

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 9 日現在

機関番号：24402

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2016

課題番号：15K17943

研究課題名(和文) 発泡プラスチックの力学特性の階層性非局所モデリング

研究課題名(英文) Multiscale nonlocal modeling of mechanical property of plastic foam

研究代表者

内田 真 (Uchida, Makoto)

大阪市立大学・大学院工学研究科・講師

研究者番号：90432624

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、発泡樹脂の機械特性を微視領域の構造や変形と関連させて把握するために、材料の変形挙動の評価とモデル化を実施した。まず、低密度ポリエチレンフォームの引張試験を実施し、引張試験中に生じる不均一変形や体積変化を、デジタル画像相関法を用いて定量的に評価した。さらに、2次均質化法を用いて、発泡樹脂の巨視的な不均一変形に及ぼす微視構造の寸法の影響を評価した。本研究により、発泡樹脂の非弾性変形過程における体積変化や寸法に依存した不均一変形の実験的および解析的評価が可能となった。

研究成果の概要(英文)：In the present study, the quantitative evaluation and theoretical modeling of the deformation behavior of the plastic foam were performed to understand the mechanical property characterized by the microscopic structure and deformation of the material. The nonuniform deformation and volume change during inelastic strain range were evaluated using the digital image correlation method. Furthermore, the effect of the microscopic scale on the macroscopic nonuniform deformation of plastic foam is investigated using the second-order homogenization method. Experimental and numerical evaluation of the nonuniform deformation and volume change during inelastic deformation of plastic foam become enabled using the proposed methods in this study.

研究分野：計算力学, 固体力学, 連続体力学, 実験力学

キーワード：発泡樹脂 マルチスケール 不均一変形 モデリング デジタル画像相関法 ひずみ場 応力場

1. 研究開始当初の背景

樹脂に多数の気泡を導入した各種発泡樹脂は工学材料の中でもトップクラスの軽量性を誇り、加えて断熱性、衝撃吸収性など様々な特徴を有していることから、その需要は大きい。しかしながら、気泡の体積分率が増加するほど巨視的な強度は著しく減少するため、構造部材としての適用にはまだ課題が多い。また、その変形特性は気泡とポリマー壁からなるきわめて不均一な微視構造に支配されるため、材料の力学特性を正確に予測するにあたり、材料の応力ひずみ関係だけでなく、ひずみの分布状態や体積変化などの様々な物理量を把握することが重要である。

ポリオレフィン系の発泡樹脂は 1950 ~ 60 年ごろから開発が進められており、巨視的な力学特性を評価・モデル化する試みが数多く報告されている。一方、数値解析技術の発展に伴い、気泡の分布をモデル化した微視構造の力学特性を評価した研究も実施されている。これらの研究は、均質化法を用いることで 2 階層における変形解析への展開が期待できるが、従来の均質化法は、微視/巨視スケールの寸法比を導入できないため、材料設計を行う上で重要な因子となる気泡の寸法を評価することが困難であった。

また、材料に生じる不均一変形は、材料の微視組織と密接に関係している。特に、発泡樹脂のように、微視領域と巨視領域の寸法比が 1 に近いほど、巨視的な不均一変形に及ぼす微視組織の構造や変形の影響が大きくなる。このような材料の不均一変形に及ぼす微視的な不均質構造に対する寸法依存性を明らかにすることは、発泡樹脂のみならず、様々な工業材料の不均一変形の高精度予測に大きく貢献できると考えられる。

2. 研究の目的

本研究では、実験と数値解析の両者を駆使してポリオレフィン系の発泡樹脂の力学特性を評価、モデル化することを目的とする。実験では、3 次元デジタル画像相関法を用いて単軸引張過程における発泡樹脂の変形状態を定量的に評価し、材料の変形予測モデルの構築に必要な情報を収集する。具体的には、発泡倍率の異なる低密度ポリエチレン (LDPE) フォームに生じるひずみの不均一性と体積変化を計測し、材料の変形機構について考察する。解析では、巨視的なひずみおよびひずみこう配に対する仮想仕事を導入することにより、巨視的な不均一変形に対する微視領域の寸法の影響を評価可能な 2 次均質化法を用いて、発泡樹脂の変形挙動に及ぼす寸法の影響を明らかにする。具体的には、発泡樹脂の微視構造を 2 次元八二カム周期構造としてモデル化し、2 次均質化法を用いて材料の微視および巨視的な不均一変形を数値解析により評価する。

