高初期相対密度を有する多孔質高分子材の圧密変形挙動の数値解析[†]

陸 偉* 三 村 耕 司*

Numerical Analysis on Compressive Deformation Behavior of Porous Polymer with High Initial Relative Density

by

Isamu RIKU* and Koji MIMURA*

In this study, we employ the two-dimensional homogenization model based on molecular chain network theory to investigate the micro- to macroscopic mechanical behavior of porous polymer under macroscopic uniform compression. A parametric study is performed to quantify the effect of a characteristic value of polymer matrix, the distribution and the initial volume fraction of voids, and the macroscopic triaxiality of loading condition on the deformation behavior of porous polymer. The results suggest that the initial elastic modulus and the macroscopic yield stress of porous polymer have no dependence on the characteristic value of polymer matrix. The onset of localized shear band at the ligament between voids leads to the macroscopic yield of porous polymer. Furthermore, the microscopic localized shear deformation behavior is promoted in case of high initial volume fraction of voids and high triaxiality loading condition, which results in the early appearance of the macroscopic yield. After the macroscopic yield, microscopic buckling onsets at the ligament between voids and a remarkable strain hardening occurs in case of high initial volume fraction of voids and high triaxiality loading condition due to the considerable increase of the density of porous polymer.

Key words: Porous polymer, Molecular chain network theory, Homogenization method, Shear band, Microscopic buckling

1 緒 言

多孔質高分子材は軽量で衝撃吸収性に優れているため、緩衝材として広く利用されている。¹⁾多孔質高分子材のエネルギー吸収能をより一層高め、用途に応じた形態設計を行うには、任意の圧縮負荷状況下での変形応答を予測することが不可欠である。

これまでに、「セル構造体」と呼ばれる初期相対密度が約 0.6 以下の多孔質高分子材については、数多くの研究が行われ、^{2)~7)}微視的座屈変形によるエネルギー吸収のメカニズムが明らかにされてきたが、0.6 以上の初期相対密度を有する多孔質高分子材については、その微視領域で座屈変形だけではなく塑性変形の不安定伝播挙動も生じるため、このような変形挙動を正確に再現する数値解析モデルの構築が困難であり、有力な解析手法はまだ確立されていない。例えば、Gibson ら⁵⁾はセル構造体を均一な大きさを有する 6 角形セルの集合体と仮定し、次元解析によりセル構造体の弾性係数、降伏応力とセル壁構成材料の弾性係数、降伏応力およびセル構造体の相対密度との関係式を提案したが、これらの関係式を高密度多孔質高分子材に適用すると、実験結果と合わず、大きな差が生じていることが指摘された。⁵⁾また、Silva ら⁶⁾はセルのランダムな配置状態を表現可能な Voronoi モデルを用い、セル構造体の有限要素解析により、セル壁の座屈の発生とその不安定伝播挙動を明らかにし、大野ら⁷⁾はセ

ル壁の座屈挙動を均質化理論により解析し、セル構造体の微視的変形挙動と巨視的変形応答との関係を議論するためのマルチスケール数値解析手法の有効性を示したが、これらの有限要素解析モデルを高密度多孔質高分子材に適用する際には、空孔の寸法に対してセル壁の寸法が大きいため、6 角形セルを用いてその単位構造を表すことは不適切と考えられる。

一方、多孔質体の引張負荷状況下での変形応答を予測するために、様々な数値解析モデル^{8)~11)}が提案されてきた。Tvergaard⁸⁾は多孔質金属材料を研究対象とし、空孔が周期的に分布していると仮定し、まず平面ひずみユニットセルモデルを用い、初期相対密度が異なる場合の隣接する空孔間の相互作用を明らかにした。次に、軸対称ユニットセルモデルを用い、寸法の大きい空孔に囲まれた寸法の小さい空孔にキャビテーション現象が生じる可能性を検討した。⁹⁾また、Steenbrink ら¹⁰⁾は軸対称ユニットセルモデルを多孔質高分子材に適用し、空孔の体積膨張に伴う隣接する空孔間のせん断帯の伝播挙動を明らかにした。しかしながら、これらのユニットセルモデルは限られた空孔の分布しか再現できないため、多孔質体の微視領域で空孔がランダムに分布し応力状態が複雑となる場合には、マルチスケール数値解析手法の適用が必要とされる。そこで、本研究の前報¹¹⁾において、高分子複合材を適用対象とする均質化法に基づいたマルチスケール

