

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 1 日現在

機関番号：14401

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2013～2016

課題番号：25709001

研究課題名（和文）柔剛特性を発現するセル状固体の創生

研究課題名（英文）Cellular solids having soft-and-stiff characteristics

研究代表者

田中 展 (TANAKA, Hiro)

大阪大学・工学（系）研究科（研究院）・助教

研究者番号：70550143

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 16,500,000円

研究成果の概要（和文）：多種多様な環境下に応じて剛性を調整できる構造が存在すれば、従来の枠組にはない機械設計が可能となる。本研究では、異なる荷重条件下で剛性を受動的に切り替える「柔剛特性」という概念を提唱し、その具現化に向けた基礎研究に従事した。具体的には、数値解析によって周期セル状固体の内部剛性が増加すると変形遷移が生じ、剛性が顕著に変化することを明らかにした。そして、低自由度の周期リンク構造においても類似の遷移メカニズムが存在することを証明した。また最適構造化システムの高度化の一環として、積層方向に高い負のポアソン比を維持する3次元直交異方性積層セル構造体を新しく開発した。

研究成果の概要（英文）：It enables us to introduce a new mechanical design if structures potentially adjust their stiffness to reflect various changing circumstances. In this study, we proposed the concept of soft-and-stiff characteristics that the stiffness is passively switched according to different load conditions, and engaged the basic research going forward into its creation. Concretely, we numerically clarified that a specific cellular solid exhibits a deformation transition as increasing the internal stiffness and the overall stiffness changes dramatically during the transition. It was also proved that a similar transition mechanism exists within a periodic linked structure with low degrees of freedom. We in parallel developed the orthotropic laminated cellular structures retaining strong auxeticity in the stacking direction as a part of optimized structural system enhancements.

研究分野：固体力学

キーワード：柔剛特性 可変機構 8回回転対称 正方セル 変形遷移 分岐現象 ポアソン比

1. 研究開始当初の背景

微視的内部構造を有する空間構造体は日常で多く観察される。例えば、建築骨組、大型橋梁および車体フレームなどは工業的に特化したマクロな空間構造体であり<sup>(1)</sup>、一方、ハニカム材やフォーム材などのセル状固体は高比剛性・高比強度に優れた構造材料としてミクロな空間構造体に位置付けられる<sup>(2)</sup>。特に、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、その内部構造の空間を利用することで、衝撃エネルギー吸収特性、電磁波遮蔽性/透過性、熱伝導性/断熱性などの多機能材料としての付加価値が期待されている。

これまで、著者らは空間構造体の一種として8配位可変構造を独自に開発した<sup>(3)</sup>。そして、その2次元変形モードに関する研究を端緒として、剛接合とピン接合の組み合わせによる8配位節の回転モードを調査し、周期的な8配位可変構造の7組の変形モードを導出した。その中には、シザーズ機構や負のポアソン比を発現する Auxetic 機構ならびに展開機構などが含まれる。次に、それらのモードを組み合わせることによって8回回転対称可変構造を考案した。8回回転対称可変構造は、剛な正方セル群が同心円状にピン接合した単一自由度系となり、正方セルが連動回転することで異なる2パターンの正方セルに形態変化する(図1参照)。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<sup>(4)</sup>。

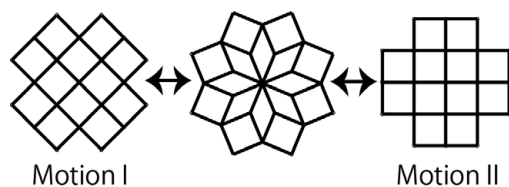


Fig. 1 A unit cell of the proposed structure and the two types of its motions.

参考文献：(1) 斎藤公男, "空間構造物語", 彰国社(2003). (2) L.J. Gibson, M.F. Ashby, "Cellular solids; Structure and properties-2nd ed." Cambridge (2017). (3) H. Tanaka et al., *Int. J. Solids. Struct.* (2012). (4) H. Tanaka, Y. Shibusatani, *ICTAM2008* (2008).