さらに、微視的な不均質構造と巨視的な不均一変形の関連性を明らかにするため、デジタ

ル画像相関法 (DIC) と有限要素法 (FEM) をカップリングすることにより、ひずみ場と応力場を同時計測できる手法を構築する。同手法に関しては、微視スケールと巨視スケールが比較的近い材料として、粗大結晶粒を有する多結晶銅をモデル材料として、応力場とひずみ場の評価を実施した。

3. 研究の方法

(1) DIC による 3 次元ひずみ場の評価：非弾性変形過程において発泡樹脂に生じる不均一変形過程や体積変化を定量定期的に計測するために、2 台のカメラを用いてステレオビジョンの原理によって試験片表面の 3 次元変位を計測できる 3 次元 DIC を用いた変位場解析を実施する。体積変化を計測するためには、試験片の厚さ変化を計測する必要があるため、本研究では、試験片の表面、裏面に対してそれぞれ 2 台ずつ、計 4 台のカメラを用いて厚さ方向のひずみを計測した。

供試材としては、旭化成ケミカルズ (株) 製の押し出し発泡成形低密度ポリエチレン (LDPE) フォームである、Q05、Q15、および Q25 を用いた。各材料の発泡倍率は、5 倍、15 倍、および 25 倍である。LDPE フォームの板材から、JIS K6767 で規定されている引張試験片を切り出して引張試験に供した。引張試験は (株) 東京試験機製の LSC-1/30 を用い、引張変位速度 3mm/min で行った。試験片表面にはスプレーを用いてランダムパターンを塗布し、マクロレンズ ((株) Nikon 製、AF-S DX Micro NIKKOR 40mm f/2.8G) を搭載した一眼レフカメラ ((株) Nikon 製、D5200) を用いて、30s ごとに引張試験過程の試験片両面のデジタル画像を取得した。

(2) 2 次均質化法による微視および巨視的な不均一変形の数値解析：発泡樹脂の微視および巨視的な不均一変形を連成して解析するために、2 次均質化法に基づくマルチスケールモデルを構築した。本研究では、Updated Lagrangian 法による大変形速度形の構成式を定式化する。

いま、巨視座標および微視領域の相対座標をそれぞれ x_i^{M0} および Δx_i^m とし、巨視領域において変形状態を評価する体積 V^M の有限領域、および微視領域を代表する体積 V^m の単一周期構造を考える。巨視領域座標と微視領域の相対座標の関係は次式で与えられる。

$$x_i^M = x_i^{M0(t)} + \Delta x_i^m,$$

ここで $\Delta x_i^{M0(t)}$ は l 番目の周期構造の重心である。次に、微視領域における速度こう配場 $v_{i,j}^m$ を、巨視領域の速度こう配場と関連付けて次式のように与える。

$$v_{i,j}^m = v_{i,j}^{M0} + v_{i,jk}^{M0} \Delta x_k^M + \frac{\partial w_i^m}{\partial x_j^m}$$

ここで、 $v_{i,j}^{M0}$ および $v_{i,jk}^{M0}$ は、巨視的な有限領域における速度の 1 次および 2 次こう配で、領域内で一定の値として考える。また、 w_i^m は

微視領域における周期的な不均一速度場で、 $v_{i,j}^{M0}$ および $v_{i,jk}^{M0}$ と関連付けて次式のように与えられると考える。

$$w_i^m = w_i^{m0} + w_{ilm}^{m1} (v_{l,m}^{M0} + v_{l,mm}^{M0} \Delta x_n^{m0(t)}) + w_{ilmn}^{m2} v_{l,mm}^{M0}$$