[†] 原稿受理 平成 18 年 11 月 17 日 Received Nov. 17, 2006 ©2007 The Society of Materials Science, Japan

* 正 会 員 大阪府立大学大学院工学研究科機械工学分野 〒599-8231 堺市中区学園町, Division of Mech. Eng., Grad. Sch. of Eng., Osaka Pref. Univ., Naka-ku, Sakai, 599-8231

数値解析手法を提案し、任意の引張負荷状況下での多孔質高分子材の微視的変形挙動と巨視的変形応答を明らかにした。

本報では、均質化法に基づいたマルチスケール数値解析手法を空孔の分布状態を考慮可能な有限要素解析モデルに適用し、任意の圧縮負荷状況下での高密度多孔質高分子材の変形応答の予測を試みる。まず、高分子母材の変形挙動を精度よく表現可能な構成式を用い、母材の材料特性および空孔の分布状態が多孔質体の弾性係数と降伏応力などに及ぼす影響を調べる。次に、巨視的負荷状況と空孔の初期体積含有率が多孔質体の微視的変形挙動と巨視的変形応答に及ぼす影響を明らかにする。

2 構成式

本研究では、多孔質高分子材の母材をひずみ速度依存性を有する非晶性ガラス状ポリマー材とする。その全ひずみ速度を弾性ひずみ速度と塑性ひずみ速度の和で表し、弾性応答はHookeの法則に従うとすると、非晶性ガラス状ポリマーの構成式は次に示す粘弾性体の構成式¹²⁾で表される。

$$\dot{\gamma}_{ij} = D_{ijkl}^e \dot{\epsilon}_{kl} - \dot{\gamma}^p P_{ij} \quad (1)$$

ここで、 $\dot{\gamma}_{ij}$ はKirchhoff応力のJaumann速度、 $\dot{\epsilon}_{kl}$ は全ひずみ速度、 D_{ijkl}^e は弾性係数テンソルである。 $\dot{\gamma}^p$ は塑性せん断ひずみ速度で、次式で与えられる。¹³⁾

$$\dot{\gamma}^p = \dot{\gamma}_0 \exp \left[-\frac{A\tilde{s}}{T} \left\{ 1 - \left(\frac{\tilde{\tau}}{\tilde{s}} \right)^{5/6} \right\} \right] \quad (2)$$

ここで、 $\dot{\gamma}_0$ 、 A は定数、 T は絶対温度である。 $\tilde{s} = s + \alpha_p p$ は真ひずみ軟化および圧力の影響を表し、 p は圧力、 α_p は圧力係数であり、 s は s_0 を初期値として $\dot{s} = h(1 - s/s_s)\dot{\gamma}^p$ で発展するせん断強さのパラメータである。¹⁴⁾ $s_0 = 0.039E/(1 - \nu^2)$ 、 E はヤング率、 ν はポアソン比、 h 、 s_s は定数である。 $\tilde{\tau}$ は後に説明する $\tilde{\sigma}'_{ij}$ を用いて $\tilde{\tau}^2 = \tilde{\sigma}'_{ij}\tilde{\sigma}'_{ij}/2$ で表される有効せん断応力である。また、

$$P_{ij} = D_{ijkl}^e \frac{\tilde{\sigma}'_{kl}}{\sqrt{2\tilde{\tau}}} \quad (3)$$

ここで、 $\tilde{\sigma}'_{ij}$ は駆動応力 $\tilde{\sigma}_{ij} = \sigma_{ij} - B_{ij}$ の偏差成分、 σ_{ij} はCauchy応力、 B_{ij} は8鎖モデルを用いた場合、¹⁵⁾次式で表される B_i を主値とする背応力である。

$$B_i = C^R \frac{\sqrt{N}}{3} \frac{V_i^{p^2} - \lambda_{ch}^2}{\lambda_{ch}} L^{-1} \left(\frac{\lambda_{ch}}{\sqrt{N}} \right) \quad (4)$$