2. 研究の目的

多種多様な環境下に応じて剛性を調整できる構造が存在すれば、従来の枠組みにはない機械設計が可能となる。上述した研究背景に基づき、本研究では異なる荷重条件下で剛性を受動的に切り替える「柔剛特性(双剛性

特性)」という概念を提唱し、その具現化に向けた基礎研究に従事する。また、有限要素法による数値シミュレーションの高度化など最適構造化システムの構築に注力し、構造模型開発の支援および試験環境の充実を図る。本研究期間では、これらの相補的連携によって柔剛特性など新しい力学特性を発現するセル状固体を設計・開発することを主目的に置き、以下に示す細分化した3つの研究テーマを実施した。

研究テーマ1：

2次元周期セル構造体の変形解析と剛性評価

研究テーマ2：

2次元周期リンク構造体の変形遷移状態と臨界点の理論的導出

研究テーマ3：

新たな力学特性を発現する構造設計と最適構造化システムの構築

3. 研究の方法

上記の研究テーマ1では数値シミュレーションを主体とし、研究テーマ3では実験を主体とした研究活動を行った。以下にそれらの研究方法について説明する。

3.1 数値シミュレーション

対象とする2次元周期セル構造体とその解析モデルを図2に示す。本構造ははりと節から構成され、初期形状において直角を成すはりはり同士が剛接合されており、他のはりはり同士は滑接合されている。また隣接するセル間に線形ばねを内挿している。ここで、はりの長さを  $l$ 、軸剛性を  $EA$ 、曲げ剛性を  $EI$  とし、線形ばねのばね剛性を  $k$  とする。また無次元化ばね剛性を  $\bar{k} = k l^3 / EI$  と定義する。はり部材は3節点2要素のはり要素モデルを10要素連結して表現する。本構造に圧縮荷重  $W = (W_c + 2W_s)$  を作用させ、それに伴う圧縮変位を  $u$  とする。また、圧縮方向以外の変位には周期境界条件を課す。なお数値解析手法としては、Total Lagrangian 表記に基づく弧長法を採用し、系の大変形問題を解いた。

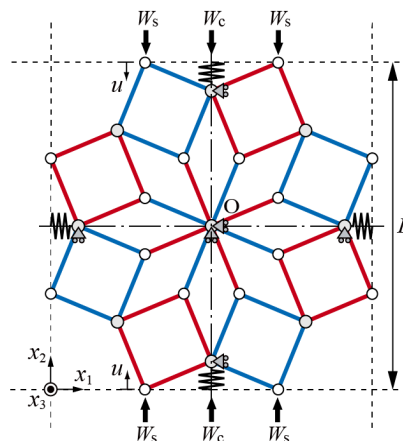


Fig. 2 Periodic two-dimensional cellular structure and the analytical model.

### 3. 2 実験

2種類の3Dプリンター (uPrint SE Plus, Stratasys社およびFormiga P110, EOS GmbH社)を用いてABS樹脂製とナイロン樹脂製のセル構造体を作製した. 図3左に示すように, 本構造は面内(x-y平面)に5×5セル, 面外方向(z軸方向)に4セルで構成される直交異方性積層セル構造体となる. なお図3で示す構造はナイロン樹脂製に対応している.

本構造用の治具を特注加工し, 単軸引張試験を実施した. その概観を図3右に示す. x方向に変位速度1 mm/minの引張変形を負荷し, セル構造体のx-y面およびx-z面をそれぞれカメラ撮影した. そして事前に印した特徴量を画像処理解析によって追跡することで各セルの変形計測を行った. 画像処理解析によって計測した内側セルと外側セルの特徴量の抽出例を図4に示す. 最終的に得られたセル座標を元に面内方向と面外方向のポアソン比 $\nu_{xy}$ と $\nu_{xz}$ をそれぞれ計算した.

