

## 均質化解析によるノンレシプロカルゲルの引張・圧縮非対称性評価

TENSION-COMPRESSION ASYMMETRY EVALUATION OF A NONRECIPROCAL GEL BY  
HOMOGENIZATION ANALYSIS布施 卓馬<sup>1)</sup>, 松原 成志朗<sup>2)</sup>, 永島 壮<sup>3)</sup>, 奥村 大<sup>4)</sup>

Takuma FUSE, Seishiro MATSUBARA, So NAGASHIMA and Dai OKUMURA

- 1) 名古屋大学大学院工学研究科 (〒464-8603 名古屋市千種区, E-mail: fuse.takuma.b8@s.mail.nagoya-u.ac.jp)
- 2) 名古屋大学大学院工学研究科 (〒464-8603 名古屋市千種区, E-mail: seishiro.matsubara@mac.nagoya-u.ac.jp)
- 3) 名古屋大学大学院工学研究科 (〒464-8603 名古屋市千種区, E-mail: so.nagashima@mac.nagoya-u.ac.jp)
- 4) 名古屋大学大学院工学研究科 (〒464-8603 名古屋市千種区, E-mail: dai.okumura@mac.nagoya-u.ac.jp)

A nonreciprocal gel consisting of hydrogel and nanosheet exhibits mechanical nonreciprocity, which has potential applications in mechanical engineering. An earlier study has revealed that this mechanical nonreciprocity is triggered by the tension-compression asymmetry resulting from the microscopic buckling behavior of nanosheets during compressive deformation, but the relevant influencing factors remain unknown. In this study, we investigate the microscopic buckling behavior and the resultant tension-compression asymmetry in a nonreciprocal gel subjected to uniaxial conditions. Eigenvalue buckling and post-buckling analyses equipped with computational homogenization are performed on a unit cell modeled as an elastic bilayer for which ratios of Young's modulus and thickness are parameterized. The results confirm that selecting a dilute microscopic buckling with the characteristic wavelength or a non-dilute microscopic buckling with the infinite wavelength hinges on the ratios of Young's modulus and thickness, which is consistent with the theoretical solution for the buckling behavior of a layered composite. We also elucidate that the tension-compression asymmetry is more pronounced as the Young's modulus ratio increases or the thickness ratio decreases.

**Key Words:** Nonreciprocity, Buckling, Gels, Composites, Homogenization

## 1. 緒 言

近年, 負荷方向に依存してノンレシプロカルな力学挙動を示す材料が注目されている<sup>(1)</sup>. これらは力学的エネルギーの伝達制御や変換が可能であり, 特定方向への物質輸送といった非対称システムの開発を促進させると期待されている. ノンレシプロカルな力学挙動を示す材料として, これまでに長方形フレームを基本単位とするフィッシュボーン構造<sup>(2-4)</sup>やマイクロロボットをはりで接続したメタマテリアル<sup>(5,6)</sup>が開発されている. しかし, これらは所望のノンレシプロカル性に応じて緻密な微視的(マイクロ)構造の設計を必要とし, 実用に供する段階には至っていない.

Liu ら<sup>(7)</sup>は, ハイドロゲル中でナノシートを磁気配向させることで, 所望の方向にノンレシプロカルな力学挙動を発生させることが可能なノンレシプロカルゲル(NRゲル)を開発した. 本材料に特徴的な引張・圧縮非対称性は, 引張と圧縮負荷の方向に依存して弾性率が数十倍異なる性質であり

<sup>(8,9)</sup>, 多様な負荷条件下でノンレシプロカルな力学挙動を発生させる<sup>(10)</sup>.

実験事実として, NRゲルの引張・圧縮非対称性は, ナノシートのマイクロ座屈挙動に起因することが明らかとなっている. 一方で, マイクロ座屈挙動の起点や座屈後のマイクロ構造の変形, さらにはマイクロ座屈挙動を反映した巨視的(マクロ)な力学応答の引張・圧縮非対称性に対する定量化は十分でない. これらを支配する影響因子の解明は, NRゲルの設計自由度をさらに増やし, 実用に展開するために重要である.

複合材料のマイクロ座屈挙動は, 多孔質体を代表例として古くから研究がなされてきた<sup>(11-13)</sup>. マイクロ座屈挙動に対する座屈点や座屈後変形に関する議論は成熟の域に達しているが, 引張・圧縮非対称性の機構理解に重要なマイクロ座屈挙動とマクロな力学応答との関係性については未解明な部分が多い.