上式で、 $C^B = nk_B T$ 、 n は単位体積当りの分子鎖数、 k_B はBoltzman定数、 N は鎖1本当りのセグメント数、 $\sqrt{N}$ は鎖の限界ストレッチ、 $V_i^{p^2}$ は主塑性ストレッチ、 $\lambda_{ch}^2 = (V_1^{p^2} + V_2^{p^2} + V_3^{p^2})/3$ 、 L はLangevin関数である。

3 解析手法と解析モデル

本研究では、高密度多孔質高分子材を周期的微視構造を有する材料と考え、均質化法に基づき、非晶性ガラス状ポリマーの構成式を導入し定式化した有限要素法¹¹⁾を用いる。

Fig. 1は構築した平面ひずみ状態下でのユニットセルモデルを示している。ここで、Fig. 1(a)に示すユニット

Fig. 1 Simulation models of porous polymer.

セルモデルには、空孔がランダムに分布する際の空孔間の距離と相対位置関係を4つの空孔によって近似的に表現する手法¹⁶⁾を適用している。さらに、ユニットセルモデルは四角形を二つの対角線で分割してできる四つの三角形を用いた要素(crossed triangles要素)で図に示すように分割した。crossed triangles要素の形状関数の詳細については、文献(12)を参照されたい。Fig. 1(b)は、空孔の分布状態の影響を調べるため、空孔を規則的に分布させた場合のユニットセルモデルを示している。空孔が規則に分布する場合、隣接する空孔のリガメント部は圧縮荷重を受ける際座屈する可能性があるが、本研究の研究対象である多孔質高分子材は密度が高いため、リガメント部の細長比が小さく、弾性座屈荷重が母材の降伏荷重より遥かに大きい。したがって、本研究では空孔が規則に分布する場合の弾性座屈が起こらないとし、弾性座屈の分岐解析を行わない。一方、母材が降伏した後の塑性座屈の分岐解析について、均質化法に基づいたマルチスケール数値解析手法との融合は现阶段では困難であるため、本研究ではリガメント部の塑性変形の不安定伝播挙動の考察に止める。

巨視領域に準静的な変形を発生させるために、 x_1 、 x_2 方向に圧縮ひずみ速度 $\dot{\Gamma}_1$ 、 $\dot{\Gamma}_2$ を与え、 $\dot{\Gamma}_1/\dot{\Gamma}_2$ の値を変化させることにより、異なる巨視的負荷状況を実現させた。また、 $\dot{\Gamma}_2 = 1.0 \times 10^{-5}/s$ とし、ユニットセルの表面にはshear-freeとする。Fig. 1に示す Σ_1 と Σ_2 は均質化された応力で、 $\Sigma_{ij} = \left(\int_V \sigma_{ij} dV \right) / |V|$ により定義され、 $\Sigma_1/\Sigma_2 = 0$ は巨視的単軸圧縮負荷状況を意味する。ここで、 $|V|$ はユニットセルの体積を表す。本研究では計算の簡略化のため、均質化法に基づいたマルチスケール数値解析手法を一般的な巨視的ひずみ場の場合に適用しているが、同手法は非一様な巨視的ひずみ場の場合にも適用されており、その詳細については、文献(17)を参照されたい。

本研究で用いる非晶性ガラス状ポリマーの構成式は寸法依存性がないため、空孔の初期体積含有率 f_0 はユニットセルモデルを構築する際に用いた唯一のパラメータで

ある。また、このユニットセルモデルを用いて行った解析は無次元解析となる。多孔質体の母材の材料定数は、非晶性ガラス状ポリマーの一種であるポリカーボネート樹脂の材料定数¹¹⁾を用い、 $E/s_0 = 23.7$, $h/s_0 = 5.15$, $As_0/T = 78.6$, $\alpha_p = 0.08$, $\dot{\gamma}_0 = 2.0 \times 10^{15}/s$, $s_0 = 97\text{MPa}$ とし、解析温度は $T = 296\text{K}$ とした。