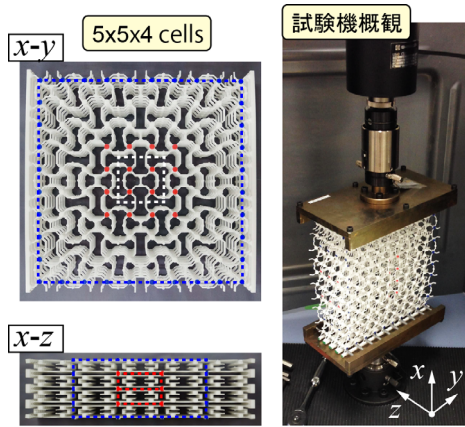


Fig. 3 Manufactured orthotropic laminated cellular structure and the tensile test.

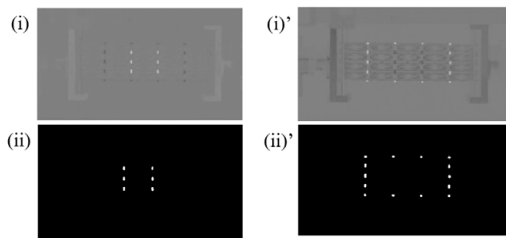


Fig. 4 Image processing (x-z plane).

### 4. 研究成果

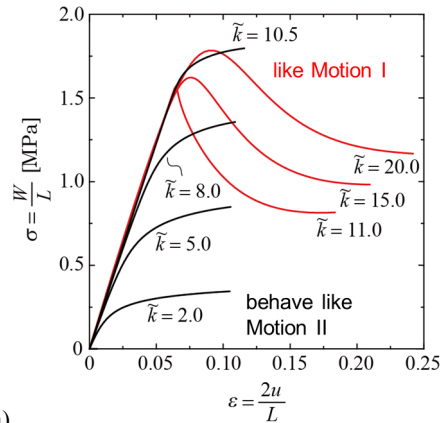
#### 4. 1 2次元周期セル構造体の変形解析と剛性評価

前述した解析モデル (3. 1節参照)を用いて得られた周期セル構造体の応力-ひずみ曲線とポアソン比-ひずみ曲線を図5(a), (b)にそれぞれ示す. 図5(a)より, 無次元化ばね剛性 $\tilde{k}$ を変化させたとき,  $10.5 \leq \tilde{k} \leq 11.0$ の間で応力-ひずみ曲線の特性が大きく変化していることがわかる. このとき,  $\tilde{k} \leq 10.5$ で本構造はMotion IIに対応する変形モードを示し,  $11.0 \leq \tilde{k}$ でMotion Iに対応する変形モードを示す. すなわち, 内部剛性を増加させることで変形遷移が生じている. また注目すべきこ

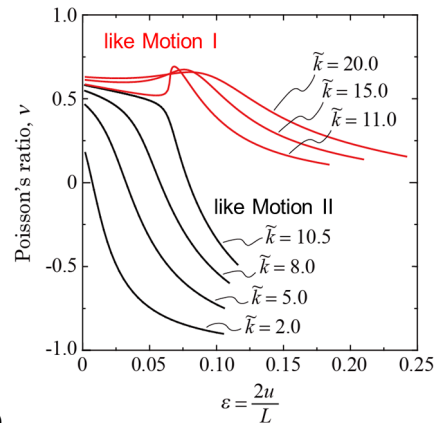
ととして, ある一定のひずみに達したところでMotion I or IIに急激に変形が進むが, それまでは類似の応力-ひずみ曲線の経路を通して $\tilde{k}$ の影響は少ない. 言い換えると, 系の初期剛性は $\tilde{k}$ に大きく依存しない.

上記のような変形遷移は, 図5(b)のポアソン比の変化からも確認できる. 例えば,  $\tilde{k} \leq 10.5$ ではポアソン比があるひずみに達したときに急激に減少するが,  $11.0 \leq \tilde{k}$ ではポアソン比が一旦増加してから減少に転じる. また, ポアソン比-ひずみ曲線の場合, 応力の場合と異なり $\tilde{k}$ に依存してその初期値が大きく変化していることも確認できる.