ここで、 w_i^{m0} 、 w_{ilm}^{m1} 、および w_{ilmn}^{m2} は次式を満足するような微視的周期関数である。

$$\int_{V^m} \delta v_{i,j}^m \left\{ \hat{D}_{ijkl}^m \frac{\partial w_i^{m0}}{\partial x_j^m} - P_{ij}^m \right\} dV^m = 0$$

$$\int_{V^m} \delta v_{i,j}^m \hat{D}_{ijkl}^m \left\{ \delta_{il} \delta_{jm} + \frac{\partial w_{ilm}^{m1}}{\partial x_j^m} \right\} dV^m = 0$$

$$\int_{V^m} \delta v_{i,j}^m \hat{D}_{ijkl}^m \left\{ \delta_{il} \delta_{jm} \Delta x_n^m + \frac{\partial w_{ilmn}^{m2}}{\partial x_j^m} \right\} dV^m = 0$$

ここで、 \hat{D}_{ijkl}^m および P_{ij}^m は微視領域の構成式における接線係数および粘塑性項、 δ_{ij} は黒ネッカーのデルタである。得られた微視的不均一速度 w_i^{m0} 、 w_{ilm}^{m1} 、および w_{ilmn}^{m2} を用いると、微視領域の構成式は巨視的速度場を用いて次式のように記述できる。

$$\dot{\pi}_{ij}^m = \hat{D}_{ijpq}^m \left[\eta_{pq}^{m0} + \eta_{pqrs}^{m1} v_{r,s}^{M0} + \left\{ \eta_{pqrs}^{m1} \Delta x_t^{m0(t)} + \eta_{pqrst}^{m2} v_{r,st}^{M0} \right\} \right] - P_{ij}^m$$

ここで、 $\dot{\pi}_{ij}^m$ は微視領域の公称応力速度、

$$\eta_{ij}^{m0} = \frac{\partial w_i^{m0}}{\partial x_j^m}, \quad \eta_{ijm}^{m1} = \delta_{il} \delta_{jm} + \frac{\partial w_{ilm}^{m1}}{\partial x_j^m}$$

$$\eta_{ijlmn}^{m2} = \delta_{il} \delta_{jm} \Delta x_n^m + \frac{\partial w_{ilmn}^{m2}}{\partial x_j^m}$$

である。得られた応力場と仮想速度こう配場によりユニットセルにおける仮想仕事 δW^m が次式で与えられる。

$$\delta W^m = \int_{V^m} \delta v_{i,j}^m \dot{\pi}_{ij}^m dV^m$$

また、巨視領域の仮想仕事は、有限領域内に存在するすべてのユニットセルの仮想仕事の総和として与えられるので、

$$\frac{\delta W^M}{V^M} = \frac{1}{V^M} \sum_{I=1}^N \delta W^m$$

ここで、 $N = V^M / V^m$ である。巨視および微視領域の 1 次モーメントは 0、2 次モーメントをそれぞれ J_{ij}^M および J_{ij}^m とすると、巨視領域における速度の 1 次こう配 $v_{i,j}^{M0}$ および 2 次こう配 $v_{i,jk}^{M0}$ と、それらに対する仕事共役量 $\dot{\pi}_{ij}^{M0}$ および $\dot{\tau}_{nij}^{M0}$ の関係を表す高次構成式が次式のように与えられる。

$$\begin{Bmatrix} \dot{\pi}_{ij}^{M0} \\ \dot{\tau}_{nij}^{M0} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{D}_{ijkl}^{M11} & \bar{D}_{ijklm}^{M12} \\ \bar{D}_{nijkl}^{M21} & \bar{D}_{nijklm}^{M22} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} v_{k,l}^{M0} \\ v_{k,lm}^{M0} \end{Bmatrix} - \begin{Bmatrix} \bar{P}_{ij}^{m1} \\ \bar{P}_{nij}^{m2} \end{Bmatrix}$$

