

平成 30 年 5 月 27 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26249002

研究課題名(和文) 部材化構造体ネットワークの創製

研究課題名(英文) Innovative Network Structures with Size Effect and Nonlocality

研究代表者

澁谷 陽二 (SHIBUTANI, Yoji)

大阪大学・工学研究科・教授

研究者番号：70206150

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 30,910,000円

研究成果の概要(和文)：軽量化のために極度に比強度を向上させた部材からなる構造体の外部負荷に応じた構造変化を追跡し、多様な力学的挙動を創出する部材化構造体ネットワークの創製を実施した。その特異な変形能として、本研究ではサイズ効果と非局所性を取り上げた。マクロなサイズでの発現機構について、3Dプリンターによる試作構造体で負のポアソン比を実験的に確認し、マイクロメートルオーダーの特性長さを均質化有限要素解析により確認した。また、非局所性とサイズ効果の関連性を明確にするために、ミクロなサイズでのピラー型試験片を用いた圧縮試験を行った結果、降伏点の上昇とともに相界面の存在でサイズ効果の変化することがわかった。

研究成果の概要(英文)：The objective of the present research is to produce innovative network structures with size effect and nonlocality with keeping the higher specific strength. To realize the structures, the framework structure consisting of beams is the best candidate. The research has been performed from the two kinds of representative sizes; one is the millimeter-sized model. The original framework structure was manufactured by 3D-printer and it is found that the structure shows the predicted negative Poisson ratio. Also, this model has the micrometer-level characteristic length which indicates how large the nonlocality is potentially equipped in the model. The other is micrometer-sized pillar on the surface of materials which was manufactured by focused ion beam. The compressive loading using nanoindentation shows the clear size effect on the yield points and it suggests that the introduction of phase boundary can drastically change the deformability of structures.

研究分野：固体力学，計算力学

キーワード：部材化構造体 非局所性 サイズ効果 骨組み構造体 均質化非局所性有限要素法

1. 研究開始当初の背景

省エネルギーや CO₂ 削減に必須の構造物の軽量化を担保しながら、変形過程での有限変位/非局所化/構造不安定性の予測と制御に基づく新たな変形能を持つ構造体ネットワークの創出に、学術的そして工学的な興味を持たれている。すなわち、比強度を極度に向上させた骨組み/薄板構造体を対象に、従来の連続体力学では具備しない特性長さといった材料・構造特性（力学的なサイズ効果）が現れる。そして、その特性を踏まえた有限変位場における非線形変形挙動を予測することで、運動の自由度に対して制御するためのアクチュエータの数が少ない、いわゆる劣駆動マニピュレータと呼ばれる運動制御法に相当する力学的制御が可能となり、多様な変形パターンを創出できる考えに至った。

2. 研究の目的

軽量化のために極度に比強度を向上させた部材からなる構造体ネットワークの外部負荷に応じた構造変化を追跡し、分岐現象に伴う構造不安定をフィードバック制御することなく、多様な力学的挙動を創出する部材化構造体ネットワークの創製を目的とする。その特異な変形能の一つとして、本研究では非局所性の性質を取り上げ、マクロなサイズ（ミリメートルサイズ）での発現機構とともに、ミクロなサイズ（マイクロメートルサイズ）で非局所性が引き出すサイズ効果について検討する。

3. 研究の方法

平成 26 年度及び 27 年度は有限変位非局所化理論枠の構築を先行して始める。剛性マトリクス法を用いた有限変位の柔軟節を持つトラス構造解析手法に、曲率テンソルを付加したひずみエネルギー密度関数の変分原理に基づくマイクロポーラ構成関係式を導入する。この有限変位非局所化非線形構造体力学に基づき、平成 26 年度からサイズ効果と構造不安定の解析を実施し、変形モードのパターン分類を行う。また、ミリメートルサイズでの骨組み構造の試作と、マイクロメートルのサイズ効果を検証するマイクロピラーの試作を行う。

平成 28 年度と 29 年度は、構造体ネットワークの仕様に応じたミリメートルサイズの実機の試作と変形様式の計測を行い、部材化構造体ネットワークを提案する。また、マイクロメートルサイズのピラーの単軸圧縮試験を実施し、非局所性と関連づけられる力学挙動におけるサイズ効果を調査する。

4. 研究成果

(1) 有限変位非局所化非線形構造体力学の枠組みには、2つの非線形性が含まれている。1次元部材や2次元部材では回転に伴い剛体的変形が増大し、部材に生じるひずみが微小でも非線形性を生じさせる有限変位となる

