

平成 30 年 6 月 20 日現在

機関番号：25301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26420557

研究課題名(和文) 多様なヒンジ接合で構成されたモバイル建築のための展開型骨組構造の設計手法

研究課題名(英文) A design method of deployable bar structures connected by various hinge joints for mobile architecture

研究代表者

津田 勢太 (TSUDA, SEITA)

岡山県立大学・デザイン学部・准教授

研究者番号：80584325

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)： 既往の剛体折紙パターンを変換して、軽量の展開型骨組構造を設計するための手法を提案した。様々なヒンジ接合を効果的に配置することで、変形自由度の小さい機構を生成することができる。部材配置位置を変えることで、円筒型曲面構造を生成することも可能である。
また、指定方向へ形態変化する新たな機構を設計する手法として、任意形状に設定した立体骨組の部材端に、任意角度の回転軸をもつヒンジ接合を配置する最適化問題を定式化した。さらに、ひずみの高次項の存在条件を用いた大変形機構の自由度判定手法を提案した。

研究成果の概要(英文)： We proposed a method to design a lightweight deployable bar structure by converting the well-known rigid-origami pattern. By arranging various hinge joints effectively, it is possible to generate a mechanism with a small degree-of-freedom. It is also possible to generate a cylindrical curved surface structure by changing the member arrangement position.
As a method of designing a new mechanism that changes its shape in a designated direction, we formulated an optimization problem of placing hinge joints having a rotation axis at an arbitrary angle on the member end of an arbitrary shaped three-dimensional framework. In addition, we presented a method to evaluate the order of mechanism by judging the conditions for existence of higher order terms of mechanisms.

研究分野：建築構造

キーワード：展開構造 メカニズム 折紙

1. 研究開始当初の背景

イベントや災害時の使用を目的とした組み立て式シェルター（モバイル建築）の構造体は、複数の部材を現地で接合して作られるものが一般的である。コンパクトに収納できる利点はあるが、組み立てに慣れている人を含めて複数の人が必要であり、また時間もかかる煩雑な作業が必要となる。

そのような煩雑な作業が不要な構造体として、リンク機構を用いた展開型構造が数多く提案されている。その多くはシザーズ機構を用いているが、シザーズ機構は展開時に接合部の距離が変わるため、可変性のある膜素材などを仕上げ材として用いるか、展開後に仕上げ材を装着するか等の必要がある。他の機構としては、折紙の機構を用いて、剛なパネル同士を丁番ヒンジで接合した展開型シェルターの提案もされている。この構造は、仕上げと構造体が一体となっているため、展開するだけで使用できるシェルターとなり、仕上げ材を後でつけるという手間が省けるという利点があるが、全体がパネルで構成されるため重量が増大してしまうという難点がある。運搬・設置するためにはクレーンなどの重機が必要となり、人力による運搬・設置は難しい。

災害現場などを目的としたモバイル建築に必要な性能として、少人数の人々が人力で運搬すること、設置に不慣れた人が簡単に設置できること、断熱性等の居住性を確保していることが挙げられる。そのためには、軽量であること、容易に展開ができること、断熱性のある軽量の仕上げ材を展開前に取り付けられることが望ましくい。

2. 研究の目的

モバイル建築に必要な上記性能を満たす構造としては、必要最低限の個数のヒンジで接合された不安定次数が小さい骨組によるメカニズムが最適であり、断熱性のある仕上げ材を展開前に取り付けられるよう接合部間距離が変化しない機構が望ましい。そのような機構として、剛体折紙機構が挙げられる。本研究の目的の1点目は、既往の剛体折紙機構を軽量化するために、骨組構造へ変換するための手法および課題を発見することである。研究目的の2点目は、新たな骨組機構を設計するための手段として、任意形状の立体骨組から展開構造を生成するための手法を開発することとする。

3. 研究の方法

3-1. 折紙から展開型骨組構造への変換

様々な具体的な折り方が提案されていて、また理論的な誘導もされている折り紙を検討の出発点とした展開型骨組構造を生成する。単純な方法としては、折り紙の稜線部分に部材を配置し、交点部で部材同士を3軸回転ヒンジで接合することで、展開型の骨組構造が得られるが、そのような方法では、不安

定次数が大きいメカニズムとなることや、展開時に分岐点が発生するなど設置が難しくなることが想定される。このような問題を避けるためには、ヒンジの個数と回転軸を限定した部分剛接合骨組が望ましい。

提案されている既往の折紙の中から展開・収納性に優れた折り方を抽出し、折り畳みの機構を分析する。この機構の変形適合条件を満たすような骨組構造（部材位置、ヒンジ位置と回転軸）を生成し、機構模型および不安定性の判定解析を行うことで、展開可能性を探索する。なお、機構の自由度判定にあたっては、部材端が剛接合された骨組の一部をヒンジ接合とした場合の不安定次数と不安定モードを判別するために研究代表者らが提案した計算手法を利用する。この手法によって、任意の方向に回転軸をもつヒンジを容易に設定することができる。既報論文では提案式の導出と簡易なモデルによる検証を行っているが、提案式の妥当性を具体的なモデルを通じて検証することにもなる。