そこで本研究では, 単軸負荷条件が課されたNRゲルの周期構造単位(ユニットセル)に対して均質化解析を実施し, マイクロ座屈挙動と引張・圧縮非対称性に関わる影響因子を評価する. ユニットセルはハイドロゲルとナノシートの二層弾

性体としてモデル化し、各構成材料の厚さ比とヤング率比をパラメータとする。ユニットセルの座屈固有値解析では、マイクロ座屈のエネルギー的に優れた波長（優先波長）を評価する。また、得られた優先波長と座屈モードを用いて座屈後解析と均質化を実施し、マクロな力学応答としての引張・圧縮非対称性を評価する。一連の解析を通して、厚さ比とヤング率比に応じて、ユニットセルの全体もしくはナノシートのみが座屈するパターンが選択され、得られた結果は層状複合材料を対象とした理論解<sup>(14)</sup>と良好に一致することを示す。また、厚さ比が小さく、ヤング率比が大きいほど、NRゲルの引張・圧縮非対称性が顕著になることも示す。

## 2. 解析方法

厚さ  $H_g$  の水素ゲルに厚さ  $H_s$  のナノシートが埋め込まれた NRゲルのユニットセルを Fig.1 に示す。実際の NRゲルは複数の短いナノシートが一定の間隔で整列するマイクロ構造を有しているが、本研究では簡単に面内寸法が NRゲルと同じである一枚のナノシートが層状に配置されるマイクロ構造を仮定する。水平方向の寸法  $L$  はマイクロ座屈挙動によるリクルパターンが1波長分だけ生じるように設定し、以後、波長と呼称する。また、水素ゲルとナノシートの材料挙動は、それぞれ微圧縮 neo-Hookean 超弾性体（ヤング率： $E_g$ 、ポアソン比： $\nu_g=0.49$ ）と線形弾性体（ヤング率： $E_s$ 、ポアソン比： $\nu_s=0.4$ ）に従うと仮定する。

NRゲルのユニットセルに対する均質化解析は、汎用有限要素解析ソフトウェア ABAQUS<sup>(15-17)</sup>を用いて実施する。Fig.2 にユニットセルの解析モデルと境界条件を示す。解析モデルの水素ゲルとナノシートは、それぞれ4節点低減積分平面ひずみハイブリッド要素（CPE4RH）と4節点平面ひずみ要素（CPE4）を用いて離散化する。解析モデルには周期境界条件を課し、マクロな単軸荷重は解析モデル境界面上の節点群と多点拘束で結ばれた外部節点の節点荷重もしくは節点変位を制御することによって考慮する。後者の場合では、マクロひずみ  $\epsilon$  を入力として、 $L$  との積を外部節点への強制変位として作用する。また、マクロ応力  $\sigma$  は、外部節点の反力をユニットセル境界面の面積で除して求める。これらの方法は、マクロ物理量をマイクロ物理量の体積平均によって算出する操作に等価であり、均質化理論に厳密に整合する。最後に、均質化法における許容条件として、解析モデル左下

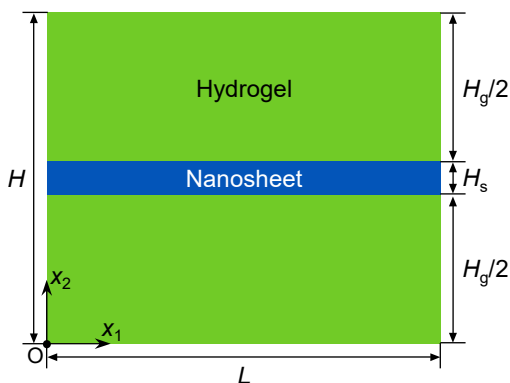


Fig.1 Unit cell of a NR gel.

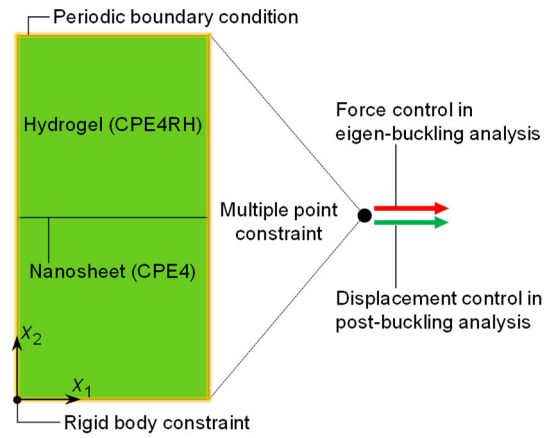


Fig.2 Numerical model of a unit cell with boundary condition. Macroscopic force and displacement are applied to the numerical model via an external node (black marker) connected with the boundary surfaces of the numerical model by multiple point constraint.

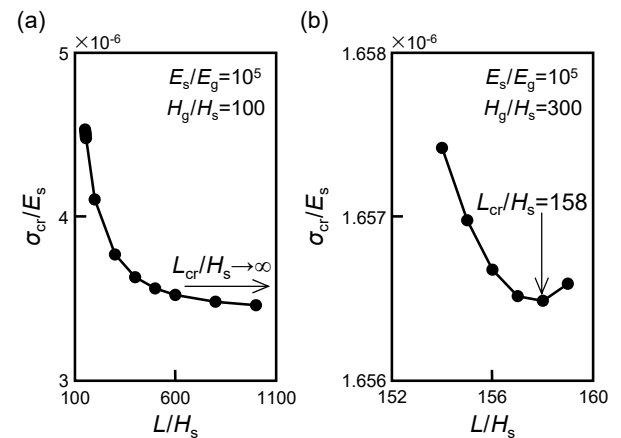


Fig.3 Normalized buckling stress,  $\sigma_{cr}/E_s$ , as a function of the normalized wavelength,  $L/H_s$ , in the cases of (a)  $E_s/E_g=10^5$ ,  $H_g/H_s=100$  and (b)  $E_s/E_g=10^5$ ,  $H_g/H_s=300$ . While the priority wavelength,  $L_{cr}/H_s$ , is undetermined in the case (a),  $L_{cr}/H_s$  has the characteristic value of 158 in the case (b).

