

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 6 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2011～2012

課題番号：23760086

研究課題名（和文） 新たな力学特性を発現する 3 次元空間構造体のモデル創成

研究課題名（英文） Creating a model of three-dimensional spatial structures that provide novel mechanical properties

研究代表者

田中 展（TANAKA HIRO）

東京大学・大学院工学系研究科・助教

研究者番号：70550143

研究成果の概要（和文）：本研究の目的は、結合節の回転特性に着目した柔軟構造モデルを構築し、新たな力学特性を発現する空間構造体を提案・開発することである。上記の研究目的に即し、2011 年度は結合節の多回転特性を表す 3 次元モデリングの開発に取り組んだ。また並行して、双剛性特性をもつ新規構造体を発見した。2012 年度は、得られた新規構造体の研究に重点を置き、柔剛特性を発現するセル構造を提案し、その設計開発に注力した。

研究成果の概要（英文）：The aim of our study is to propose and develop spatial structures that provide novel mechanical properties, constructing the model on flexibly jointed structures from the view of rotational characteristics of joints. To this end, in the 2011 we have carried out the development of three-dimensional joint modeling which represents the multi rotational characteristic at a joint. In parallel, we have newly found a structural framework with a bi-stiffness property. In the 2012 our research has been focused on the novel structure we obtained in the previous year, and then, we have concretely proposed the cellular structure that exhibits a soft-and-stiff property and have made its design development.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	3,200,000	960,000	4,160,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械材料・材料力学，構造力学

キーワード：空間構造体，柔軟節，可変機構，3次元回転，構造不安定

1. 研究開始当初の背景

超軽量性によって環境負荷低減を実現するセル状固体は、その構造内部の空間を利用することで、高比剛性、衝撃吸収特性、電磁波遮蔽性／透過性、熱伝導性／断熱性などの多彩な力学特性を発現する。これまで著者らは、空間構造体に内在する力学特性を表現したいという研究動機に基づき、節の回転特性に着目した 2 次元モデルを構築した。そして、空間構造体の座屈による変形局所化やオーゼティック機構、および展開収縮機構などの

新たな特性を解明してきた。

2. 研究の目的

2 次元モデルの力学特性を詳細に研究する最も重要な目的のひとつは、得られた知見を拡張することでより複雑な 3 次元空間構造体の変形メカニズムを明らかにすることである。実際、フォーム材のように多くのセル構造体は多様な 3 次元形状を有しており、2 次元形状のハニカムコア材に関しても、その 3 次元面外特性は構造評価における重要な工

学的指標となる。また、生体材料の場合、微小管やウイルスをはじめとする豊かな構造形態には枚挙に暇がない。これらの多彩な空間構造体には多種多様な接合形態が考えられ、本研究で構築した柔軟節構造体モデルを適応することが可能である。そこで、本研究では、3次元柔軟節モデルを定式化することを第一の目的とする。そして、第二の目的として、開発した柔軟節モデルから空間構造体の新たな変形メカニズムの解明を試みる。

3. 研究の方法

柔軟節の2次元モデルでは節上での回転が全て面内に拘束されるため、その相互作用は簡易な回転ばねの剛性行列で記述できる。他方、3次元モデルの場合、接合するはり部材から曲げとねじりが連成した回転モーメントが作用するため、柔軟節を介したそれらの物理的な相互作用は直観的に理解することが困難である。通常、有限な変位場を表す回転変位成分には、独立3成分で表される回転群：軸性ベクトル(回転擬ベクトル)、ロドリゲス変数、オイラー角、もしくは4次元ベクトル空間を表す四元数体が用いられる。本研究では、任意の回転角で特異性を持たない四元数体に対応するオイラーパラメータを採用し、その3次元回転行列を用いて3次元柔軟節の多回転モードを定式化する。

また、上記の研究課題と並行して、過去に著者らが発見した8配位節可変機構をベースに、特殊な結合形態による空間構造体の探索およびその力学特性の解明を実施する。

4. 研究成果

結合節の回転特性に着目した3次元柔軟構造モデルの構築および新たな力学特性を発見する空間構造体の提案・開発を目的として、2011年度は結合節の多回転特性を表す3次元モデリングの開発に取り組んだ。また並行して、双剛性特性をもつ新規構造体を発見した。2012年度は、得られた新規構造体の研究に重点を置き、柔剛特性を発見するセル構造体の設計開発に注力した。各研究成果の詳細を以下にそれぞれ示す。