3-2. 部分剛接合骨組による機構設計

立体骨組の部材端に任意角度の回転軸を配置することで、指定方向へ形態変化する機構を実現するための最適化問題を定式化する。研究代表者らは、極限解析問題に類似する線形計画問題を解くことで、機構を生成する方法を提案しているが、その方法ではヒンジの回転方向を局所座標系まわりの回転に限定していた。本研究では、任意方向の回転軸を有するヒンジ接合を有する展開機構を生成する手法を提案する。このことにより、ヒンジ個数の低減、および不安定次数を減少させる効果がある。

上述する不安定次数は微小変形の仮定による微小変形メカニズムであり、導出される機構は大変形メカニズムとならない可能性がある。そこで、関数の勾配を用いた連続変数を定義した非線形問題を定式化することで、大変形時の機構判定を行う手法を提案する。

4. 研究成果

4.1 展開構造のメカニズム

ヨシムラ折り剛体折紙（図1）から生成した骨組機構を図2に示す。部材は、折紙の折れ線上に部材を配置したうえで、必要箇所をヒンジ接合（記号  は1自由度ヒンジ接合の回転軸、記号●は1自由度のねじり回転ヒンジ接合）である。ヨシムラ折り剛体折紙は多自由度の機構であるが、変形の対称性を維持するような拘束を追加することで1自由度機構としたものであり、写真1は縮小模型による展開過程を示す。写真1(d)は、平面状態での分岐モードの一つ（蛇腹モード）である。機構解析および模型挙動から、展開過程では常に1自由度であることを確認したが、フラットな平面状態では多自由度となるため、分岐経路に向かわないよう制御

する必要がある。分岐モード形状を算出し、その分岐方向への変形を拘束することが有効である。

提案する構造体は円弧状に折り畳まれるが収納性は高くないため、移動性や収納性を向上するためには分解し、現地で接合できるものが望ましい。図3は、ねじれ回転ヒンジ接合部を取り外し可能な接合とするものであり、展開時のねじれ回転を利用することで、ロック操作なしで軸力に対して抵抗できる接合方法である。写真2は、この接合部を用いた構造体を示す。

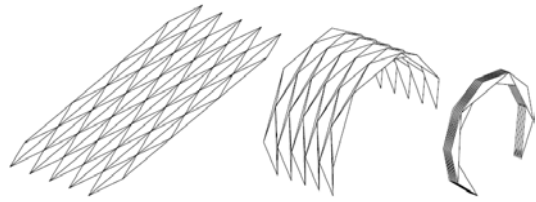


図1 ヨシムラ折り剛体折紙

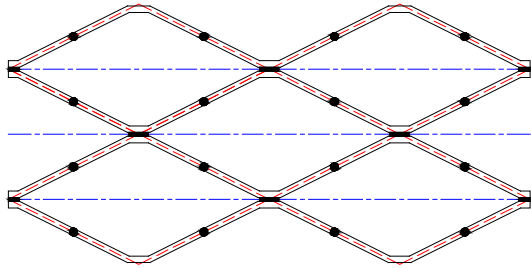
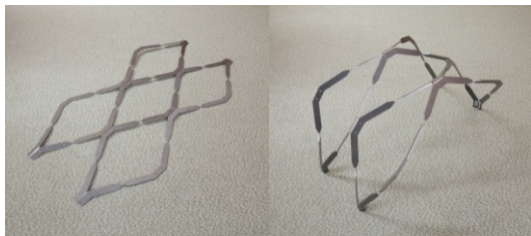
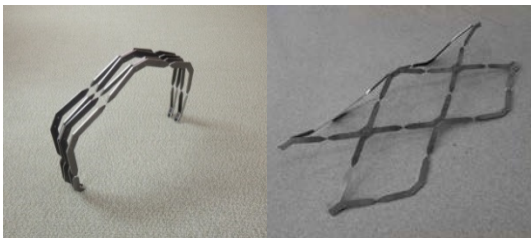


