

令和 5 年 6 月 26 日現在

機関番号：32503

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04226

研究課題名（和文）3Dジグソーパズルの設計理論の構築及び製作法

研究課題名（英文）Design theory and production method on 3D jigsaw puzzle

研究代表者

手嶋 吉法（Teshima, Yoshinori）

千葉工業大学・工学部・教授

研究者番号：80392041

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本プロジェクト開始前に開発されていた「池上式3Dジグソーパズル」は、空間内で3方向に直線スライドすることによりピースの脱着を可能にしていた。本プロジェクトでは、パズルのピース形状が正四面体と正八面体からなる新しい3Dジグソーパズルの開発に成功した。パズルピースの脱着を可能とする機構として、直線スライドに加え、回転スライドを導入した。回転スライドの為に、円形のほぞ（溝）をパズル内部に設けた。この円形ほぞ（溝）がパズルの接合面からはみ出す場合は、そこでほぞと溝を分離出来るが、円形ほぞ（溝）がパズルの接合面からはみ出さない場合は、溝の一部にくびれの無い箇所を設け、そこでほぞと溝を分離可能にした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

池上式3Dジグソーパズルは、伝統的な木造継手の1つである四方蟻継（もしくは四方鎌継）を非自明な形で巧妙に応用した内部機構を有していた。伝統的な木造継手では、宮大工が使用した道具（のみ、かんな等）の制約上、直線や平面的な接合形状となっていた。現代の設計では3D-CADが使用でき、継手の接合形状に曲線や曲面形状を導入できる可能性がある。本プロジェクトでは、伝統継手には存在しなかった円形のほぞ（溝）を導入し、新たな3Dジグソーパズルの開発に成功した。これは温故知新、すなわち先人が蓄積した技術体系に新たな基本技巧を導入することで、新たな価値を有する製品の開発が可能となることを示すものである。

研究成果の概要（英文）：The "Ikegami-style 3D jigsaw puzzle" had developed before the start of this project. And it can attach and detach pieces by linear slides in three directions in the space. In this project, we succeeded in developing several new 3D jigsaw puzzles whose puzzle piece shapes include both tetrahedron and octahedron. In addition to the linear slides, we introduced rotary slides as a mechanism that allows puzzle pieces to be attached and detached. We provided circular tenons (grooves) inside the puzzles for rotating slides. If this circular tenon (groove) protrudes from the joining surface of the puzzle, the tenon and groove can be separated there. On the other hand, when the circular tenon (groove) do not protrude from the joint surface of the puzzle, we designed a part of the groove without constriction. Finally, separation of tenon and groove became possible there.

研究分野：設計工学、機構学、デジタルものづくり、立体教材開発、幾何学

キーワード：3Dジグソーパズル 伝統木造継手 空間を埋め尽くす形状 機械機構 多面体 ほぞ 溝 3Dプリンタ

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、研究者個人に帰属します。

## 1. 研究開始当初の背景

通常のジグソーパズルを二次元ジグソーパズル(2D ジグソーパズル)と呼ぶことにする。これは、多数の合同な四角形で平面を隙間なく埋め尽くした状態から、境界線(各四角形の辺)に凹凸を与え、全ての四角形が互いに吻合したものと捉えられる。この自然な拡張として、三次元ジグソーパズル(3D ジグソーパズル)とは、多数の合同な六面体(立方体や直方体を含む)で空間を隙間なく埋め尽くした状態から、境界面(各六面体の面)に凹凸を与え、全ての六面体が互いに吻合したものと本研究では定義する。ただし、2D ジグソーパズルのピース形状としては、三角形や六角形も使用可能であることは自明である。同様に、3D ジグソーパズルのピース形状は六面体に限定されず、空間を埋め尽くす性質を有する多面体であれば良いとする。