ここで、

$$\bar{D}_{ijkl}^{M11} = \frac{1}{V^m} \int_{V^m} \eta_{pqij}^{m1} \hat{D}_{pqrs}^m \eta_{rskl}^{m1} dV^m$$

$$\bar{D}_{ijklm}^{M12} = \frac{1}{V^m} \int_{V^m} \eta_{pqij}^{m1} \hat{D}_{pqrs}^m \eta_{rsklm}^{m2} dV^m$$

$$\bar{D}_{nijkl}^{M21} = \frac{1}{V^m} \int_{V^m} \eta_{pqijn}^{m2} \hat{D}_{pqrs}^m \eta_{rskl}^{m1} dV^m$$

$$\bar{D}_{nijklm}^{M22} = \bar{D}_{ijkl}^{M11} (J_{nm}^M - J_{nm}^m) + \frac{1}{V^m} \int_{V^m} \eta_{pqijn}^{m2} \hat{D}_{pqrs}^m \eta_{rsklm}^{m2} dV^m$$

$$\bar{P}_{ij}^{m1} = \frac{1}{V^m} \int_{V^m} \eta_{pqij}^{m1} \left\{ \bar{P}_{pq}^m - \hat{D}_{pqrs}^m \eta_{rs}^{m0} \right\} dV^m$$

$$\bar{P}_{nij}^{m2} = \frac{1}{V^m} \int_{V^m} \eta_{pqijn}^{m2} \left\{ \bar{P}_{pq}^m - \hat{D}_{pqrs}^m \eta_{rs}^{m0} \right\} dV^m$$

である。このように定式化した高次構成式を用い、巨視的境界地問題を解くことによって、発泡樹脂の巨視および微視的不均一変形の数値解析が可能となる。

(3) DIC と FEM のカップリングによる応力場とひずみ場の評価：材料に生じる不均一変形の進展を予測するためには、不均一変形を生じさせる応力場の評価が重要となる。本研究では、DIC により得られた変位場を変位境界条件として与え、そのときの力の釣合いを用いて応力解析を実施し、各積分点周りの応力状態を評価する。ここで、応力評価を実施するために、材料に生じたひずみは弾性と非弾性成分に分解できる、弾性ひずみと応力の関係は Hooke の法則に従う、材料の弾性剛性は均一で変形によって変化しない、という 3 つの仮定を導入する。古典的な弾塑性連続体力学に基づいて、次式のような基礎構成式が得られる。

$$\sigma = D \varepsilon^e = D (\varepsilon - \varepsilon^e)$$

ここで、 σ は Cauchy 応力テンソル、 D は弾性剛性テンソル、 ε 、 ε^e 、および ε^p はそれぞれ全、弾性、および非弾性ひずみテンソルである。

続いて、有限要素法の流れに沿って離散化し、剛性方程式を作成する。節点変位ベクトルが与えられたとき、ベクトル形式で表した積分点周りの弾性ひずみ $\{\varepsilon^e\}$ と応力 $\{\sigma\}$ は次式で与えられる。

$$\{\varepsilon^e\} = [B] \{u^{e(i)}\}$$

$$\{\sigma\} = [D] \{\varepsilon^e\} = [D][B] \{u^{e(i)}\}$$

ここで、 $[B]$ は変位 - ひずみ変換マトリクス、 $\{u^{e(i)}\}$ は弾性の節点変位ベクトルである。また、積分点に発生した応力 $\{\sigma\}$ によって節点に与えられる節点力 $\{f^{(i)}\}$ は、次式で求められる。

$$\{f^{(i)}\} = {}^T [B] \{\sigma\} = {}^T [B][D][B] \{u^{e(i)}\} = [K] \{u^{e(i)}\}$$

ここで $[K]$ は要素剛性マトリクスである。測定時に設定した節点のうち、構造の内部における節点では、周囲要素との平衡条件によって $\{f^{(i)}\} = \{0\}$ となる。また、外部境界上にある節点に対しては、外力 $\{t\}$ との釣合いを満足し

なければならない．以上のことから，全体剛性方程式は次式のようになる．

$$\int_V \{f^{(i)}\} dV = \int_V [K] dV \{u^{e(i)}\} = \int_S \{t\} dS$$

上式を解くことによって，DIC により測定された変位を弾性成分 $\{u^{e(i)}\}$ と非弾性成分 $\{u^{p(i)}\}$ に分解することが可能となる．そして，弾性成分を Hooke の法則に代入することにより，積分点周りの応力テンソルの全成分を推定することができる．