の節点を完全拘束して剛体運動を拘束する。

計算結果の無次元化は、寸法については  $H_s$  を用い、応力については  $E_s$  を用いる。また、ヤング率比と厚さ比をそれぞれ  $E_s/E_g=10^3\sim 10^6$ 、 $H_g/H_s=10^2\sim 10^3$  の範囲で設定し、これらがマイクロ座屈挙動や引張・圧縮非対称性に及ぼす影響をパラメトリックに調査する。

ユニットセルの座屈点と座屈モードを求めるために座屈固有値解析を実施する。本解析では、外部節点の節点荷重を制御しながら座屈点を探索する。また、波長  $L$  をパラメトリックに変化させて各々の  $E_s/E_g$  と  $H_g/H_s$  の組み合わせに対応する座屈応力  $\sigma_{cr}$  を求め、最小の  $\sigma_{cr}$  に対応する優先波長  $L_{cr}$  を探索する。Fig.3 に、 $E_s/E_g=10^5$ 、 $H_g/H_s=100$  の場合（図中(a)）と  $E_s/E_g=10^5$ 、 $H_g/H_s=300$  の場合（図中(b)）に対する  $\sigma_{cr}/E_s$  と  $L/H_s$  の関係を示す。前者では、 $\sigma_{cr}/E_s$  が  $L/H_s$  に対して単調減

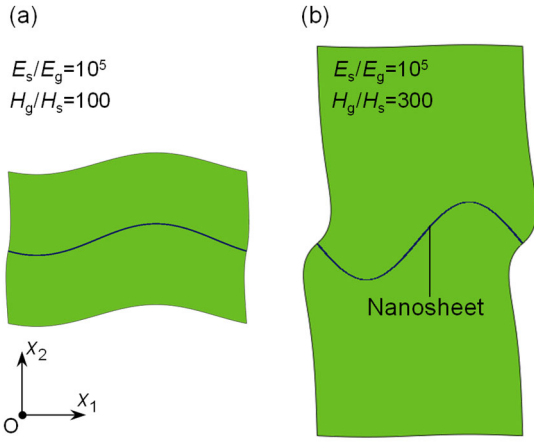


Fig.4 Deformed configurations of buckled unit cells in the cases of (a)  $E_s/E_g=10^5$ ,  $H_g/H_s=100$  (Non-dilute system) and (b)  $E_s/E_g=10^5$ ,  $H_g/H_s=300$  (Dilute system). The global buckling pattern emerges in the non-dilute system, whereas the nanosheet is only buckled in the dilute system.

少であり、正規化優先波長  $L_{cr}/H_s$  が無限長となる一方で、後者では、 $\sigma_{cr}/E_s$  が最小値をとる  $L/H_s=158$  が優先波長となる。

Fig.4 に示すように、対応する座屈モードは、それぞれユニットセル全体の座屈 (図中(a)) とナノシートのみの座屈 (図中(b)) を表現し、本研究では前者を非希薄系、後者を希薄系のマイクロ座屈挙動として分類する。

座屈固有値解析で得られた座屈モードと  $L_{cr}$  を用いて座屈後解析を実施する。具体的には、水平方向寸法  $L_{cr}$  のユニットセルに座屈モードを初期不整として与えた後、外部節点に強制変位を作用させる計算を実施する。そして、得られたマクロ応力・ひずみ関係から NR ゲルの引張・圧縮非対称性を評価する。

### 3. 座屈固有値解析の結果

様々なヤング率比  $E_s/E_g$  と厚さ比  $H_g/H_s$  の組み合わせについて座屈固有値解析を実施し、得られた結果を用いてマイクロ座屈挙動を希薄系と非希薄系に分類したものを Fig.5 に示す。ここで、図中青色の境界線は、理論式

$$\frac{H_g}{H_s} = \frac{1 - \nu_f^*}{\nu_f^*} \quad (1)$$

$$\nu_f^* = \frac{1}{2(1 + \nu_g)} \left\{ \frac{(1 + \nu_g)(3 - 4\nu_g)}{3(1 - \nu_g)} \right\}^{\frac{2}{3}} \left( \frac{E_s}{E_g} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (2)$$

で表される  $H_g/H_s$  と  $E_s/E_g$  の関係をプロットしたものであり、マイクロ座屈挙動を希薄系 (図中水色) と非希薄系 (図中橙色) に分類する<sup>(14)</sup>。式(1), (2)は、ハイドロゲルのポアソン比  $\nu_g$  に依存し、 $E_s/E_g$  が小さい、もしくは  $H_g/H_s$  が大きいほどマイクロ座屈挙動が希薄系になりやすいことを示している。