(1) 3次元回転節モデルの構築

3次元柔軟節の α 配位と β 配位へ接続する軸 $\hat{n}^{\alpha,\beta}$ を定義し(図1参照)、それらの3次元有限回転を四元数体に基づく以下のオイラーパラメータで記述する。

$$\mathbf{E}^{\alpha,\beta} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_0 \\ \boldsymbol{\varepsilon} \end{Bmatrix}^{\alpha,\beta} = \begin{Bmatrix} \cos(\phi/2) \\ \hat{\mathbf{n}} \sin(\phi/2) \end{Bmatrix}^{\alpha,\beta}. \quad (1)$$

ここで、 $\phi^{\alpha,\beta}$ は α 、 β 配位の回転軸ベクトル $\hat{\mathbf{n}}^{\alpha,\beta}$ 回りの角度パラメータを表す、このとき、3次元回転行列は以下ようになる。

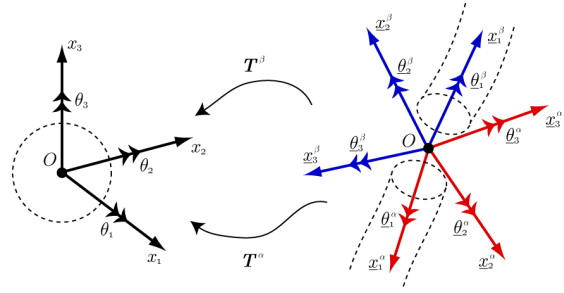


Fig. 1 The global coordinate system of a joint and the local coordinate systems of connected beams.

$$\mathbf{T}(\phi^{\alpha,\beta}) = \left[\mathbf{I}_3 \{(\varepsilon_0)^2 + (\boldsymbol{\varepsilon})^T \boldsymbol{\varepsilon}\} + 2\tilde{\boldsymbol{\varepsilon}}\varepsilon_0 + 2\boldsymbol{\varepsilon}(\boldsymbol{\varepsilon})^T \right]^{\alpha,\beta} \quad (2)$$

よって、 α 、 β 間の回転剛性行列は以下のように表せられる。

$$\Delta \mathbf{m}^{\alpha\beta} = (\mathbf{Z}_{\alpha\beta})^T \mathbf{H}_{\alpha\beta} \mathbf{Z}_{\alpha\beta} \Delta \boldsymbol{\theta}^{\alpha\beta} = \mathbf{H}_{\alpha\beta} \Delta \boldsymbol{\theta}^{\alpha\beta}, \quad (3)$$

ここで、

$$\mathbf{Z}_{\alpha\beta} = \begin{bmatrix} \mathbf{T}(\phi^\alpha) & \mathbf{O}_3 \\ \mathbf{O}_3 & \mathbf{T}(\phi^\beta) \end{bmatrix}.$$

n 配位の柔軟節の全ての相互作用を式(3)に基づいた重ね合わせにより記述することでき、その得られたヘッセ行列から柔軟節の基本回転モードを求められる。実際に、本研究ではダイヤモンド構造を作る4本継手の問題を対象に本モデルを適用した。そして、固有値が0の無抵抗回転モードにおける局所座標系の分配率を求め、曲げとねじりが4配位柔軟節を介して連成する関係を導いた。得られた研究成果は、M&M 若手シンポジウム2012(学会発表⑤参照)にて講演発表した。

(2) 柔剛特性を有するセル構造の発見

8配位節可変機構の2次元モードに関する研究(雑誌論文②参照)を端緒とし、微視構造が連動回転することで異なる2パターンの方セルに形態変化する8回対称可変構造を発見した(図2および図3参照)。ここでは、45度傾いて配向する場合をMotion I、垂直・水平方向に配向する場合をMotion IIと呼ぶ。

続いて著者らは非線形バネを内挿したモデルを用いてセル壁間の接触を考慮した大変形解析を行った。そして、圧縮負荷が境界凹部近傍に作用するとMotion Iが生じて構造は低剛性を維持すること、他方、圧縮負荷が境界凸部に作用するとMotion IIが生じて、剛性が著しく増加することを明らかにした(図4参照)。これは正方セルが強い異方性をもつことに依拠する。また、Motion IIでは分岐点を介して座屈後の2次経路が存在することを見いだした。

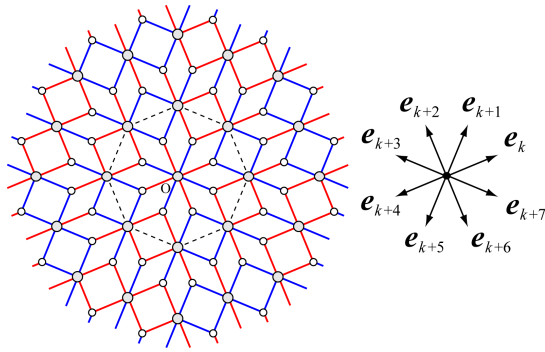


Fig. 2 Motion structure with eight-fold rotational symmetry. The adjacent beam segments painted in the same color, blue or red, are rigidly connected together on all the pivot joints.