研究開始当初、2D ジグソーパズルに似たピースを用いて球面を形成できるようなパズルは存在したが、上記の定義に基づく3D ジグソーパズルは、2000年に池上祐司(理化学研究所の機械設計技師)によって開発された「池上式3D ジグソーパズル」が存在するのみであった。池上式3D ジグソーパズルは、伝統的な木造継手の1つである四方継(四方蟻継もしくは四方鎌継)を非自明な形で巧妙に応用して設計されている。元の四方継の動きは、1方向の直線的なスライドであり、これは四方継の内部に直線的なほぞ(および溝)が設けられていることを意味する。池上式3D ジグソーパズルも直線スライド方式によってピースの脱着を可能にしているが、直線スライドの方向は、1方向ではなく3方向である。この3方向は、同一平面上に無い互いに60度をなす3方向となっている。つまり、池上式3D ジグソーパズルの内部構造は、直線的なほぞ(および溝)が上記の3方向に沿って設計されており、それらは互いに交わらない様に、空間においてねじれの関係になるように設計されている。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、3つある。1つ目、池上式3D ジグソーパズルの構造を詳しく調べ、設計上の制約や背後に潜む設計理論を明らかにすることである。2つ目は、池上式3D ジグソーパズルとは異なる内部機構に基づく、新たな3D ジグソーパズルを開発することである。3つ目は、3D ジグソーパズルを大量生産する際の製造方法について検討することである。3D ジグソーパズルのピース形状は複雑な凹形状となるため、試作は3D プリントを利用することにより可能である。しかし、3D プリントによる製造は、大量生産に向いているとは言い難いので、他の方法を検討する必要がある。

## 3. 研究の方法

第1の研究目的を達成するために、池上式3D ジグソーパズルのほぞ(および溝)の設計の限界値を調査した。具体的には、ほぞ(および溝)の基本サイズに対して、ほぞの幅は変えず高さのみを極端に大きくした設計、ほぞの高さは変えず幅のみを極端に大きくした設計を行った。ただし、そのような極端な設計を行うと微小な部分が現れ、強度が低下し破損するので、強度を考慮して微小部分のサイズが小さくなり過ぎないようにする実際的な設計も行った。

第2の研究目的を達成するために、直線のほぞ(および溝)だけでなく、円形のほぞ(および溝)を導入した。さらにピース形状として、立方体(六面体)だけでなく、正四面体と正八面体を両方用いる方式を検討した。

第3の研究目的を達成するために、シリコン型やロストワックス鑄造の利用を検討した。

## 4. 研究成果

新たな3D ジグソーパズルとして、正四面体および正八面体のピース形状からなる3D ジグソーパズルを複数開発した[町屋ほか、新たな3D ジグソーパズルの開発、形の科学シンポジウム講演予稿集第5巻、第1号(2020), pp. 3-4.][石澤ほか、外形が正四面体の3D ジグソーパズルの開発、形の科学シンポジウム講演予稿集第6巻、第1号(2021年6月), pp. 3-4.][手嶋ほか、ピース形状が正四面体と正八面体からなる3D ジグソーパズルの改良、形の科学シンポジウム講演予稿集Vol. 7 No. 1(2022年6月), pp. 48-49.][首藤ほか、ピース形状が正四面体と正八面体からなる3D ジグソーパズルの改良 II、形の科学シンポジウム講演予稿集Vol. 8 No. 1(2023年6月), pp. 33-34.]. これらは、直線スライド方式と回転スライド方式の両方の機構からなるものと回転スライド方式のみからなるものがある。

ピース形状は立方体(池上式と同じ)で、内部機構が回転スライド方式(池上式は直線スラ

イド方式)である3Dジグソーパズルを新たに開発した[加藤ほか、外形が立方体の回転式3Dジグソーパズルの開発、形の科学シンポジウム講演予稿集第6巻、第1号(2021年6月)pp.1-2.][大山ほか、外形が立方体の回転式3Dジグソーパズルの開発II、形の科学シンポジウム講演予稿集Vol.8No.1(2023年6月),pp.31-32.][永井ほか、色合わせ回転式3Dジグソーパズル、形の科学シンポジウム講演予稿集Vol.8No.1(2023年6月),pp.9-10.]。