Fig.5 より、数値的に求めたマイクロ座屈挙動の分類は、理論式を用いた分類と概ね一致した。本理論式は微小変形の仮定の下で Euler-Bernoulli はり理論に基づき導出されたものであ

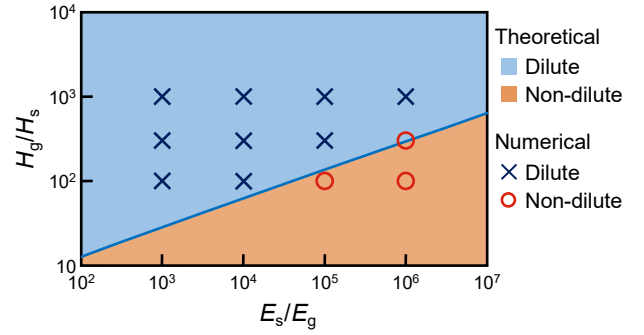


Fig.5 Classification of microscopic buckling into dilute and non-dilute systems for each combination of Young's modulus ratio,  $E_s/E_g$ , and thickness ratio,  $H_g/H_s$ . The blue line indicates the theoretically predicted boundary between dilute and non-dilute systems using Eqs. (1), (2). Numerical results are in good agreement with the theoretical prediction except for the case of  $E_s/E_g=10^6$ ,  $H_g/H_s=300$ .

るが、構造力学的な仮定をしない超弾性体についても幅広い  $E_s/E_g$  と  $H_g/H_s$  の範囲で理論解と整合する結果が得られることがわかった。しかし、 $E_s/E_g=10^6$ ,  $H_g/H_s=300$  の組み合わせについては異なる結果となった。これは、本パラメータセットが境界線近傍の値であり、先に挙げた基盤理論の違いが座屈モードや  $L_{cr}$  の評価に差を生み、結果としてマイクロ座屈挙動の判定に影響を及ぼしたことが原因であると考えられる。

次に、希薄系のマイクロ座屈挙動について、ユニットセルの優先波長  $L_{cr}$  の計算結果と理論解を比較する。Fig.6 に、3種の  $H_g/H_s$  に対する正規化優先波長  $L_{cr}/H_s$  と  $E_s/E_g$  の関係を示す。ここで、図中黒色の破線は、次式で示される  $E_s/E_g$  が十分に大きい場合における  $L_{cr}$  の理論式<sup>(14)</sup>をプロットしたものである。

$$\frac{L_{cr}}{H_s} = \pi \left\{ \frac{(1 + \nu_g)(3 - 4\nu_g)}{3(1 - \nu_g)} \frac{E_s}{E_g} \right\}^{\frac{1}{3}} \quad (3)$$

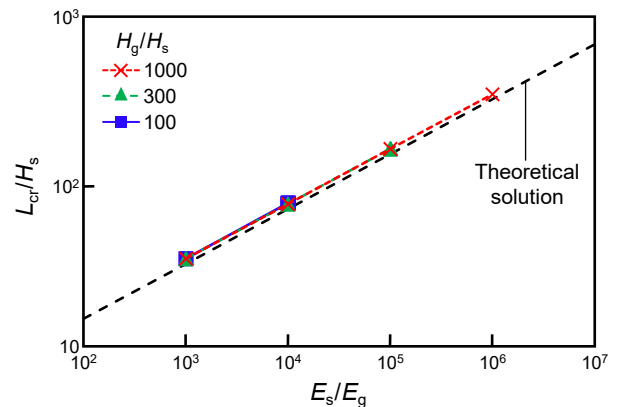


Fig.6 Comparison of priority wavelength,  $L_{cr}/H_s$ , of a unit cell in the dilute system between theoretical solution and numerical results for each combination of Young's modulus ratio,  $E_s/E_g$ , and thickness ratio,  $H_g/H_s$ . Numerical results are in good agreement with the theoretical solution.

座屈固有値解析を通して得られた優先波長は、理論式と良く一致することがわかる。特に、本解析結果は、式(3)で示される  $L_{cr}/H_s$  が  $H_g/H_s$  に無関係に決定することも正しく予測できている。以上の結果より、 $L_{cr}$  についても幅広い  $E_s/E_g$  と  $H_g/H_s$  の範囲で理論解と整合する結果が得られることがわかった。

最後に、希薄系のマイクロ座屈挙動について、座屈ひずみ  $\epsilon_{cr}$  の計算結果と理論解を比較する。計算では、マクロ応力・ひずみ関係に線形性が認められる引張ひずみ  $\epsilon=0.01\%$  をユニットセルに作用し、得られたマクロ応力を  $\epsilon$  で除することでマクロなヤング率を計算する。そして、座屈固有値解析を通して得られた座屈応力  $\sigma_{cr}$  をマクロなヤング率で除することで  $\epsilon_{cr}$  を求める。一方、ヤング率比  $E_s/E_g$  が十分に大きいとする仮定の下で、 $\epsilon_{cr}$  の理論式<sup>(4)</sup>は次式で表される。

$$\epsilon_{cr} = \left\{ \frac{(1 + \nu_g)(3 - 4\nu_g) E_s}{3(1 - \nu_g) E_g} \right\}^{-\frac{2}{3}} \quad (4)$$