図2 展開型骨組構造 A



(a) 平面状態

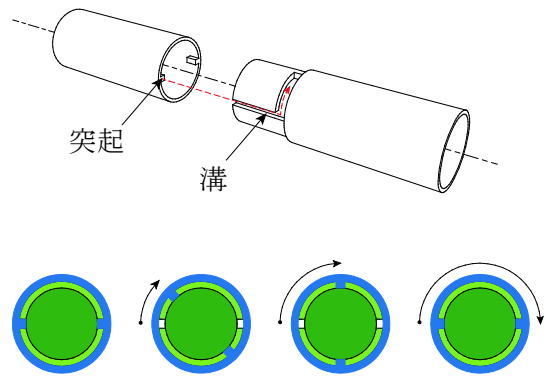
(b) 円筒状態



(c) 折畳状態

(d) 蛇腹分岐モード

写真1 骨組構造 A の縮小模型



折り畳み状態→展開状態 1→展開状態 2→フラット状態

図3 着脱可能なねじり回転ヒンジ接合



写真2 骨組構造 A の構造体

図4に示す骨組は、上記と同じくヨシムラ折りから生成した機構であるが、部材を折紙の折れ線上ではなく、三角パネル内(剛体内)に配置した1自由度の機構である(写真3)。部材の配置を折れ線に限定せずしなければ、1方向のヒンジ接合のみで構成することができる。

さらに、ヒンジ位置条件を守っていれば、部材の形状は剛体内にある必要はないため、例えば、曲面構造にすることも可能である。図5は、剛体折紙の三角形パネルとヒンジおよび曲面の関係を示したものである。このユニット形状を全体形状から求めることで、図6、図7のような円筒形構造を生成することが可能である。1自由度の機構であり、大空間屋根構造の施工方法への応用が期待できる。

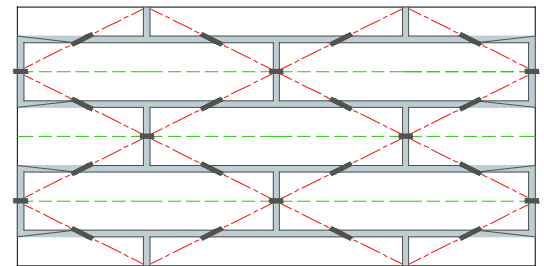
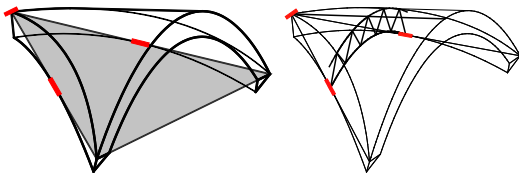


図4 展開型骨組構造 B



写真3 骨組構造Bの縮小模型



(a) 曲面板 (b) 骨組構造
図5 三角形パネルと曲面ユニット

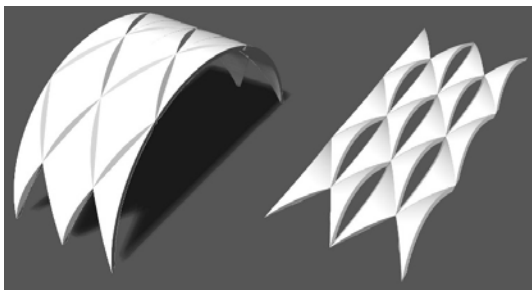


図6 円筒形シェル構造

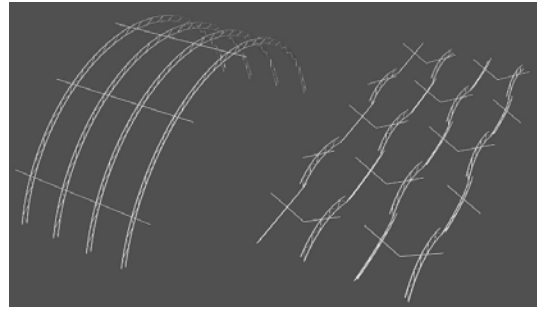


図7 円筒形骨組構造

4.2 部分剛接合骨組による機構設計

全ての部材が剛接合された立体骨組の適所にヒンジを配置することで機構を生成する手法として、極限解析問題と等価な2次元問題を下式のように定式化できる。

$$\begin{aligned} & \text{maximize } \lambda_{in} \\ & \text{subject to } \sum_{i=1}^{6m} f_i \mathbf{h}_i = \mathbf{p}_{out} + \lambda_{in} \mathbf{p}_{in} \\ & \quad (T^k(\mathbf{f}))^2 + (M_{j_2}^k(\mathbf{f}))^2 + (M_{j_3}^k(\mathbf{f}))^2 \leq \alpha w^b, \\ & \quad \quad \quad (k=1, \dots, m; j=1, 2) \\ & \quad (N^k(\mathbf{f}))^2 \leq \alpha w^a, (k=1, \dots, m) \end{aligned}$$

ここで、 \mathbf{p}_{in} および \mathbf{p}_{out} は、機構の入力節点と出力節点に対応する荷重ベクトルである。制約条件の第1式は釣り合い条件、第2式、第3式は降伏条件であり、入力変位に関する荷重係数 λ_{in} を最大化する問題である。 w^a および w^b は重み係数、 α はスケーリングパラメータである。