(この意味で、ここでは有限ひずみを意図する“有限変形”とは区別している)。この非線形性の取り扱いについて、研究分担者(田中)が研究協力者(南)とともに、弧長法を用いた数値計算の安定性を高めた剛性マトリクス法による定式化と解析を実施した。もう一つの材料非線形性であるが、一般に軽量化を極めた部材の変形は曲げ支配となり、変形の自由度として変位ベクトルとともに回転角ベクトル(たわみ角)を持つ。前者からは通常のひずみテンソル、後者からは曲率テンソルが定義される。これらの運動学的量に対して、系全体のひずみエネルギーを2次形式で定義し、変分原理に基づきひずみエネルギー関数から構成関係式を導出した。その結果、通常の弾性定数テンソルに加えて非局所化弾性定数テンソルが得られ、これは一般には計測が困難な材料特性値となる。数値解析のスキームとして、この有限変位非局所化非線形構造体力学の定式化を組み入れた有限要素解析手法を完成させた。

(2) ミリメートルサイズ n 配位構造体ネットワークの試作については、すでに試作実施済みの2次元4配位柔軟節構造体ネットワーク(図1参照)を参照した3次元配置の構造体ネットワークを作成した。そのような構造が周期的なマイクロ構造として配置された連続体モデルを考え、はり部材からなる構造に対する均質化有限要素解析プログラムを開発した。既存の正方格子やすでに発表した n 配位構造体ネットワークに対する解析を実施し、数値計算の精度の範囲内で予測どおりの均質化弾性定数の得られることを確認した。

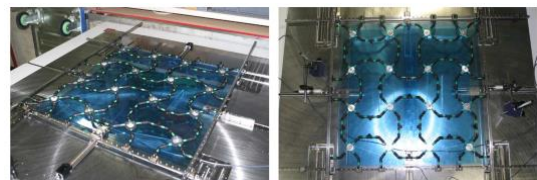


図1 2次元4配位柔軟節構造体ネットワーク

(3) マイクロメートルサイズ部材の試作については、中実円筒、中実四角柱といった部材の試作のために、集束イオンビーム加工機(FIB)のマイクロ加工技術を用いて実施した。その試料に対して、単軸圧縮変形の負荷応答を調査し、サイズ効果を調べた(図2参照)。

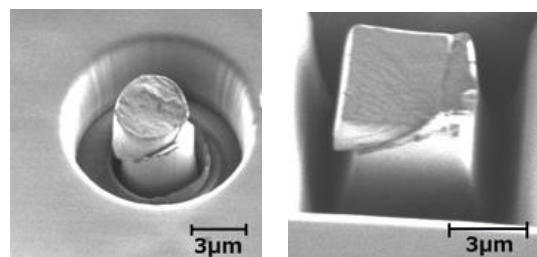


図2 マイクロピラーの製作と圧縮試験

結晶性ピラーのサイズ効果を表現できる構成式をあらたに提案し、その構成式モデルに基づく結晶塑性弾塑性有限要素解析プログラムの開発を行った（一例として、図3の双結晶の解析事例参照）。実験結果を首尾良く表現するためのパラメータを同定した上で、サイズ効果が予測できることを定量的に明らかにした。

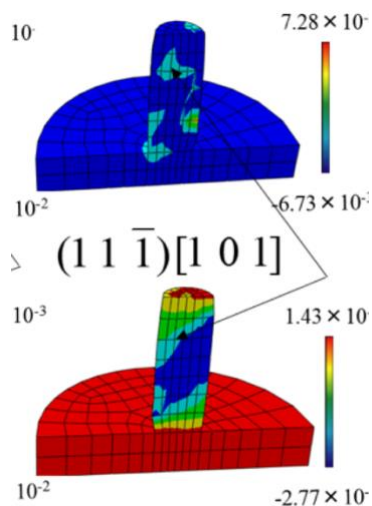


図3 マイクロピラーの結晶塑性弾塑性有限要素解析の一例

(4) ミリメートルスケール配位構造体ネットワークの試作: 新たな3次元骨組構造体ネットワークとして、負のポアソン比を示す卍型配置の3次元部材化構造体ネットワークを3Dプリンターにより試作した (図4参照)。