4. 研究成果

(1) LDPE フォームの変形場の評価：3.(1)で述べた LDPE フォームを用い，微視構造評価と変位場評価を実施した．図 1 に，X 線 μ CT スキャナ（(株)島津製作所製，SMX-90CT Plus）を用いて観察した LDPE フォーム Q05 および Q25 の断層画像を示す．気泡のサイズは発泡倍率によって大きな差は見られず，およそ 50 ~ 200 μ m で分布している．ただし，ポリマー壁の厚さは，発泡倍率が大きくなるほど薄くなっており，発泡倍率が大きいほど気泡の体積分率が大きくなることわかる．

これらの LDPE フォームに公称ひずみが 0.2 に達するまで単軸引張を与え，その後同じ速度で除荷する試験を実施した結果を図 2 に示す．負荷過程においては，変形の初期から後期に至るまで応力は単調に増加しており，除荷に転じた際は，負荷時の応答を反転させたような応答が得られた．公称応力がゼロに到達する際の公称ひずみはゼロまでは戻っておらず，除荷が終了した時点では非弾性のひずみが残留していることがわかる．

図 3 に，除荷に転じる直前の公称ひずみ ($\epsilon_n = 0.188$) において評価した変位場から算出した各方向の Green ひずみの垂直成分，ならびに累積された体積ひずみの分布を示す．どの方向にも微視的な不均質構造に起因すると考えられる不均一変形が平行部に発生している．発泡倍率が小さいほどこのようなひずみの不均一性がやや大きくなっている．負荷に対して垂直な x 軸と y 軸のひずみを比較すると，両者に大きな差異は見られないため，変形に伴う収縮はほぼ等方的に生じることが示唆される．(d) に示す体積ひずみの変化をみると，発泡倍率が小さいほど正の体積ひずみ，すなわち変形に伴う体積膨張が顕著に生じており，LDPE フォームが圧力依存性の非弾性変形を示すことが明らかとなった．

(2) 発泡樹脂の曲げ変形の数値解析：発泡樹脂の巨視的な不均一変形に及ぼす微視領域の不均一変形や寸法の影響を評価するために，3.(2)で述べた 2 次元均質化法を用いて 3 次元曲げの数値解析を実施した．用いた解析モデルを図 4 に示す．巨視構造として，アスペクト比 $2l/h = 20$ の 2 次元平面応力はり，6 節点 3 角形 2 次要素を用いて分割した構造を設定した．巨視領域と微視領域の相対的な寸

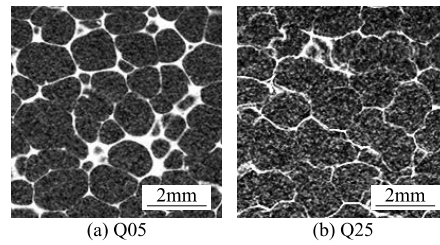


Fig. 1 X-ray microCT image

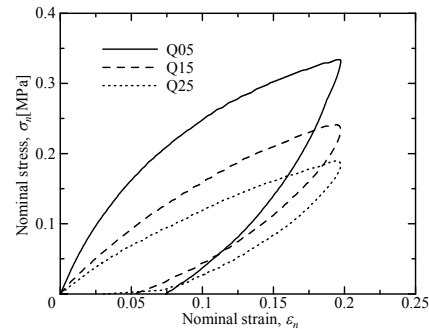


Fig. 2 Relationships between nominal stress and strain.