本式は、ハイドロゲルのポアソン比  $\nu_g$  に依存し、 $E_s/E_g$  が大きいほど、 $\epsilon_{cr}$  が小さくなることを示している。

上述の手順で計算した  $\epsilon_{cr}$  と理論解との比較を Fig.7 に示す。計算で求めた  $\epsilon_{cr}$  は、幅広い  $E_s/E_g$  について理論解と良く一致している。特に、式(4)で示される  $\epsilon_{cr}$  が厚さ比  $H_g/H_s$  に無関係であることも正しく評価できている。この結果は、本研究で実施した座屈固有値解析が正しく座屈点を評価することを示すものであり、先に比較したマイクロ座屈挙動の分類や優先波長の結果とあわせて、座屈固有値解析は正しく実施されていることが示された。

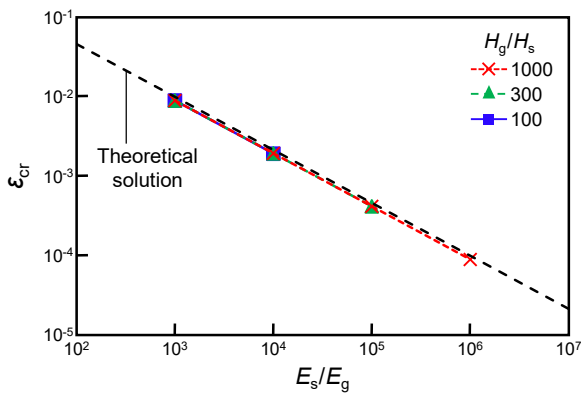


Fig.7 Comparison of buckling strain,  $\epsilon_{cr}$ , of a unit cell in the dilute system between theoretical solution and numerical results for each combination of Young's modulus ratio,  $E_s/E_g$ , and thickness ratio,  $H_g/H_s$ . Numerical results are in good agreement with the theoretical solution.

#### 4. 座屈後解析の結果

Fig.8 に、マイクロ座屈挙動が非希薄系となる場合について、それぞれ大きさ  $|\epsilon| = (0.1, 0.2)$  の圧縮ひずみ (図中(a)) と引張ひずみ (図中(b)) を作用したときのユニットセルの変形と水平方向のマイクロひずみ成分  $\epsilon_{mic}$  の分布を示す。ユニットセルは圧縮負荷を受けて全体が座屈して正弦波状に変形した後、正弦波の振幅が大きくなるように変形が進展することが確

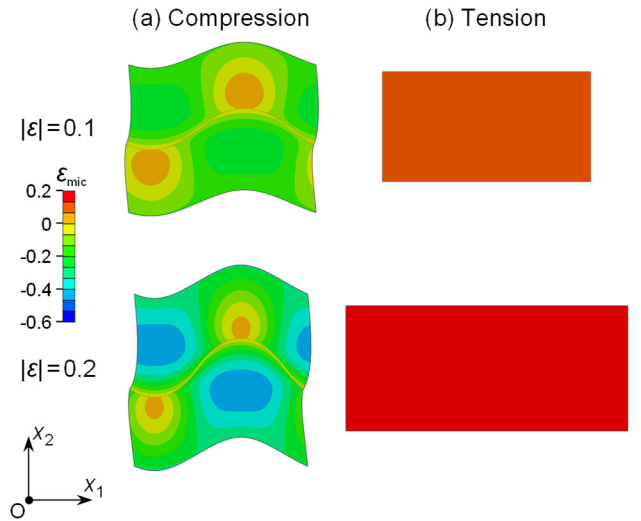


Fig.8 Deformed configurations with the distributions of the microscopic horizontal axial strain,  $\epsilon_{mic}$ , for the unit cells with the wavelength,  $L=158$ , subjected to (a) compressive and (b) tensile axial macroscopic strains,  $|\epsilon|=(0.1,0.2)$ , in the non-dilute system.

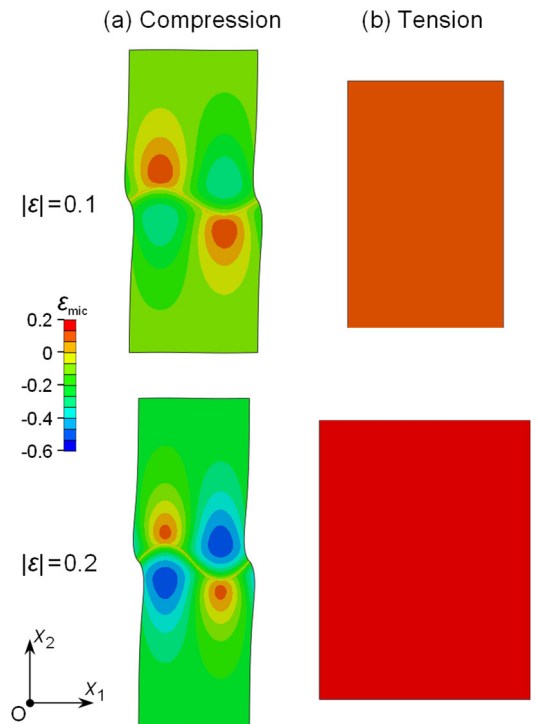


Fig.9 Deformed configurations with the distributions of the microscopic horizontal axial strain,  $\epsilon_{mic}$ , for the unit cells subjected to (a) compressive and (b) tensile axial macroscopic strains,  $|\epsilon|=(0.1,0.2)$ , in the dilute system.