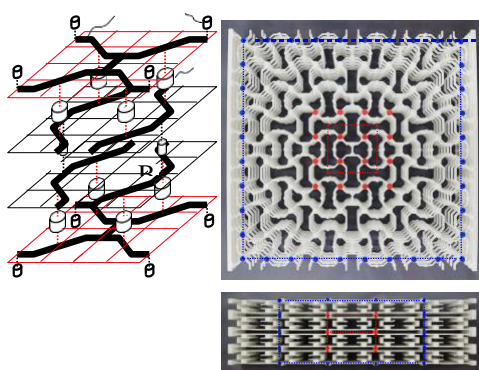


図4 3次元卍型構造体ネットワーク

そして、それを用いた単軸の引張/圧縮試験を実施した (図5参照)。予想した負のポアソン比を示し、かつ変形に応じたポアソン比の変化を計測できたことで、定量的に新規な変形能を確認できた。この成果は、Nature系の雑誌、Scientific Reports (インパクトファクター5.228) に掲載された。そして、変形の過程で生じる不安定現象を観測し、分岐後の挙動を荷重-変位曲線から確認した。

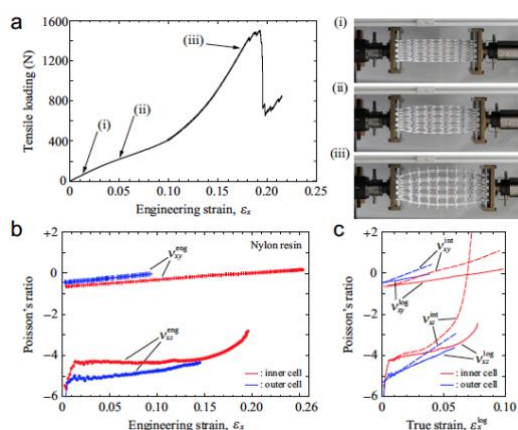


図5 負のポアソン比を示す実験データ

(5) マイクロポーラ弾性体の構成式と平衡方程式、そして新たな回転自由度を持つ変位一ひずみ関係のマイクロ連続場の力学理論を、

(2) で開発した均質化有限要素法に組み込んだ。線形応答の範囲ではあるが、(1) 及び (4) で試作されたモデルを含めた3種類の均質化弾性定数を求めた結果、新たな知見が以下のように得られた。

(i) ミクロな構造に非局所性を保持しなくても、やはり近似のマクロな構成式に非局所性を導入すれば、その存在を示すことができること。

(ii) 特性長さのオーダーはマイクロメートルスケールを持つこと。

(iii) 非局所性を増大すれば、負のポアソン比を持つ構造でもポアソン効果を消失させる特異な変形能を持たせることができること。

(iv) 微視構造セルのサイズの変化に応じた均質化弾性定数の結果より、非局所性の存在がサイズ効果をもたらす直接的な要因であることを確認した。

これらは、非局所性とサイズ効果の関連性を明らかにし、その特異な変形能の応用化に通じる大きな知見である。

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5件)

① 奥村大, 大塚真生, 渋谷陽二, 分子動力学法によるマグネシウムナノツイン構造の塑性変形機構解析, 材料, 67巻, 2018, pp.215-221.

② H. Tanaka, K. Suga, N. Iwata and Y. Shibutani, Orthotropic laminated open-cell frameworks retaining strong auxeticity under large uniaxial loading, Scientific Reports, Vol.7, 2017, pp.39816.

③ 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, Vol.253, 2016, pp.718-725.

- ④ Bo Pan, Hiro Tanaka and Yoji Shibutani, Effect of surface energy upon size-dependent yield strength of single-crystalline hollow micro- and nanopillars, *Materials Science & Engineering A*, Vol.659, 2016, pp.22-28.
- ⑤ Bo Pan, Yoji Shibutani, Xu Zhang and Fulin Shang, Effect of dislocation pile-up on size-dependent yield strength in finite single-crystal micro-samples, *Journal of Applied Physics*, Vol.118, 2015, pp.014305-1-8.

[学会発表] (計 17 件)