次に, 変形遷移の原因を調べるために,  $\tilde{k}=10.5$ と $\tilde{k}=11.0$ の変形形状を図6に示す. 図6より, 点Qおよび点Mに作用している力( $W_s$ および $W_c$ )と点Pとの位置関係をみると,  $\tilde{k}=10.5$ では点Pは $W_s$ の作用線の内側にあるのに対して,  $\tilde{k}=11.0$ では点Pは $W_s$ の作用線上にある. すなわち, 両者において回転モーメントの優位な方向が逆転している. そのた



(a)



(b)

Fig. 5 (a) Stress-strain curves and (b) Poisson's ratio-strain curves of the analytical model.

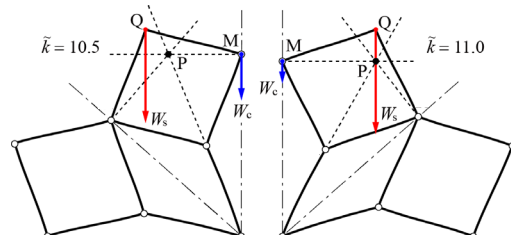


Fig. 6 Magnified views of the deformed cells.

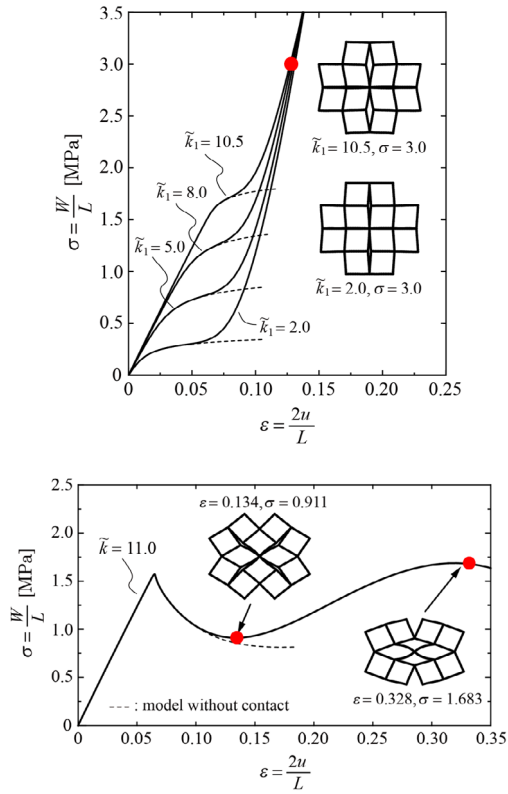


Fig. 7 Stress-strain curves of the pseudo-contact Model after switching to Motion II or I.

め、Motion II から Motion I への変形の切り替えが起きることがわかる。点 P の移動はセルのゆがみに依拠しており、セル壁(はり)の曲げ変形が変形遷移メカニズムにとって重要な役割を果たしていることが確認できる。

次に、セル壁間の接触を考慮した拡張モデルを用いて計算した応力-ひずみ曲線を図 7 に示す。図 7 より、Motion II に転じた場合はセル壁間の接触によって剛性が急激に増加するのに対して、Motion I に転じた場合は応力が減少する不安定な変形モードとなる。

以上より、2次元周期セル構造体が柔剛特性を発現することを数値シミュレーションによって明らかにした。

#### 4. 2 2次元周期リンク構造体の変形遷移状態と臨界点の導出

前節より、周期構造においても柔剛特性を示すことがわかったが、セル壁の連続的な曲げ変形の定式化は複雑になるため、得られた変形遷移に対して数学的な考察を与えるのは困難である。そのため、本節では図 8 に示すような2次元周期リンク構造を考える。

系の総和ポテンシャルエネルギーは以下のように表される。

$$\Pi = U_k(\theta_m, \theta_s) + U_r(\theta_s) - W_2 d_2$$

ここで、

$$U_k = 2 \cdot \frac{1}{2} k (u_1^2 + u_2^2), \quad U_r = 32 \cdot \frac{1}{2} r (2\theta_s)^2$$