認できる。一方で、引張負荷に対してユニットセルは座屈せず、一樣な変形状態を保持することがわかる。このような圧縮負荷と引張負荷に対するマイクロ座屈挙動の発生有無がマクロ応力に反映されて引張・圧縮非対称性として表れる。ここで、Fig.8 に示すユニットセルの波長は  $L=158$  に設定した

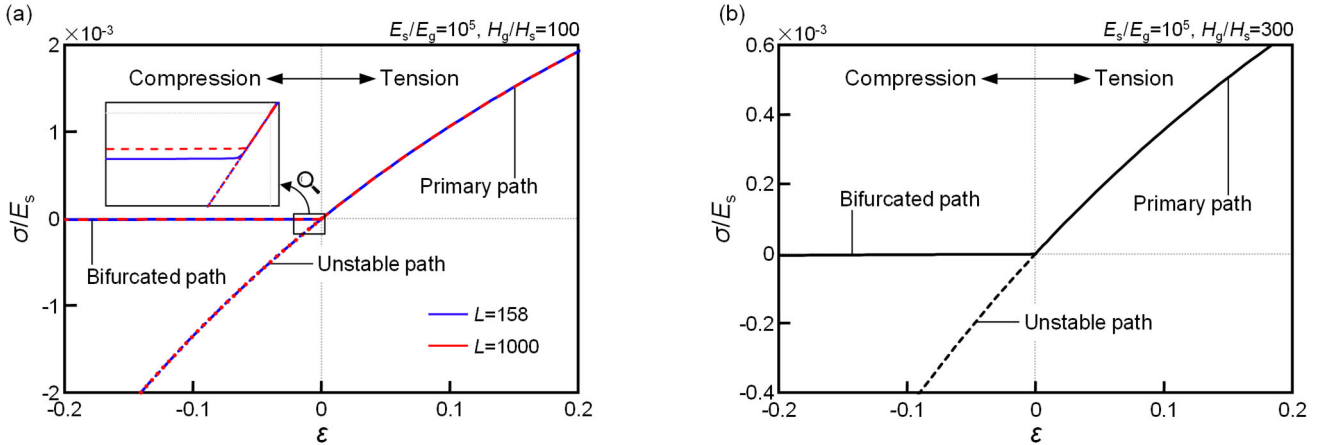


Fig.10 Normalized macroscopic axial stress,  $\sigma/E_s$ , as a function of the macroscopic axial strain,  $\epsilon$ , for the cases of (a)  $E_s/E_g=10^5$ ,  $H_g/H_s=100$ ,  $L/H_s=(158, 1000)$  in the non-dilute system and (b)  $E_s/E_g=10^5$ ,  $H_g/H_s=300$ ,  $L/H_s=158$  in the dilute system. The inset in the figure (a) shows the relationship between  $\sigma/E_s$  and  $\epsilon$  in the vicinity of buckling points. Due to the microscopic buckling of a unit cell,  $\sigma/E_s$  takes a small value on the bifurcated path, leading to the emergence of the tension-compression asymmetry of a NR gel.

が、非希薄系では優先波長が無限長であるため、対応する座屈応力はこの波長で収束しないことに注意する。

Fig.9に、マイクロ座屈挙動が希薄系となる場合について、それぞれ大きさ $|\epsilon|=(0.1, 0.2)$ の圧縮ひずみ(図中(a))と引張ひずみ(図中(b))を作用したときのユニットセルの変形と水平方向のマイクロひずみ成分 $\epsilon_{mic}$ の分布を示す。希薄系についても、圧縮負荷に対してユニットセルが座屈し、正弦波状の変形が進展する一方で、引張負荷に対しては座屈せずに一樣な変形状態が保持される。非希薄系と希薄系の相違点は、ユニットセル全体が座屈するか、ナノシートのみが座屈するかであり、座屈後の負荷が進展するほどユニットセルの変形形状に強く現れる。

Figs.8, 9のマイクロな力学挙動を反映したマクロ応力・ひずみ関係をFig.10に示す。ここで、図中(a), (b)は、それぞれ非希薄系と希薄系についての結果を示している。引張負荷に対してユニットセルは座屈しないため、対応するマクロ応力は主経路上の値を取ることがわかる。一方、圧縮負荷に対してマクロ応力は、最初、主経路上の値をとるものの、座屈点を越えるとユニットセルが不安定となり、不整によって分岐経路上に遷移した後は、ほぼ無応力状態を保ち続ける。また、非希薄系と希薄系のマクロ応力は、主経路・分岐経路に関わらず同様の軌跡を描き、両者ともに引張・圧縮非対称性が明確であることがわかる。