3Dジグソーパズルのピース脱着の機構として今後活用される可能性がある伝統木造継手の立体教材を開発した[大和田ほか、木造継手のデジタル化と模型製作、形の科学シンポジウム講演予稿集第5巻、第1号(2020年12月),pp.1-2.][麻生、手嶋、木造継手の立体教材の開発II、形の科学シンポジウム講演予稿集Vol.7No.2(2022年11月),pp.24-25.][長谷川、手嶋、木造継手の立体教材の開発III、形の科学シンポジウム講演予稿集Vol.8No.1(2023年6月),pp.35-36.]。そのうちの4つを3Dジグソーパズル(正四面体ピース)のピースの結合に応用した[石澤ほか、外形が正四面体の3Dジグソーパズルの開発、形の科学シンポジウム講演予稿集第6巻、第1号(2021年6月),pp.3-4.]。

3Dジグソーパズルと関連して、3つの研究開発をおこなった。1つ目は球面に大陸を脱着可能な地球儀の開発[本間ほか、大陸を脱着可能な触覚学習用地球儀の作製、形の科学シンポジウム講演予稿集Vol.6No.2(2021年11月),pp.20-21.]である。2つ目は、内臓の各臓器の形状を簡略化し、3Dプリンタで造形したパーツを台座に詰め込む、卓上型内臓模型の開発[小池ほか、視覚障害者が解剖学を学ぶ為の人体臓器模型の開発、形の科学シンポジウム講演予稿集第6巻、第1号(2021年6月),pp.13-14.][篠田ほか、視覚障害者が解剖学を学ぶ為の卓上型内臓模型の開発、形の科学シンポジウム講演予稿集Vol.7No.1(2022年6月),pp.52-53.][Shinoda et al., Development of tabletop models of internal organs for anatomy learning of the visually impaired. LNCS, Vol.13341(2022)pp.261-269.][篠田ほか、視覚障害者が解剖学を学ぶ為の卓上型内臓模型の開発、形の科学シンポジウム講演予稿集Vol.8No.1(2023年6月),pp.11-12.]である。3つ目は、空間を埋め尽くす立体形状の開発[岡田、手嶋、空間を周期的に埋め尽くす立体形状の開発II、形の科学シンポジウム講演予稿集Vol.7No.2(2022年11月),pp.26-27.][櫻村、手嶋、空間を周期的に埋め尽くす立体形状の開発III、形の科学シンポジウム講演予稿集Vol.7No.2(2022年11月),pp.28-29.]である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計18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 18件）