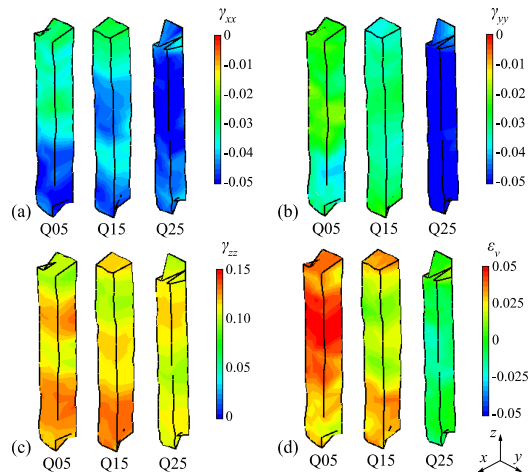


Fig. 3 Distribution of Green's strain and volume strain, (a) γ_{xx} , (b) γ_{yy} , (c) γ_{zz} and (d) ϵ_v .

法の影響を調べるため，はりの寸法を， $l = 100$ mm，および $l = 50$ mm とした 2 つのモデルを用いた．微視構造としては，図に示すように，2 次元ハニカム周期構造として与えた．樹脂部分は低密度ポリエチレンを想定し，分子鎖網目理論に基づく構成式を用いて応力ひずみ関係をフィッティングした．発泡率は 10 倍，六角形の寸法は $d = 1$ mm とそれぞれ固定し，樹脂部分を，6 節点 3 角形 2 次要素を用いて分割した．3.2 で示したように，本研究では，微視領域の不均一変形成分は周期的であると仮定しているが，巨視的不均一変形下においてはこのような周期性が満足できないことが保証できないため，ユニットセルの設定周期を図のように変化させたときの挙動を調べた．

解析によって得られた，単位長さあたりの曲げ荷重と単位長さあたりのたわみの関係を図 5 に示す．たわみの増加に伴い，ほぼ直

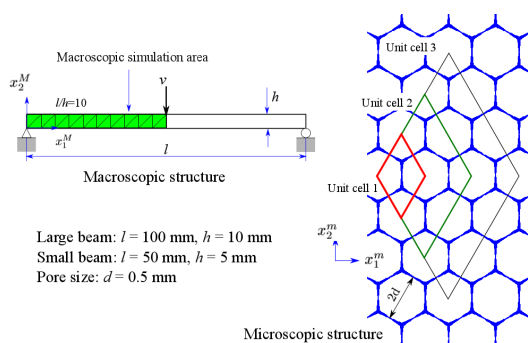


Fig. 1 Computational model

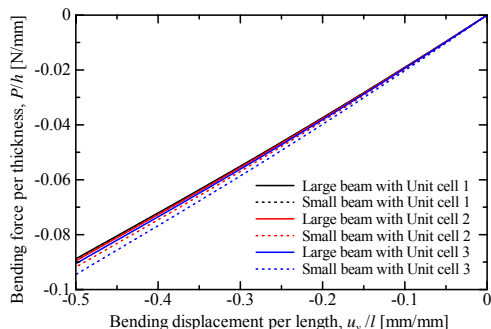


Fig. 2 Relationships between bending force and bending displacement.

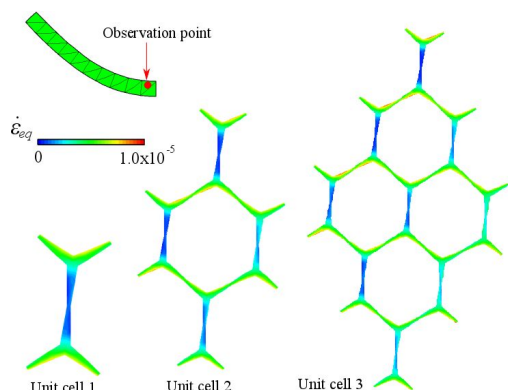


Fig. 3 Distribution of equivalent strain rate.

