

令和 2 年 6 月 9 日現在

機関番号：24402

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K12868

研究課題名（和文）組合せ剛性理論に基づく形態デザイン手法の開発

研究課題名（英文）Development of the methodology of form design based on combinatorial rigidity theory

研究代表者

小林 祐貴（Kobayashi, Yuki）

大阪市立大学・大学院工学研究科・講師

研究者番号：70756668

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）：Coxeterのねじれ正多面体と呼ばれる、平坦に折りたたむことができる柔軟な立体を剛にする手法を明らかにした。さらに、同様の方法でOverveldeらの柔軟な立体も剛にできることを示した。また、立体を骨組みとして扱うbar-jointフレームワークと呼ばれる構造物についての形態生成手法を提案した。そして、提案手法による模型をフィンランドの伝統的な工芸品であるヒンメリとして作成した作品を発表した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

組合せ剛性理論、グラフ剛性に関する理論研究は広く行われているものの、建築空間を想定した形態デザインに応用し、形態生成手法を開発したことは学術的に画期的である。従来手法とは異なる方法で、立体が剛になることを直感的に示すことにも成功した。

さらに、伝統的な工芸品として知られているヒンメリを提案手法により作成した作品を発表することにより、一般および専門家の人々に知ってもらう機会を作り、研究の広がりにも寄与できた。

研究成果の概要（英文）：We have developed a method for making a flat foldable solid called Coxeter's regular skew polyhedron a rigid body. Furthermore, we have shown that the flexible solid of Overvelde et al. can be made rigid by the same method.

We also proposed a morphology generation method for structures called the bar-joint framework. We presented a model created by the proposed method as a traditional Finnish craft called Himmeli.

研究分野：デザイン科学

キーワード：組合せ剛性理論 形態デザイン グラフ剛性 ブレース追加問題 多面体 折り畳み 剛体折り

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

申請者はデザインの自由度を持つ、剛な形態の生成手法の開発を行っており、最近、極小剛な panel-hinge グラフの列挙手法の開発、及び冗長な panel-hinge グラフの組合せ的な特徴付けに成功した。建築をデザインするには、スケッチや模型の作成、3D CAD ソフトによるモデリングといった方法を用いて設計を行う。そのようなとき、設計者は実際に建築を実現することを想定し、直感的に部材の接続関係などから、「剛な構造物として実現可能である」、「実現するために柔らかそうな部分には部材を追加する」といった判断を行う。実際に建築を建てる段階では部材の正確な座標位置を決定し、数値解析によって構造物の剛性を判断するが、設計の初期段階から厳密な座標を決定すれば、デザインが限定されてしまう。本研究で扱う「組合せ剛性理論」とは、構造物の接続関係をグラフとして扱うことで、構造物の剛性を組合せ的に扱う理論である。その成果は人々の構造物の剛性に関する直感を厳密に数理の問題として議論したものであると言え、建築デザインへの応用が期待される。本研究によりデザインの自由度を損なうことなく、設計の初期段階より剛性の検討が可能となり、設計者が直感的に思い浮かべる形態をより自然に建築物として実現可能とすると考える。

本研究で主に扱う、ヒンジによってつながれた剛なパネルの集合を panel-hinge フレームワークと呼ぶ。panel-hinge フレームワークの特殊な場合である折紙については、多くの研究がなされている。フレームワークのパネルを頂点、パネルどうしをつなぐヒンジを辺で表した panel-hinge グラフと捉えることで、フレームワークの剛性を組合せ的に特徴付けることができる。すべてのフレームワークの動きが、元々のフレームワークの合同変換であるとき、フレームワークは「剛」であるといい、対応するグラフを剛な panel-hinge グラフと呼ぶ。いずれの辺を取り除いた場合にも、剛ではなくなる(柔軟となる)panel-hinge グラフを、「極小剛」であるという。さらに、いずれの辺を特定の本数取り除いた場合においても剛なフレームワークのことを「冗長」であるという。申請者はこれまでに極小剛な panel-hinge グラフを演繹的に生成する手法の開発および、剛な panel-hinge フレームワークを演繹的に生成する手法の開発に成功しているが、より自由度の高い形態の生成手法、及び建築利用を目的とした panel-hinge フレームワークの生成手法の開発が建築デザインへと応用するためには必要である。