上記の最適化問題を解き、求めた材端モーメント方向 (T, M_{j_2}, M_{j_3} から算出されるモーメント方向) に斜め方向のヒンジ接合を配置することで機構を生成できる。重み係数やスケーリングパラメータを調整することでヒンジ位置や方向の異なる機構が生成される。ヒンジの方向を部材局所座標系に固定せず、斜め方向とすることによりヒンジ接合の個数を低減することができる。

上記手法では、微小変形の仮定を用いているため、大変形の特徴は不明である。得られたメカニズムが大変形メカニズムとなるかを判定するために、ひずみの高次項がゼロとなるか否かを判定する手法を提案した。微小変位メカニズムの高次項の存在条件は、節点および部材の変位と回転角の適合条件を逐次微分することによって導出できる。数式処理ソフトウェアを利用すれば高次項の計算はシステムティックに行うことができ、微小変形理論では大変形メカニズムか否かを判定できない骨組の大変形特性を、本手法を用いることで判定可能である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計3件)

- ① R. Watada, M. Ohsaki, Series expansion method for determination of order of 3-dimensional bar-joint mechanism with arbitrarily inclined hinges, International Journal of Solids and Structures, 印刷中, 2018. (査読あり)
- ② 津田勢太, 中原嘉之, 大崎 純, ヨシムラ折り剛体折紙の変形機構を拡張した展開型骨組構造の開発, 日本建築学会技術報告集, Vol. 24, No. 56, pp. 111-116, 2018. (査読あり)
- ③ M. Ohsaki, S. Tsuda, Y. Miyazu, Design of linkage mechanisms of partially rigid frames using limit analysis with quadratic yield functions, International Journal of Solids and Structures, Vol. 88-89, pp. 68-78, 2016. (査読あり)

〔学会発表〕(計11件)

- ① S. Tsuda, Y. Nakahara, M. Ohsaki, Deployable bar structure with partially rigid connections developed from origami, Proc. IASS symposium 2015, Amsterdam, Paper No. 500881, 2015.
- ② M. Ohsaki, Y. Miyazu, S. Tomoda, S. Tsuda, Design of deployable structures using limit analysis of partially rigid frames with quadratic yield functions, Proc. IASS symposium 2015, Amsterdam, Paper No. 498683, 2015.
- ③ 津田勢太, 部分剛接合骨組による展開構造の生成, 第61回構造力学コロキウム「構造力学における新しいニーズとシーズ」, 日本建築学会近畿支部構造力学部会主催, キャンパスプラザ京都, 2016.
- ④ 津田勢太, 中原嘉之, 大崎 純, 剛体折紙の展開機構を利用した曲面屋根構造の施工方法, 日本建築学会大会学術講演梗概集(九州), 構造I, pp. 993-994, 2016.
- ⑤ 中原嘉之, 津田勢太, 大崎 純, 剛体パネルが取り付け可能な展開型骨組構造の開発(その1), 日本建築学会中国支部研究報告集, 第39巻, Paper No. 204, 2016.
- ⑥ 津田勢太, 中原嘉之, 大崎 純, 剛体パネルが取り付け可能な展開型骨組構造の開発(その2), 日本建築学会中国支部研究報告集, 第39巻, Paper No. 204, 2016.
- ⑦ 大崎 純, 宮津裕次, 津田勢太, 友田晴次, 極限解析による任意方向ヒンジを有する部分剛接合骨組の形態変化機構設計法, 日本建築学会第38回情報・システム・利用・技術シンポジウム,

Paper-No. H58, 2015.

- ⑧ 中原嘉之, 津田勢太, 大崎 純, 折紙の展開構造を利用した部分剛接合骨組による展開構造開発, 日本デザイン学会第62回研究発表大会概要集 2015, pp. 168-169, 2015.
- ⑨ 中原嘉之, 津田勢太, 大崎 純, 折紙の展開機構を利用した部分剛接合骨組による展開構造の接合部開発, 日本建築学会中国支部研究報告集, 第38巻, Paper No. 181, 2015.
- ⑩ 中原嘉之, 津田勢太, 大崎 純, 折紙の展開機構を利用した部分剛接合骨組による展開構造, 日本デザイン学会第4支部平成26年度研究発表会, pp. 8-9, 2015.
- ⑪ 津田勢太, 大崎 純, 中原嘉之, 折紙の展開機構を利用した部分剛接合骨組による展開構造, 日本建築学会大会学術講演梗概集(近畿), Paper-No.20400, pp. 799-800, 2014.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

津田勢太 (Seita Tsuda)

岡山県立大学・デザイン学部・准教授

研究者番号: 80584325

(2) 研究分担者

大崎 純 (Makoto Ohsaki)

京都大学・工学研究科・教授

研究者番号: 40176855

(3) 研究分担者

中原嘉之 (Yoshiyuki Nakahara)

岡山県立大学・デザイン学部・助手

研究者番号: 60726983