1. 著者名 大和田貴太、手嶋吉法	4. 巻 5-1
2. 論文標題 木造継手のデジタル化と模型製作	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 形の科学シンポジウム講演予稿集	6. 最初と最後の頁 1-2
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 オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 町屋佑季、池上祐司、山澤建二、手嶋吉法	4. 巻 5-1
2. 論文標題 新たな 3D ジグソーパズルの開発	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 形の科学シンポジウム講演予稿集	6. 最初と最後の頁 3-4
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 無
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 小池彰寛、寺口さやか、手嶋吉法	4. 巻 6-1
2. 論文標題 視覚障害者が解剖学を学ぶ為の人体臓器模型の開発	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 形の科学シンポジウム講演予稿集	6. 最初と最後の頁 13-14
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 オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 本間智也、青松利明、手嶋吉法	4. 巻 6-2
2. 論文標題 大陸を脱着可能な触覚学習用地球儀の作製	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 形の科学シンポジウム講演予稿集	6. 最初と最後の頁 20-21
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 オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 篠田萌華、小池彰寛、寺口さやか、手嶋吉法	4. 巻 7-1
2. 論文標題 視覚障害者が解剖学を学ぶ為の卓上型内臓模型の開発	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 形の科学シンポジウム講演予稿集	6. 最初と最後の頁 52-53
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 オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 麻生真世、手嶋吉法	4. 巻 7-2
2. 論文標題 木造継手の立体教材の開発 II	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 形の科学シンポジウム講演予稿集	6. 最初と最後の頁 24-25
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 オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 岡田莉歩、手嶋吉法	4. 巻 7-2
2. 論文標題 空間を周期的に埋め尽くす立体形状の開発 II	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 形の科学シンポジウム講演予稿集	6. 最初と最後の頁 26-27
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 オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 榎村優花、手嶋吉法	4. 巻 7-2
2. 論文標題 空間を周期的に埋め尽くす立体形状の開発 III	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 形の科学シンポジウム講演予稿集	6. 最初と最後の頁 28-29
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 オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 大山寛人、池上祐司、山澤建二、手嶋吉法	4. 巻 8-1
2. 論文標題 外形が立方体の回転式3Dジグソーパズルの開発II	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 形の科学シンポジウム講演予稿集	6. 最初と最後の頁 31-32
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 オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 首藤大雅、池上祐司、山澤建二、手嶋吉法	4. 巻 8-1
2. 論文標題 ピース形状が正四面体と正八面体からなる3Dジグソーパズルの改良 II	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 形の科学シンポジウム講演予稿集	6. 最初と最後の頁 33-34
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 オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 永井真統、池上祐司、山澤建二、手嶋吉法	4. 巻 8-1
2. 論文標題 色合わせ回転式 3D ジグソーパズル	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 形の科学シンポジウム講演予稿集	6. 最初と最後の頁 9-10
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 オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 長谷川達也、手嶋吉法	4. 巻 8-1
2. 論文標題 木造継手の立体教材の開発 III	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 形の科学シンポジウム講演予稿集	6. 最初と最後の頁 35-36
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 オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 篠田萌華、寺口さやか、手嶋吉法	4. 巻 8-1
2. 論文標題 視覚障害者が解剖学を学ぶ為の卓上型内臓模型の開発	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 形の科学シンポジウム講演予稿集	6. 最初と最後の頁 11-12
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 オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Shinoda, S., Koike, A., Teraguchi, S., Teshima, Y.	4. 巻 13341
2. 論文標題 Development of tabletop models of internal organs for anatomy learning of the visually impaired	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Lecture Notes in Computer Science (LNCS)	6. 最初と最後の頁 261-269
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-031-08648-9_30	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 手嶋吉法、佐藤啓太、田村斗唯、町屋佑季、池上祐司、山澤建二	4. 巻 7-1
2. 論文標題 ピース形状が正四面体と正八面体からなる3D ジグソーパズルの改良	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 形の科学シンポジウム講演予稿集	6. 最初と最後の頁 48-49
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 オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 手嶋吉法、佐藤啓太、田村斗唯、町屋佑季、池上祐司、山澤建二	4. 巻 7
2. 論文標題 ピース形状が正四面体と正八面体からなる3D ジグソーパズルの改良	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 形の科学シンポジウム講演予稿集	6. 最初と最後の頁 5-6
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 オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 加藤蒼, 宮本圭佑, 池上祐司, 山澤建二, 手嶋吉法	4. 巻 6-1
2. 論文標題 外形が立方体の回転式3Dジグソーパズルの開発	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 形の科学シンポジウム講演予稿集	6. 最初と最後の頁 1-2
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 オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 石澤安晟, 町屋佑季, 池上祐司, 山澤建二, 手嶋吉法	4. 巻 6-1
2. 論文標題 外形が正四面体の3Dジグソーパズルの開発	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 形の科学シンポジウム講演予稿集	6. 最初と最後の頁 3-4
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 無
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0件

〔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	山澤 建二  (Yamazawa Kenji)  (50344057)	国立研究開発法人理化学研究所・光量子工学研究センター・副チームリーダー   (82401)	

#### 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
---------	---------