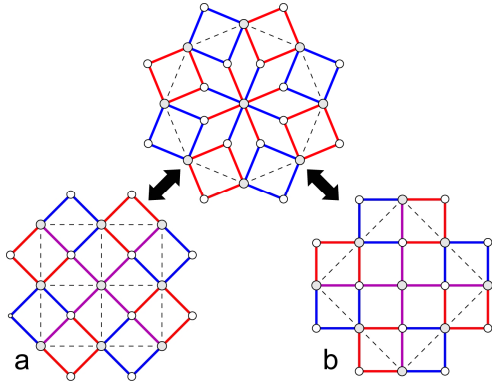


Fig. 3 Two types of transformations of the proposed structure ($m \leq 1$): (a) Motion I; (b) Motion II.

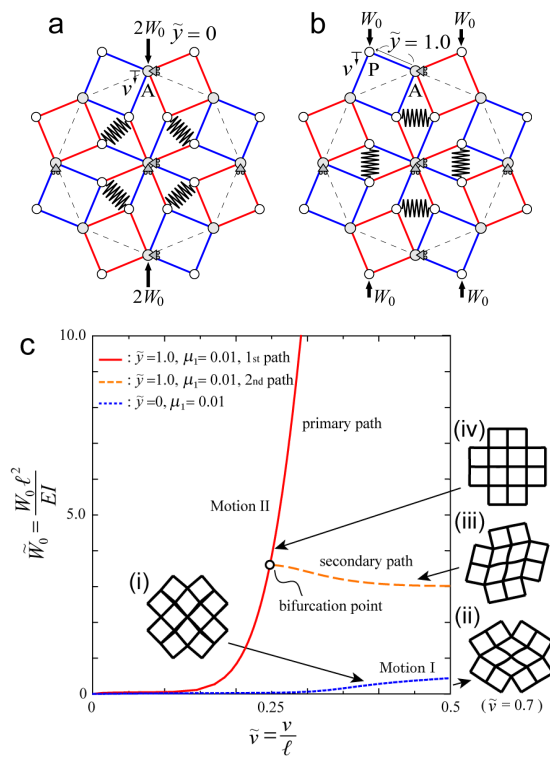


Fig. 4 Analytical model of the proposed structure for (a) Motion I or (b) Motion II; (c) dimensionless load-displacement curves.

次に、最小単位のセル構造の集合体に対する圧縮解析を行い、その力学特性を考察した。図 5(a)に示すような各ユニット間を線形ばねで連結するセル集合を考え、荷重条件は上端境界の重心に圧縮分布荷重を与える(図 5(b)参照)。上記の解析から得られた平衡経路とセル集合体の変形過程を図 5(c)に示す。図 5(c)より、セル集合体は全体的に Motion I が誘起されるが(形状(i)), その直後に剛性が低下し、変形は荷重作用付近に集中する(形状(ii))。その後剛性は回復するが、変形は荷重作用領域のみ進行し、その周辺の変形は除荷される(形状(iii))。続いて、剛性は緩やかに横ばいになり、周辺のユニットは荷重が作用する上端中央のユニットの変形に引きずられる形で Motion II が誘起される(形状(iv))。

上記の変形挙動は、内挿した線形ばねの挙動によって説明できる。荷重負荷の初期時は、線形ばねを介して各ユニットの境界中心に圧縮荷重が作用するため Motion I が優先される。しかし、Motion I が進行するとばねは伸張するので、ばねの内力は圧縮から引張に転じ、各ユニットの変形は Motion II が支配的になる。この平衡経路は、形状(i)で極大点を超えた後は飛び移る先がないため、本構造は局所的な荷重に対して弱いことがわかる。他方、各ユニットの正方セルの頂点に均等な荷重を作用させた場合は、全ユニットが Motion II を発現するため強い形状となる。