となる。無次元パラメータを以下のように設

定したとき、

$$\tilde{\Pi} \equiv \frac{\Pi}{32r}, \quad \tilde{k} \equiv k, \quad \tilde{W}_2 \equiv \frac{W_2 \ell}{32}, \quad \tilde{d}_2 \equiv \frac{d_2}{\ell}, \quad \tilde{u}_{1,2} \equiv \frac{u_{1,2}}{\ell}$$

ポテンシャルエネルギーの停留原理( $\delta \tilde{\Pi} = 0$ )から以下の連立方程式が導かれる。

$$\frac{\partial(U_k + U_r)}{\partial \theta_m} - \tilde{W}_2 \frac{\partial \tilde{d}_2}{\partial \theta_m} = 0, \quad \frac{\partial(U_k + U_r)}{\partial \theta_s} - \tilde{W}_2 \frac{\partial \tilde{d}_2}{\partial \theta_s} = 0$$

上式より、 $\tilde{W}_2$  を取り除くと、

$$\frac{\partial(U_k + U_r)}{\partial \theta_m} \bigg/ \frac{\partial \tilde{d}_2}{\partial \theta_m} - \frac{\partial(U_k + U_r)}{\partial \theta_s} \bigg/ \frac{\partial \tilde{d}_2}{\partial \theta_s} = 0$$

が得られ、両辺に  $\partial \tilde{d}_2 / \partial \theta_m \cdot \partial \tilde{d}_2 / \partial \theta_s \cdot (1/2)$  を乗じたときの左辺の式を  $g^*$ -関数と定義する。

以降、 $g^*$ -関数を用いて考察する。 $\tilde{k} = 0.1$  および  $\tilde{k} = 0.4$  のとき  $g^* = 0$  を満足する  $(\theta_m, \theta_s)$  の集合(平衡経路)を図 9 上段にそれぞれ示す。両図を比べてみると、第 4 象限にある平衡経路は原点の初期状態から始まり類似の経路を取ることがわかる。これらは引張変形を表す。一方、圧縮変形の場合は両図の変形挙動は大きく異なり、 $\tilde{k} = 0.1$  のときは  $\theta_m$  が大きく減少し、 $\tilde{k} = 0.4$  ときは  $\theta_m$  が大きく増加することがわかる。図 8 より  $\theta_m$  が正のときは Motion I を、 $\theta_m$  が負のときは Motion II を表す。そのため、前節と同様に本リンク構造においても内部のばね剛性を増加させることで、Motion

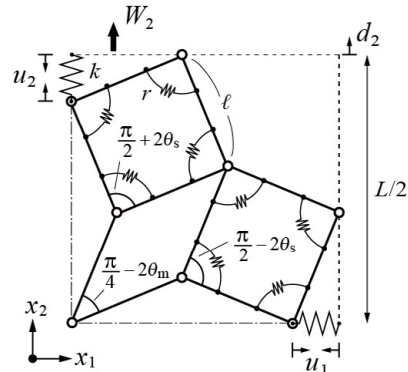


Fig. 8 Periodic link model with 2 DOFs.

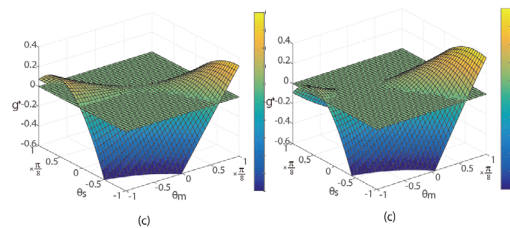
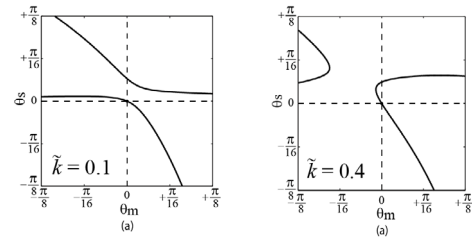


Fig. 9 Calculated equilibrium paths,  $g^*$ -function and load-displacement curves for  $\tilde{k} = 0.1, 0.4$ .