### 2. 研究の目的

組合せ剛性理論とは構造物の接続関係から剛性を判定する理論であり、本研究はグラフ理論分野におけるこれらの研究成果を、建築デザインに応用することを目的とする。これまでに、折紙を建築デザインへと応用する研究はなされているが、展開・折りたたみ可能であることに利点がとどまっている。本研究で扱う panel-hinge フレームワークの特殊な場合として折紙を捉えることができ、より自由で剛性が考慮された形態の生成が可能となると考える。組合せ剛性理論の基礎研究から建築デザインへの応用へと展開するための研究基盤の確立を目指す。

### 3. 研究の方法

特定の自由度を持つ panel-hinge フレームワークについて、これまでに開発した逐次的に剛な panel-hinge フレームワークを生成する操作での構築手順を検討する。これにより、柔軟な panel-hinge フレームワークを剛にする手法を開発する。

また、組合せ剛性理論では panel-hinge フレームワーク以外の構造物に関する組合せ的な特徴付けが為されている。伸び縮みのしない棒部材がピンジョイントで結合された構造物の bar-joint フレームワークと呼ばれる構造物はそのうちのひとつであり、2次元の bar-joint フレームワークに関しては、これまでに研究成果を挙げている。3次元の bar-joint フレームワークについても空間充填多面体で構成された bar-joint フレームワークを剛にする手法を開発しており、本研究では、完全に充填された立体ではなく、空間を持った3次元 bar-joint フレームワークを剛にする手法を開発することにより、建築デザインへの応用を目指す。

### 4. 研究成果

組合せ剛性理論に基づく形態デザイン手法の開発について、以下の研究成果を得た。

(1) 空間を2等分する Coxeter の3つのねじれ正多面体のうち、立方体を基本形とした立体に対して一つの立方体を追加することのみで、フレームワーク全体を剛にできることを明らかにした。この時、立方体を基本形とした Coxeter のねじれ正多面体は、立体の各面がヒンジで繋がれている panel-hinge フレームワークとして捉えた時、平坦に折りたたむことができる柔軟な panel-hinge フレームワークである。また、切頂八面体を基本形とする立体、正四面体と切頂四面体を基本形とする立体である剛な2つのねじれ正多面体に関しては、基本形とする多面体からねじれ正多面体とは異なる面の取り除き方を、組合せ剛性理論に基づいて提案することで、柔軟な立体を生成することに成功した。panel-hinge フレームワークにおける bar-joint フレームワークのグリッドフレームワークのような立体は何か、ということを検討していた際に、Coxeter のねじれ正多面体として知られている柔軟な立体があることがわかり、当初予期していなかった発見であった。

(2) bar-joint フレームワークについて次の成果を得た。空間充填立体の bar-joint フレーム

ワークに対して、最小本数の筋交いを追加することで、どの棒材を取り除いた場合においてもフレームワークが柔軟となる極小剛な構造物とする手法を、回転は行わず平行移動のみを許した場合に、一種類の多面体で空間充填可能である5種類の空間充填立体に対して明らかにした。さらに開発した操作を拡張し、内部空間や開口部を想定した構造物に対しても、極小剛とする生成手法を提案した。

(3) 奈良が考案した切頂八面体から面を取り除いた状態で空間充填した立体は、平坦に折り畳むことが可能で柔軟な panel-hinge フレームワークであり、この立体を効率よく作成する展開図を明らかにした。奈良が提案した面の取り除き方は、Coxeter のねじれ正多面体について、これまでに発表していた方法とは異なるものであり、平坦化可能な興味深い立体であった。さらにこれまでに検討していた立体と同様に剛にする方法について検討し、この場合には一つの切頂八面体を追加することでは全体を剛にすることはできないことを明らかにした。そして、柱状またはある間隔で切頂八面体を追加することで剛にできると予想を立てた。

(4) body-bar フレームワークについて次の成果を得た k-pinchng と呼ばれる極小剛な body-bar グラフを生成する操作に基づいた body-bar フレームワークを生成する手法と剛な body-bar フレームワークを逐次的に生成する手法を提案した。一層の立方体で充填するように body-bar フレームワークを生成する方法を示すことで、建築分野などでの活用を目的とした形態生成手法として有用であることを示した。