一方で、主経路上では非希薄系のマクロ応力は希薄系のマクロ応力の約3倍となった。これは、設定した $H_g/H_s$ が希薄系と非希薄系で3倍異なることを反映したものである。 $H_g/H_s$ が大きいほど、ナノシートの体積分率は小さく、マイクロ座屈挙動は希薄系に分類される傾向にあるため、主経路上のマクロ応力は非希薄系の方が大きな値を取り得ると考えられる。

Fig.10(a)の差し込み図に示す非希薄系のマクロ応力に着目すると、分岐経路上のマクロ応力は、波長 $L$ が大きくなるほど小さな値を取ることがわかる。これは、非希薄系の場合では優先波長 $L_{cr}$ が求まらず、波長 $L$ に対して座屈応力 $\sigma_{cr}$ が単

調減少することが原因である。そのため、非希薄系の場合では、マクロな力学応答の引張・圧縮非対称性も波長 $L$ に対して収束せず、定量的な評価ができない。

そこで本研究では、マイクロ座屈挙動が希薄系となる場合について、引張・圧縮非対称性を定量的に評価する。定量評価に際して、それぞれ大きさ $|\epsilon|=(0.1, 0.2)$ の圧縮ひずみと引張ひずみに対する応答マクロ応力の傾きからヤング率を計算する。引張方向のヤング率を $K_T$ 、圧縮方向のヤング率を $K_C$ とし、これらの比 $K_T/K_C$ を引張・圧縮非対称性の定量指標とする。

厚さ比 $H_g/H_s$ に対して、ひずみ $|\epsilon|=(0.1, 0.2)$ について $K_T/K_C$ をヤング率比 $E_s/E_g$ の関数としてプロットした結果をFig.11に示す。まず、 $E_s/E_g$ と $H_g/H_s$ に関わらず、 $K_T/K_C$ は $\epsilon$ が大き

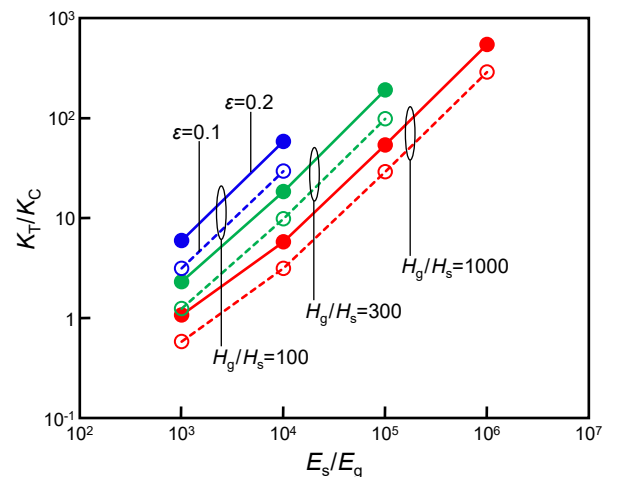


Fig.11 Quantification of the tension-compression asymmetry by the ratio between instantaneous Young's moduli,  $K_T$  and  $K_C$ , of a unit-cell in the dilute system subjected to macroscopic tensile and compressive axial strains,  $|\epsilon|=(0.1, 0.2)$ ,  $K_T/K_C$ , for each combination of Young's modulus ratio,  $E_s/E_g$ , and thickness ratio,  $H_g/H_s$ .



くなるにつれて大きな値を取る。このため、NR ゲルに作用する負荷が大きいほど、引張・圧縮非対称性は顕著になることがわかる。

また、 $K_T/K_C$ は $E_s/E_g$ と $H_g/H_s$ に依存し、 $E_s/E_g$ が大きい、もしくは $H_g/H_s$ が小さいほど、引張・圧縮非対称性が顕著になることがわかる。これは、引張方向のマクロ応力が同様の傾向を有することに起因する。NR ゲルは、 $E_s/E_g$ が十分に大きな値をとるため、引張方向のマクロ応力の主要因はナノシートから発生するマイクロ応力である。 $E_s/E_g$ の増加は、ナノシートの剛性の増加を意味し、 $H_g/H_s$ の減少は、ナノシートの体積分率の増加をもたらす。したがって、これらの要因により、引張方向のヤング率 $K_T$ は、より大きな値を取ることであり、結果として引張・圧縮非対称性が顕著になる。

## 5. 結 言

本研究では、単軸負荷条件が課されたNR ゲルのユニットセルに対して均質化解析を実施し、マイクロ座屈挙動と引張・圧縮非対称性に関わる影響因子を評価した。座屈固有値解析では座屈応力と優先波長を求め、マイクロ座屈挙動をユニットセル全体が座屈する非希薄系とナノシートのみが座屈する希薄系に分類した。得られた結果は、層状複合材料を対象とする理論解と整合し、本研究で実施した座屈固有値解析は、NR ゲルのマイクロ座屈挙動を正しく評価することがわかった。