II から Motion I への変形の切り替えが起きている。

$k=0.1$  および  $\tilde{k}=0.4$  のときの  $g^*$ -関数の曲面を図 9 下段にそれぞれ示す。両図より、 $g^*$ -関数は鞍点をもつ双曲放物面であることがわかる。すなわち、系の平衡経路は  $g^*$ -関数の超平面( $g^*=0$ )と等価であり、 $g^*$ -関数の上昇・下降によって変形遷移が起きることが予測できる。そして、その変形遷移の臨界点は  $g^*$ -関数の鞍点に一致する。さらに本研究では、系の総和ポテンシャルエネルギーを弱い非線形項で近似し、その鞍点の厳密解を導出した。そして変形遷移状態における  $(\theta_m, \theta_s)$  の平衡経路と無次元化荷重-変位曲線の定式化を行い、系の安定性を解明した。

研究テーマ 2 では、変形遷移の解析と並行して周期リンク構造体の模型開発に従事した。製作したリンク構造の基本骨格を図 10 に示す。この基本骨格を用いて、単位セルの中心節点と正方リンクに弾性体の拘束を課し、セル同士をヒンジ連結させた構造模型を作製した。本構造模型の変形モードを調べたところ、Motion II と Motion I に類似する形態を確認した(図 12 参照)。今後の課題としては、境界を強制的に変位させるなど自由度の拘束を行い、理論解と比較できるような構造模型の開発を実施する予定である。

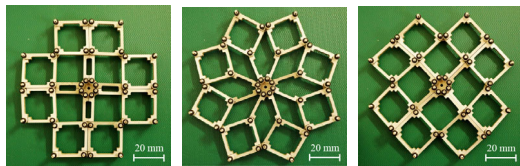


Fig. 10 Subtype of the structural framework.

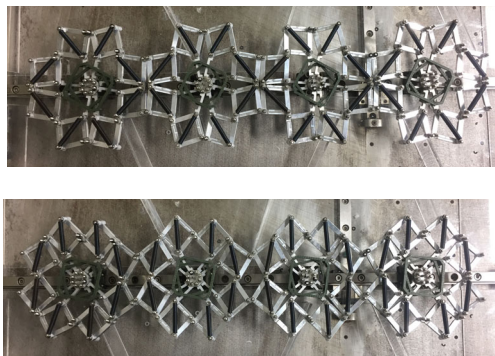


Fig. 11 Real structural motions.

#### 4. 3 新たな力学特性を発現する構造設計と最適構造化システムの構築

前述した直交異方性積層セル構造体(3.2節参照)に対して  $x$  方向に単軸引張変形を負荷したときの  $x$ - $z$  側面の変形形状を図 12 に示す。図 12 より、本構造体は面外方向( $z$  方向)に膨張しており、負のポアソン比を示すことがわかる。また、内側セルと外側セルの特徴量(赤色および青色)の位置検出によって得られたポアソン比と公称ひずみの関係を図 13 に示す。図 13 より、内側セルの面外方向

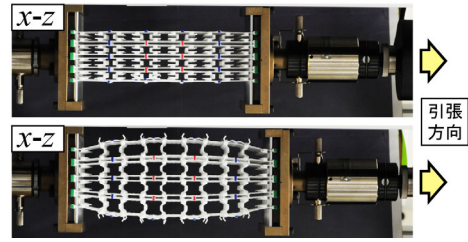


Fig. 12 Auxetic deformation of the manufactured structure under uniaxial tensile loading.

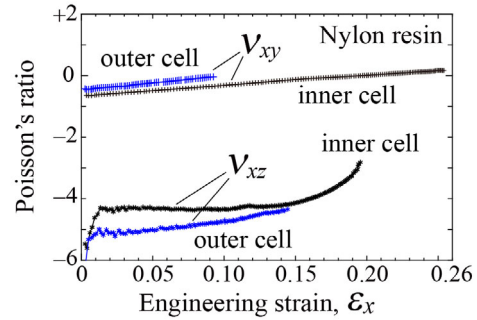


Fig. 13 Measured in-and out-of-plane Poisson's ratio curves as a function of strain.