- ① 浜田 一駿, 渋谷 陽二, 田中 展, 均質化された非局所はり構造のポアソン比と非局所性の関係, 日本機械学会関西支部第93期定時総会講演会, 2018年.
- ② 大塚 真生, 奥村 大, 渋谷 陽二, 分子動力学法を用いたMgナノツイン構造の双晶界面移動と二重双晶生成の競合関係, 関西支部第93期定時総会講演会, 2018年.
- ③ 南條隆正, 田中 展, 渋谷陽二, 周方向圧縮による局所的なねじり回転を許容する環状構造体の座屈後変形挙動, 日本機械学会関西学生会2017年度学生員卒業研究発表講演会, 2018年.
- ④ H. Tanaka, K. Suga, N. Iwata, D. Okumura, Y. Shibutani, Finite element simulations on the elastic constants and large deformations of orthotropic laminated open-cell frameworks with negative Poisson's ratios, 20th International Conference of Composite Structures (ICCS20), 2017.
- ⑤ 田中 展, 須賀 海斗, 奥村 大, 渋谷 陽二, 直交異方性積層セル構造体の力学特性評価とその応用, 第28回新構造・機能制御と傾斜機能材料シンポジウム, 2017年.
- ⑥ 大塚真生, 奥村大, 渋谷陽二, 分子動力学法によるMgナノツイン構造の欠陥の生成と発展挙動, 日本材料学会第66期通常総会・学術講演会, 2017年.
- ⑦ 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, 日本機械学会関西学生会平成27年度学生員卒業研究発表講演会, 2017年.
- ⑧ 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, 2017年.
- ⑨ Hiro Tanaka, Naoki Iwata, Yoji Shibutani, Out-of-plane Deformation Characteristic of a Microscopic Layer and Auxetic Behavior of their Laminated Structure, 12th World Congress on Computational Mechanics (WCCMXII) & 6th Asia-Pacific Congress

on Computational Mechanics (APCOM VI), 2016-7, Soul.

- ⑩ R. Tarumi and Y. Shibutani, Elastic constants of 3D simple lattice structures studied by resonant ultrasound spectroscopy, 9th Pacific Rim International Conference on Advanced Materials and Processing (PRICM) 9, 2016-8, Kyoto.
- ⑪ H. Tanaka, T. Nakanishi, Y. Shibutani, Transformation Shift of Periodic Cellular Structure by Controlling Internal Stiffness, 24th International Congress of Theoretical and Applied Mechanics (ICTAM2016), 2016-8, Motreal.
- ⑫ 垂水竜一, 金政敏, 渋谷陽二, 二次元カイラル金属構造体の共鳴振動特性解析, 日本金属学会秋期大会, 2016年.
- ⑬ 中西東風, 潘 渤, 渋谷陽二, 田中展, 単結晶マイクロピラーのサイズ効果を考慮した降伏関数, 日本機械学会M&M2016材料力学カンファレンス, 2016年.
- ⑭ H. Tanaka, Y. Shibutani, Localized Rule of Buckling Deformations of Periodic Square Cells Under Equibiaxial Compression, International Mechanical Engineering Congress & Exposition (IMECE2016), 2016-11, Phenix.
- ⑮ 南 航司, 渋谷陽二, マイクロポーラはりを用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, 2015年.
- ⑯ 岩田直己, 南 航司, 渋谷 陽二, 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学生員卒業研究発表講演会, 2015年.
- ⑰ 垂水竜一, 渋谷陽二, マイクロポーラ弾性理論に基づいた金属積層構造体の共鳴振動解析, 日本金属学会第 156 回春季講演大会, 2015年.

[図書] (計 1 件)

- ① 渋谷陽二, 中谷彰宏, コロナ社, 材料力学, 2017, 335

[産業財産権]

- 出願状況 (計 1 件)
 名称: 多節環状弾性体
 発明者: 田中 展, 岩田直己, 渋谷陽二
 種類: 特許
 番号: 特願2017-045107号
 出願年月日: 2017年03月09日
 国内外の別: 国内

- 取得状況 (計 0 件)
 なし

[その他]
 ホームページ等

・大阪大学大学院工学研究科機械工学専攻
渋谷研究室
<http://www-comec.mech.eng.osaka-u.ac.jp/>
・大阪大学大学院工学研究科附属アトミック
デザイン研究センター
<http://www.camt.eng.osaka-u.ac.jp/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

渋谷 陽二 (SHIBUTANI, Yoji)
大阪大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号：70206150

(2) 研究分担者

田中 展 (TANAKA, Hiro) (平成26年度のみ)
大阪大学・大学院工学研究科・助教 (平成29年度より講師)
研究者番号：70550143

(3) 連携研究者

垂水 竜一 (TARUMI, Ryuichi) (平成26年度のみ)
大阪大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号：30362643

(4) 研究協力者

南 航司 (MINAMI, Koji)
岩田 直己 (IWATA, Naomi)
渤 潘 (BO, Pan)
飯森 理人 (IIMORI, Masato)
中西 東風 (NAKSANISHI, Tofu)
横川 龍世 (YOKOKAWA, Ryusei)
浜田 一駿 (HAMADA, Kazuki)
柴田 龍一 (SHIBATA, Ryuichi)