(5) Coxeter のねじれ正多面体の一つである立方体を基本形とした立体に対して一つの立方体を追加することのみで、フレームワーク全体を剛にできることを明らかにしていたが Overvelde らが提案した28種類の柔軟な一様ブロック積みに基づく立体について、同様に単位立体を追加することで剛にできるかを検討した。その結果、全ての立体について剛にできることが明らかとなり、大きな一様ブロック積みに基づく立体を作成した場合にも、一つの単位立体を追加することで全体を剛にすることができることが分かった。このことから、例えばその単位立体を剛にしたり柔軟にすることができればフレームワーク全体の形状を変化させることができる。

(6) panel-hinge フレームワークは紙で容易に模型作成ができるが、bar-joint フレームワークは自由な回転を許したピン接合を3次元で簡単に作成することができていなかった。そのような際に、“多面体百科(宮崎興二著)”にて紹介されているフィンランドの伝統的な工芸品である“ヒンメリ”によって作成すれば良いと気づいた。そこで本研究期間内にて、これまでに論文発表していた形態生成手法を用いて模型作成をし、“組合せ剛性ヒンメリ”と名付けた作品を作成し(図1)、フィンランドにて開催予定であった Bridges2020 に応募し、採択決定となった。これまでのヒンメリ作品は明らかに剛な立体についての制作物が多く見られるが、組合せ剛性理論を用いることで、より多様な作品を制作可能であることを明らかにし、また理論研究においても模型作成によって容易に確認することができるようになり、今後の研究、創作活動において非常に有用な成果を得ることができた。



図1 組合せ剛性ヒンメリ

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1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 小林祐貴, 加藤直樹	4. 巻 83
2. 論文標題 極小剛な空間充填立体bar-joint フレームワークの生成手法及び建築形態デザインへの応用	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 日本建築学会環境系論文集	6. 最初と最後の頁 323-331
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3130/aije.83.323	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 -

〔学会発表〕 計11件（うち招待講演 0件/うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Y. Kobayashi
2. 発表標題 Combinatorial Rigidity Himmeli
3. 学会等名 Bridges 2020 : Mathematics, Music, Art, Architecture, Culture (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小林祐貴
2. 発表標題 一様ブロック積みに基づく立体を剛にする手法
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演梗概集
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小林祐貴
2. 発表標題 単位立体を追加することによる一様ブロック積みを剛にする手法
3. 学会等名 日本建築学会第42回情報・システム・利用・技術シンポジウム論文集, 報告, pp.120-123
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Y. Kobayashi and C. Nara
2. 発表標題 Periodic Sponge Surfaces and Their Rigidity
3. 学会等名 The 21th Japan Conference on Discrete and Computational Geometry, Graphs, and Games (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Y. Kobayashi, J. Itoh, and N. Katoh
2. 発表標題 Generation Methods of Panel-Hinge Frameworks Based on Regular Skew Polyhedra
3. 学会等名 Bridges 2018 : Mathematics, Music, Art, Architecture, Culture (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 小林祐貴, 奈良知恵
2. 発表標題 切頂八面体に基づく柔軟な空間充填立体を剛にする手法
3. 学会等名 日本建築学会第41回情報・システム・利用・技術シンポジウム論文集, 報告, pp. 75-78
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 小林祐貴, 奈良知恵
2. 発表標題 切頂八面体に基づく柔軟な周期的立体の展開図
3. 学会等名 第24回折り紙の科学・数学・教育研究集会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 小林祐貴, 東川雄哉
2. 発表標題 剛なbody-barフレームワークの生成手法
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演梗概集
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 小林祐貴, 加藤直樹
2. 発表標題 穴のある極小剛な空間充填立体 bar-joint フレームワーク生成手法
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演梗概集
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 小林祐貴, 伊藤仁一, 加藤直樹
2. 発表標題 剛体追加による剛な panel-hinge フレームワークの生成手法
3. 学会等名 日本建築学会第40回情報・システム・利用・技術シンポジウム論文集, 報告, pp. 79-82
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 小林祐貴
2. 発表標題 Coxeter のねじれ正多面体に基づくpanel-hinge フレームワーク生成手法
3. 学会等名 日本数学会研究会「直観幾何学2018」
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

大阪市立大学 建築学科 図形科学研究室  
<https://www.arch.eng.osaka-cu.ac.jp/graphics/>  
小林 祐貴 (Yuki Kobayashi)  
<https://kobayashiyuki.wordpress.com>

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