のポアソン比  $v_{xz}$  は -4 となり、公称ひずみが 15% に達するような大変形においても維持していることが観察できる。高い負のポアソン比を示す構造はこれまでも提案されているが、そのほとんどは引張変形のみを対象としており、本構造のように大変形下においても高い負のポアソン比を維持する実験的事例は少なく有益な研究成果が得られた。

本研究テーマでは並行して、模型開発支援に向けた最適構造化システムの高度化を目的として、摺動解析モデルや均質化有限要素法モデル、ならびにはりの 3 次元弾塑性モデルの開発に従事した。これらの研究成果については、次章に列挙した雑誌論文および学会発表のリストを参照されたい。

#### 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 7 件)

- ① H. Tanaka, K. Suga, N. Iwata, Y. Shibutani, "Orthotropic laminated open-cell frameworks retaining strong auxeticity under large uniaxial loading", *Scientific Reports*, 7 (2017), 39816. DOI: 10.1038/srep39816
- ② 杉浦順哉, 奥村 大, 田中 展, "微細パターン構造に生じる面外うねり座屈の比較解析" *計算数理工学論文集*, 16 (2016), pp.49-54.
- ③ B. Pan, Y. Shibutani, H. Tanaka, "Dislocation-based constitutive model of crystal plasticity for the size effect of single crystalline micropillar samples", *Mechanical Engineering Journal*, 3 (2016), 15-00602. DOI: 10.1299/mej.15-00602
- ④ H. Tanaka, T. Nakanishi, Y. Shibutani, "Switching between two types of auxetic behavior of two-dimensional periodic cells with

- square rotation”, *Physica Status Solidi B*, **253** (2016), pp.718-725.  
DOI: 10.1002/pssb.201552572
- ⑤ B. Pan, H. Tanaka, Y. Shibutani, “Effect of surface energy upon size-dependent yield strength of single-crystalline hollow micro- and nanopillars”, *Materials Science and Engineering: A*, **659** (2016), pp.22-28.  
DOI: 10.1016/j.msea.2016.01.117
- ⑥ H. Tanaka, K. Yoshimura, R. Sekoguchi, J. Aramaki, A. Hatano, S. Izumi, S. Sakai, H. Kadowaki, “Prediction of the friction coefficient of filled rubber sliding on dry and wet surfaces with self-affine large roughness”, *Mechanical Engineering Journal*, **3** (2016), 15-00084.  
DOI: 10.1299/mej.15-00084
- ⑦ H. Tanaka, “Bi-stiffness Property of Motion Structures Transformed into Square Cells”, *Proceedings of the Royal Society A*, **469** (2013), 20130063. DOI: 10.1098/rspa.2013.0063

[学会発表] (計 17 件)

- ① 岩田直己, 渋谷陽二, 田中 展, “マイクロポーラ理論による直交異方性骨組み構造体の均質化弾性定数の同定”, *日本機械学会関西支部第92期定時総会講演会*, 大阪大学吹田キャンパス, 大阪府吹田市, 2017/3/13-14.
- ② 須賀海斗, 岩田直己, 田中 展, 渋谷陽二, “負のポアソン比を示す直交異方性積層セル構造体の単軸引張試験と画像処理変形計測”, *関西学生会平成28年度学生員卒業研究発表講演会*, 大阪大学吹田キャンパス, 大阪府吹田市, 2017/3/11.
- ③ 浜田一駿, 田中 展, 渋谷陽二, “低自由度周期リング構造の変形遷移解析と分岐解の導出”, *関西学生会平成28年度学生員卒業研究発表講演会*, 大阪大学吹田キャンパス, 大阪府吹田市, 2017/3/11.
- ④ H. Tanaka, Y. Shibutani, “Localized rule of buckling deformations of periodic square cells under equi-biaxial compression”, *IMECE2016*, Phoenix, USA, 2016/11/11-17.
- ⑤ 田中 展, 吉村侯泰, 泉 聡志, 酒井信介, “タイヤゴムと粗い表面間の摩擦モデルとその高精度化”, *日本ゴム協会関西支部2016年秋季ゴム技術講習会*, (株)島津製作所関西支社マルチホール, 大阪府大阪市, 2016/10/6-7.
- ⑥ H. Tanaka, T. Nakanishi, Y. Shibutani, “Transformation shift of periodic cellular structures by controlling internal stiffness”, *ICTAM2016*, Montreal, Canada, 2016/8/21-26.
- ⑦ H. Tanaka, N. Iwata, Y. Shibutani, “Out-of-plane deformation characteristic of a microscopic layer and auxetic behavior of their laminated structure”. *WCCM XII & APCOM VI*, Seoul, Korea, 2016/7/24-29.
- ⑧ 田中 展, 吉村侯泰, 泉 聡志, 酒井信介, “タイヤと路面間の摩擦モデルの研究動向とその課題について”, *自動車技術会2016年春季大会 タイヤ特設委員会フォーラム*, パシ