線的に曲げ力が増加している。どのユニットセルを用いた場合も、はりの長さが短いほど、同じたわみを発生させるのに必要な力が大きくなっていることから、はりの曲げ剛性が、巨視スケールと微視スケールの寸法比が1に近づくほど大きくなっていることがわかる。このような現象は、ユニットセルの選択範囲を拡張するほど顕著になっていることから、微視領域の不均一変形の非周期性が巨視的不均一変形に伴って強調されることが示唆される。図6に、単位長さあたりのたわみが-0.5になった時のはり中央付近かつ中立軸より上部に位置する積分点に与えられた微視構造における相当ひずみ速度の分布を示す。曲げによってはりにはx方向のひずみが発生するため、x方向に傾斜している樹脂部分に大きなひずみが発生していることがわかる。ユニットセル内には巨視的ひずみこう配によって非対称な形状変化が生じており、これが巨視領域と微視領域の寸法比によっ

て変化するため、解析結果が寸法に依存して変化する。ユニットセルの選択範囲を広げるほど、その非対称性が顕著になっており、その結果、図5に示すような寸法効果が大きく生じると考えられる。以上のように、本研究では、2次均質化法を導入することによって、微視領域の寸法に依存した不均一変形挙動を再現することが可能となった。

(3) 微視的不均質構造が巨視的不均一変形に及ぼす影響：前節で示したように、材料に生じる不均一変形は微視領域を形成する構造の寸法によって影響を受けることが数値解析によって示された。このような微視・巨視スケール間の相互作用を実験的に確認するために、微視的に強い不均質構造を有する材料に巨視的不均一変形が与えられた時の変形挙動を評価した。モデル材料としては、結晶粒径の異なる多結晶銅とし、図7に示すような平行試験片 Specimen U と曲率試験片 Specimen NU の両者に単軸引張を与えた時の不均一なひずみ場と応力場を、3.(3)で示したDICとFEMをカップリングした手法により定量的に評価した。

図8に、各引張段階で得られたひずみ場の分布を示す。本研究では、焼鈍温度を450および850とし、結晶粒径が小さい試験片と大きい試験片を作製した。結晶粒径の小さい試験片では、巨視的な試験片形状に特徴づけられるひずみ場が生じているのに対し、結晶粒径の大きい試験片では、試験片の形状にかかわらず、微視領域の不均質な多結晶構造によってランダムな不均一変形が生じていることがわかる。一方、図9に示すように、引張試験中の応力分布は、断面積によって変化するため、微視的不均質性による影響が小さいことがわかる。得られた応力場とひずみ場の関係を調べるために、提案する評価手法によって得られる応力こう配と、ひずみこう配を用いて解析的に求めた応力こう配の関係を図10に示す。結晶粒径が小さい場合は両者の相関性は高いが、結晶粒径が大きい場合はひずみこう配から求めた応力こう配よりも、実際には応力こう配が小さいことがわかる。このような効果は、材料の微視領域における加工硬化率の分布が応力こう配を低下させていることに起因すると考えられる。

以上のように、微視的不均質構造が材料の不均一変形に及ぼす影響を実験的に評価できた。工業材料は一般的に微視的に不均質な構造を有しており、その寸法が巨視構造の寸法に近づくにつれて、巨視的不均一変形が材料構造に強く依存するようになる。このような特性は、応力とひずみを結びつける古典的な連続体力学では表現が不可能な特性である。今後、ひずみこう配を含むような形式で、材料の不均一変形の発展を予測する構成式の定式化、およびそこで使用される材料パラメーターの実験的な同定手法を構築する研究を進めていきたいと考えている。