続いて、座屈モードと優先波長を入力とする座屈後解析と均質化を実施して、NR ゲルのマクロ応力・ひずみ関係を求めた。非希薄系・希薄系に関わらず、引張・圧縮負荷に対するマイクロ座屈挙動の有無に呼応してマクロ応力・ひずみ関係に明確な引張・圧縮非対称性が現れることがわかった。また、希薄系について、ひずみ $|\epsilon|=(0.1, 0.2)$ の変形状態における瞬間的なヤング率の比を指標として引張・圧縮非対称性を定量的に評価した。NR ゲルが高負荷の状態、または構成材料の厚さ比 $H_g/H_s$ が小さく、ヤング率比 $E_s/E_g$ が大きいほど、引張・圧縮非対称性が顕著になることがわかった。

本研究で得られた成果は、所望の引張・圧縮非対称性を有するNR ゲルを作製するうえで有用な情報を提供し、NR ゲルの工学的な応用展開を促進するものである。今後は、実測値との比較・検討を交えながら解析手法を洗練することで、さらに信頼性のあるNR ゲルの設計支援技術の確立が期待される。

## 謝 辞

本研究は、JST、CREST (JPMJCR22B1) の支援を受けたものである。ここに記して謝意を表する。

## 参考文献

- (1) B. Sun, S.H. Kang: A mechanically one-way material, *Science*, **380**(2023), p.135.
- (2) C. Coulais, D. Sounas, A. Alu: Static non-reciprocity in mechanical metamaterials, *Nature*, **542**(2017), pp.461–464.
- (3) M. Shaat: Nonreciprocal elasticity and the realization of static and dynamic nonreciprocity, *Scientific Reports*, **10**(2020), 21676.

- (4) M. Shaat, M.A. Moubarez, M.O. Khan, M.A. Khan, A. Alzo'ubi: Metamaterials with Giant and Tailorable Nonreciprocal Elastic Moduli, *Physical Review Applied*, **14**(2020), 014005.
- (5) M. Brandenbourger, X. Locsin, E. Lemer, C. Coulais: Non-reciprocal robotic metamaterials, *Nature Communications*, **10**(2019), 4608.
- (6) G. Librandi, E. Tubaldi, K. Bertoldi: Programming nonreciprocity and reversibility in multistable mechanical metamaterials, *Nature Communications*, **12**(2021), 3454.
- (7) M. Liu, Y. Ishida, Y. Ebina, T. Sasaki, T. Hikima, M. Takata, T. Aida: An anisotropic hydrogel with electrostatic repulsion between cofacially aligned nanosheets, *Nature*, **517**(2015), pp.68–72.
- (8) K. Sano, Y. Ishida, T. Aida: Synthesis of anisotropic hydrogels and their applications, *Angewandte Chemie International Edition*, **57**(2018), pp.2532–2543.
- (9) K. Sano, Y.O. Arazoe, Y. Ishida, Y. Ebina, M. Osada, T. Sasaki, T. Hikima, T. Aida: Extra-large mechanical anisotropy of a hydrogel with maximized electrostatic repulsion between cofacially aligned 2D electrolytes, *Angewandte Chemie International Edition*, **57**(2018), pp.12508–12513.
- (10) X. Wang, Z. Li, S. Wang, K. Sano, Z. Sun, Z. Shao, A. Takeishi, S. Matsubara, D. Okumura, N. Sakai, T. Sasaki, T. Aida, Y. Ishida: Mechanical nonreciprocity in a uniform composite material, *Science*, **380**(2023), pp.192–198.
- (11) N. Ohno, D. Okumura, H. Noguchi: Microscopic symmetric bifurcation condition of cellular solids based on a homogenization theory of finite deformation, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, **50**(2002), pp.1125–1153.
- (12) D. Okumura, N. Ohno, H. Noguchi: Post-buckling analysis of elastic honeycombs subject to in-plane biaxial compression, *International Journal of Solids and Structures*, **39**(2002), pp.3487–3503.
- (13) D. Okumura, N. Ohno, H. Noguchi: Elastoplastic microscopic bifurcation and post-bifurcation behavior of periodic cellular solids, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, **52**(2004), pp.641–666.
- (14) R. Parnes, A. Chiskis: Buckling of nano-fibre reinforced composites: a re-examination of elastic buckling, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, **50**(2002), pp.855–879.
- (15) Abaqus 6.14 User Documentation, Dassault Systems SIMULIA Corporation, (2014).
- (16) D. Okumura, J. Sugiura, H. Tanaka, Y. Shibutani: Buckling and postbuckling of etching-induced wiggling in a bilayer structure with intrinsic compressive stress, *International Journal of Mechanical Sciences*, **141**(2018), pp.78–88.
- (17) S. Kikuchi, S. Matsubara, S. Nagashima, D. Okumura: Diversity of the bifurcations and deformations on films bonded to soft substrates: Robustness of the herringbone pattern and its cognate patterns, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, **159**(2022), 104757.