- フィコ横浜, 神奈川県横浜市, 2016/5/25-27.
- ⑨ 中西東風, 田中 展, 渋谷陽二, “局所的剛性制御による2次元周期構造の変形分岐モデルの構築” *関西学生会平成27年度学生員卒業研究発表講演会*, 大阪電気通信大学寝屋川キャンパス, 大阪府寝屋川市, 2016/3/10.
- ⑩ H. Tanaka, T. Nakanishi, Y. Shibutani, “Switching of conventional and auxetic deformations of cellular structure due to boundary conditions”, *Plasticity2016*, Hawaii Island, USA, 2016/1/4-8.
- ⑪ 飯森理人, 田中 展, 渋谷陽二, 劉 陽, “レベルセット法によるコンプライアンス最小化のトポロジー最適化と Michell 最適構造の一樣強さとの関連性”, *日本機械学会第25回設計工学・システム部門講演会*, 信州大学長野キャンパス, 長野県長野市, 2015/9/23-25.
- ⑫ K. Yoshimura, R. Sekoguchi, L. Zhou, H. Tanaka, H. Kadowaki, S. Izumi, S. Sakai, “Comparison of theory for rubber friction on rough surface with experiment under dry and wet conditions”, *ITC2015*, Tokyo, Japan, 2015/9/16-20.
- ⑬ H. Tanaka, M. Inoue, S. Izumi, S. Sakai, “Lateral buckling of micropatterned structures for semiconductor devices during dry etching”, *(ESMC2015)*, Madrid, Spain, 2015/7/6-10.
- ⑭ 南航 司, 渋谷陽二, 垂水竜一, 田中 展, “マイクロポーラはりをういた大たわみ変形挙動の非線形有限要素解析”, *日本機械学会関西支部第90期定時総会講演会*, 京都大学桂キャンパス, 京都府京都市, 2015/3/16-17.
- ⑮ 岩田直己, 南 航司, 渋谷陽二, 田中 展, “均質化有限要素解析による骨組み構造体の異方性特性”, *日本機械学会関西学生会平成26年度学生員卒業研究発表講演会*, 京都大学桂キャンパス, 京都府京都市, 2015/3/14.
- ⑯ H. Tanaka, K. Yoshimura, J. Aramaki, S. Izumi, S. Sakai, H. Kadowaki, “Multiscale estimating technique of rubber friction on surface asperities depending on sliding velocity”, *MMM2014*, Berkeley, USA, 2014/10/6-10.
- ⑰ H. Tanaka, “Coordinated motions of repetitive structures from a mechanical point of view”, *SoCG2014*, Kyoto University Yoshida Campus, Kyoto-fu, Japan, 2014/6/8-11.

[その他]

研究室ホームページ :  
<http://www-comec.mech.eng.osaka-u.ac.jp/tanaka.html>  
大阪大学研究者総覧 :  
<http://www.dma.jim.osaka-u.ac.jp/view?l=ja&u=6364>

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

田中 展 (TANAKA Hiro)  
大阪大学・大学院工学研究科・助教  
研究者番号 : 70550143