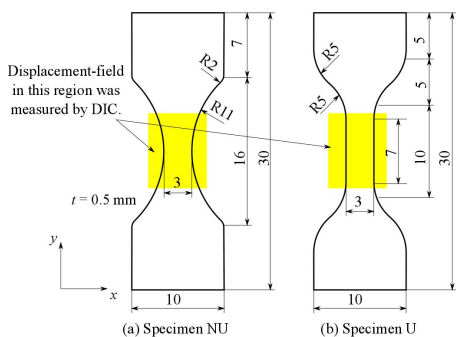


Fig. 7 Shapes of specimens NU and U

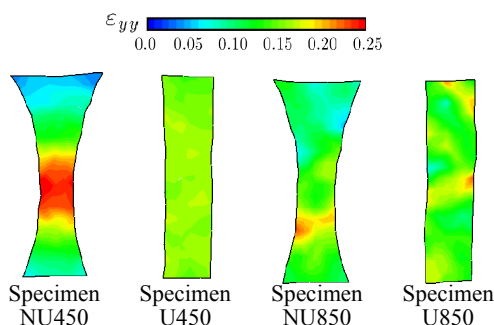


Fig. 8 Distribution of local strain

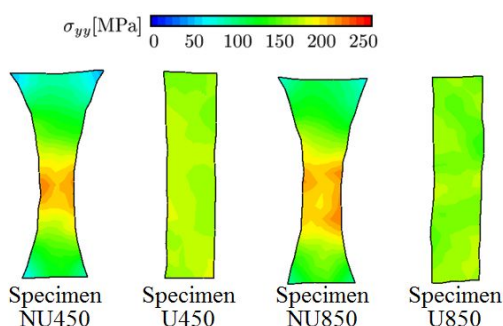


Fig. 9 Distribution of local stress

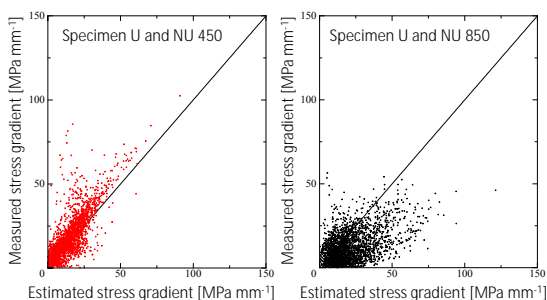


Fig. 10 Relationship between Measured and estimated stress gradients

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計3件)

M. Uchida, T. Ueno, T. Abe and Y. Kaneko, Quantitative evaluation of the development of stress and strain fields using digital image correlation and finite element methods, *Advanced Experimental*

Mechanics, 査読有, 掲載決定.

M. Uchida, K. Suzuki and Y. Kaneko, Computational simulation of scale-dependent non-uniform deformation behavior of polymer foam, *Key Engineering Materials*, Vol. 725, (2016), pp 456-461, DOI:10.4028/www.scientific.net/KEM.725.456

〔学会発表〕(計17件)

鈴木啓太, 内田真, 兼子佳久, 三次元デジタル画像相関法を用いた低密度ポリエチレンフォームの引張変形過程における不均一変形および体積変化の評価, 日本実験力学学会 2016年度年次講演会 2016年9月1日, 近畿大学, (大阪府東大阪市)

内田真, 兼子佳久, デジタル画像相関法により評価した不均一変形のモデル化に関する研究, 日本機械学会第29回計算力学講演会, 2016年9月22日, 名古屋大学, (愛知県名古屋市)

M. Uchida, Nonlocal Multiscale Modeling of Elasto-viscoplastic Deformation Behavior of Polymeric Material having Microscopic Heterogeneity, 4th NU-NIMS Materials Genome Workshop, 2016年3月24日, Evanston, (USA)

内田真, 鈴木啓太, 兼子佳久, デジタル画像相関法を用いたポリエチレンフォームの不均一変形の評価, 日本機械学会関西支部 第91期定時総会講演会, 2016年3月12日, 大阪電気通信大学, (大阪府寝屋川市)

M. Uchida and Y. Kaneko, Scale-dependent multiscale modeling of deformation behavior of polymer foam using rate-form second order homogenization method, The 22nd International Symposium on Plasticity and Its Current Applications, 2016年1月8日, Hawaii (USA)

M. Uchida and Y. Kaneko, Computational simulation of macroscopic non-uniform deformation depending on the size of microscopic heterogeneous structure using second-order homogenization method, The 3rd International Workshops on Advances in Computational Mechanics, 2015年11月13日, Tokyo (Japan)

内田真, 上野永遠, 兼子佳久, デジタル画像相関法と有限要素法を用いた応力場とひずみ場の評価手法に関する検討, 日本実験力学学会 2015年度年次講演会, 2015年8月29日, 新潟大学 (新潟県新潟市)

6. 研究組織

(1)研究代表者

内田真 (Uchida Makoto)

大阪市立大学・大学院工学研究科・講師

研究者番号: 90432624