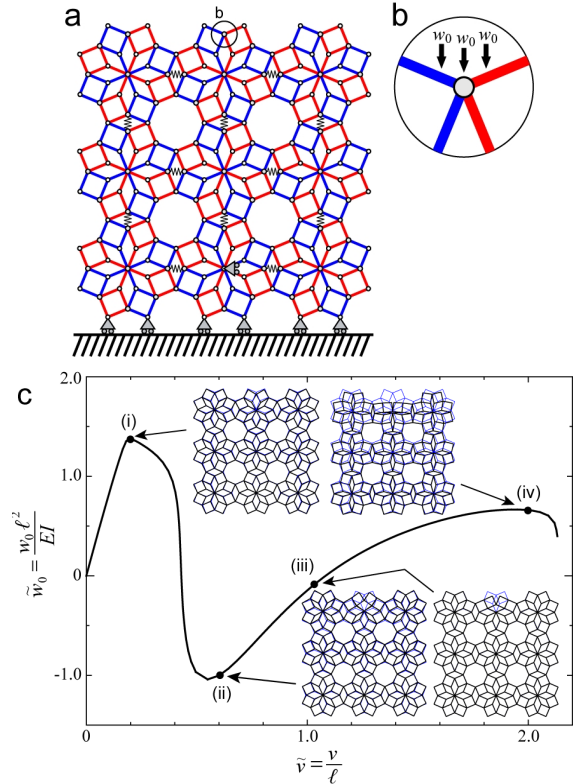


Fig. 5 (a) Repetitive assembly connected with linear springs; (b) the condition of compressive loading; (c) load-displacement curves and deformation shapes.

以上で得られた研究成果は、4件の国内学会ならびに2件の国際学会で講演発表を行い、国内学会にて優秀講演賞(第62回理論応用力学講演会)を1件受賞した。また、英文誌 *I. J. Solids. Struct.* と *Proc. Royal Soc. A* に研究論文が採択された(雑誌論文①, ②参照)。

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2件)

① Hiro Tanaka, Bi-stiffness Property of Motion Structures Transformed into Square Cells, *Proceedings of the Royal Society A*, Vol.469, No. 2156, 2013, 20130063; pp.1-17.

DOI: 10.1098/rspa.2013.0063

② H. Tanaka, Y. Shibutani, S. Izumi, S. Sakai, Planar Mobility of Eight-bar-jointed Structures with a Single Degree of Freedom, *International Journal of Solids and Structure*, Vol.49, No.13, 2012, pp. 1712-1722.

DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2012.03.008

[学会発表] (計7件)

① H. Tanaka, S. Izumi, S. Sakai, Mechanical Properties of Cellular Structures with Rigid Square Rotations, *ICTAM2012*, SM04-043, 19-24 Aug. 2012, Beijing, China.

② H. Tanaka, S. Izumi, S. Sakai, Buckling Properties of Flexible Square Cell Structures Subjected to Compression Loading, *WCCM2012*, No.18436, 8-13 July 2012, São Paulo, Brazil.

③ 田中展, 泉聡志, 酒井信介, 8回対称性微視構造を有するセル状固体の双剛性特性, 第62回理論応用力学講演会, 2013年3月, 東京工業大学大岡山キャンパス.

④ 田中展, 泉聡志, 酒井信介, 8位節骨組構造の展開機構と力学特性, 第28回宇宙構造・材料シンポジウム, 2012年12月, 宇宙科学研究所相模原キャンパス.

⑤ 田中展, 泉聡志, 酒井信介, 構造材料の変形機構と内部回転に関する3次元考察, *M&M若手シンポジウム2012*, 2012年8月, 北海道函館市.

⑥ 田中展, 泉聡志, 酒井信介, 正方セルの回転に誘起されるD8対称構造の力学特性, 第61回理論応用力学講演会, 2012年3月, 東京大学生産技術研究所.

⑦ 田中展, 渋谷陽二, 泉聡志, 酒井信介, 単一自由度を有する8位節反復構造の可変機構, 第16回計算工学講演会, 2011年5月, 東京大学柏キャンパス.

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

○取得状況 (計0件)

[その他]

○受賞歴 (計1件)

賞名: 優秀講演賞

対象: 田中展

学会名: 第62回理論応用力学講演会

受賞日: 2013年3月22日

○ホームページ等

(日本語)

http://www.fml.t.u-tokyo.ac.jp/member_tanaka.html

(英語)

http://www.fml.t.u-tokyo.ac.jp/member_eng3.html

6. 研究組織

(1) 研究代表者

田中展 (TANAKA HIRO)

東京大学・大学院工学系研究科・助教

研究者番号: 70550143

(2) 研究分担者

(3) 連携研究者