェクト 2019 とその後, 明治大学 MIMS 現象数理学研究拠点 共同研究集会「折り紙の科学を基盤とするアート・数理 および工学への応用 II」, オンライン, 2021 年 12 月 2~3 日 [招待講演]

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 1 件)

名称: ハニカム構造体の製造方法及びハニカム構造体

発明者: 斉藤一哉, 石田祥子, 李牧東

権利者: 同上

種類: 特許

番号: 特願 2021-180491, 特開 2022-075629

出願年: 2021 年

国内外の別: 国内

○取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

機能デザイン研究室ウェブサイト(明治大学理工学部機械工学科)

<http://www.isc.meiji.ac.jp/~sishida/home.html>

東京学芸大学附属高校で特別授業を実施～10/28 日本経済新聞（高校生特別版）で掲載～

<https://www.meiji.ac.jp/koho/news/2022/mkmht0000001vdal.html>

明治大学研究ブランディング事業「設計・折紙」

<https://www.meiji.ac.jp/research/mathubiquitous/team03.html>

6. 研究組織

(1) 研究分担者

なし

(2) 研究協力者

なし

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 BEN YUE、石田 祥子、斉藤 一哉、大久保 洋志	4. 巻 56
2. 論文標題 生物を模倣した角筒を有するハニカムコアの面外圧潰特性	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 設計工学	6. 最初と最後の頁 287-298
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.14953/jjsde.2023.3006	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 石田祥子	4. 巻 63
2. 論文標題 折紙によるハニカムコア設計と機械的特性	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 日本試験機工業会技術情報誌TEST	6. 最初と最後の頁 3-6
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 -

〔学会発表〕 計20件（うち招待講演 3件/うち国際学会 6件）

1. 発表者名 Sachiko Ishida
2. 発表標題 Enhanced designability of honeycomb cores
3. 学会等名 The 10th International Congress on Industrial and Applied Mathematics (ICIAM2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Sachiko Ishida, Xinyi Zhang, Guoxing Lu, and Kohei Okayasu
2. 発表標題 Mechanical Properties of Truncated-octahedron-based Metamaterials
3. 学会等名 The 11th International Symposium on Impact Engineering (ISIE2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Sachiko Ishida
2. 発表標題 Geometrical Design and Mechanical Properties of Origami-inspired Cylindrical Honeycomb Cores
3. 学会等名 Australia and New Zealand Industrial and Applied Mathematics (ANZIAM2024)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Sachiko Ishida, Xinyi Zhang, Guoxing Lu and Kohei Okayasu
2. 発表標題 Design and Fabrication of Quasi-isotropic Origami Metamaterials
3. 学会等名 The 8th International Conference on Origami in Science, Mathematics and Education (8OSME) (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 羽山涼介, 石田祥子
2. 発表標題 生物を模倣した新形状ハニカムコアの設計変数による横弾性係数への影響
3. 学会等名 日本機械学会2023年度年次大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 関澤光亮, 石田祥子
2. 発表標題 円筒ハニカムコア構造のせん断実験による横弾性係数評価
3. 学会等名 日本機械学会2023年度年次大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 BEN YUE, 石田祥子, 舘野寿丈
2. 発表標題 生物を模倣した新形状ハニカムコアの衝撃エネルギー吸収特性
3. 学会等名 日本設計工学会2023年度秋季研究発表講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 富岡由希, 石田祥子
2. 発表標題 熱プレス成形による樹脂製生物模倣ハニカムコアの製作法
3. 学会等名 日本機械学会関東学生会第62回学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 羽山涼介, 石田祥子
2. 発表標題 有限要素解析による生物を模倣した新形状ハニカムコアの横弾性係数評価
3. 学会等名 日本応用数理学会 研究部会連合発表会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 関澤光亮, 石田祥子
2. 発表標題 円筒ハニカムコア構造のせん断実験手法の提案
3. 学会等名 日本応用数理学会 研究部会連合発表会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 岡安晃平, 石田祥子
2. 発表標題 切頂八面体を基にした多層コアパネルのエネルギー吸収特性
3. 学会等名 日本応用数理学会2022年度年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Sachiko Ishida, Mudong Li, Kazuya Saito
2. 発表標題 Out-of-plane stiffness and strength of bio-inspired honeycomb cores with extra hollows
3. 学会等名 JSST2022 International Conference on Simulation Technology (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Sachiko Ishida
2. 発表標題 Out-of-plane Strength of Cylindrical Honeycomb Cores: Application to Origami Tires
3. 学会等名 Asia Pacific Conference on Fracture and Strength (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 石田祥子
2. 発表標題 折紙の数理と機械工学
3. 学会等名 日本機械学会材料力学部門異分野融合研究会 (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Mudong Li, Sachiko Ishida, Kazuya Saito
2. 発表標題 Numerical evaluation on the out-of-plane properties of bio-inspired honeycomb cores with extra hollows
3. 学会等名 JSST2021 International Conference on Simulation Technology (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山口航矢, 浅上隆登, 稲本知也, 水谷建太, 伊藤 大悟, 白瑩雪, 歌田大夢, 大石知宏, 田宰根, 須藤光, Fareez Ameerul Bin Rosdi, Mohamad Imran Shah Bin Said Akbar, 石田祥子
2. 発表標題 折紙タイヤの設計と実車試験
3. 学会等名 日本機械学会 第31回設計工学・システム部門講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山口雅貴, 石田祥子
2. 発表標題 曲率半径を変更した円筒ハニカム構造のせん断弾性係数の評価
3. 学会等名 日本応用数理学会2021年度年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 岡安晃平, 石田祥子
2. 発表標題 切頂八面体を基にした多層コアパネルの衝撃吸収特性
3. 学会等名 日本機械学会 第34回計算力学講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 BEN YUE, 山口峻平, 石田祥子
2. 発表標題 生物を模倣した新形状ハニカムコアの強度とエネルギー吸収量の評価
3. 学会等名 日本応用数学会 研究部会連合発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 石田祥子
2. 発表標題 折紙タイパプロジェクト2019とその後
3. 学会等名 明治大学MIMS 現象数理学研究拠点 共同研究集会「折り紙の科学を基盤とするアート・数理 および工学への応用」(招待講演)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 ハニカム構造体の製造方法及びハニカム構造体	発明者 斉藤一哉, 石田祥子, 李牧東	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特願2021-180491	出願年 2021年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

明治大学理工学部 石田祥子研究室ウェブサイト http://www.isc.meiji.ac.jp/~sishida/home.html 東京学芸大学附属高校で特別授業を実施～10/28日本経済新聞(高校生特別版)で掲載～ https://www.meiji.ac.jp/koho/news/2022/mkmht0000001vda1.html 明治大学研究ブランディング事業「設計・折紙」 https://www.meiji.ac.jp/research/mathubiquitous/team03.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			
オーストラリア	Swinburne University of Technology			