4 解析結果

4・1 高分子母材の材料特性および空孔の分布状態が多孔質高分子材の圧密変形挙動に及ぼす影響

非晶性ガラス状ポリマーは、共有結合分子鎖が二次的な結合力でランダムに凝集した集合体であり、その物理的および力学的な性質は弱い二次的結合によって支配される。¹⁸⁾一方、多孔質高分子材の生成過程では、高分子材を溶解し、それに高圧気体を吹き込み、発泡固化させている。¹⁹⁾その結果、得られた多孔質高分子材の母材の材料特性は発泡工程によって異なる可能性がある。そこで、本研究では発泡工程が、母材の分子鎖セグメントの回転に起因する初期の分子間抵抗を表すパラメータである、構成式 (2) に含まれるせん断強さ s の初期値 s_0 に影響せず、分子鎖セグメントが回転した後の分子間抵抗を表すパラメータである、せん断強さ s が発展した後の安定値に影響を及ぼしていると仮定し、パラメータ s_{ss} を用いて、母材の材料特性が多孔質高分子材の圧密変形挙動に及ぼす影響を調べた。

Fig. 2 はパラメータ s_{ss} の値が異なる高分子材単相の単軸圧縮の応力-ひずみ関係図を示している。 $s_{ss} = 77.6\text{MPa}$ の場合、高分子材の特有なひずみ軟化およびひずみ硬化変形特性を示すが、 s_{ss} の値が大きくなるにつれ、ひずみ軟化域が小さくなり、降伏後直ちにひずみ硬化を呈する。

Fig. 3 は、巨視的な負荷状況が単軸圧縮 ($\Sigma_1/\Sigma_2 = 0$)、空孔の初期体積含有率が $f_0 = 40\%$ の場合の、Fig. 2 に示す変形特性を有する高分子材を母材とする多孔質材の巨視的な応力-ひずみ関係を示している。Fig. 4 は Fig. 3 に対応する多孔質高分子材の各変形段階の相当塑性ひずみ速度分布を示している。また、Fig. 3 と Fig. 4 では、空孔が規則的に分布する場合とランダムに分布する場合の結果も比較している。

空孔がランダムに分布する場合、 $\Gamma_2 = 0.015$ の変形段

Fig. 2 Effect of the characteristic value s_{ss} on simple compressive stress-strain relation of polymer matrix.

Fig. 3 Effect of the characteristic value s_{ss} and distribution of void on macroscopic compressive stress-strain relation of porous polymer for $\Sigma_1/\Sigma_2 = 0$, $f_0 = 40\%$.

階で、隣接する空孔のリガメント部で局所的な塑性変形の発生に伴い、巨視的な応力-ひずみ関係に降伏点が現れる。一方、空孔が規則的に分布する場合、リガメント部での局所的な塑性変形が $\Gamma_2 = 0.03$ の変形段階で発生するため、空孔がランダムに分布する場合と比べ、巨視的降伏が遅れている。また、多孔質体の初期弾性抵抗と降伏応力については、パラメータ s_{ss} の影響がほとんど見られなかったが、その値は空孔がランダムに分布する場合に比べ、規則的に分布する場合の方が大きい。

巨視的降伏後、空孔がランダムに分布する場合には、隣接する空孔のリガメント部で新たな塑性変形域が形成される同時に、最初に局所的な塑性変形が発生したリガメント部では座屈に近い変形が発生する。また、変形が進むにつれ、このような微視的座屈挙動は顕著になる。一方、空孔が規則的に分布する場合では、新たな塑性変形域の形成が見られず、最初に形成された塑性変形域がリガメント部に沿って伝播する様子が分かる。また、微視領域における局所的な変形パターンに及ぼすパラメータ s_{ss} の影響はほとんど見られないが、パラメータ s_{ss} の値は 77.6MPa の場合、リガメント部での鋭いせん断帯の形成と伝播挙動に応じて、空孔の一部は荷重方向へ伸びていることが分かる。一方、巨視的な応力-ひずみ関係においては、パラメータ s_{ss} の値が小さくなるにつれ、母材単相の降伏後の変形抵抗が小さくなるため、多孔質材の巨視的降伏後の変形抵抗も小さくなるが、変形の後期段階全般では、パラメータ s_{ss} の値に関係なく、変形抵抗はほぼ同程度で緩やかに上昇することが分かる。

以上の解析結果から、多孔質高分子材の圧密変形挙動に対して、母材の材料特性より空孔の分布状態の影響が大きいことが分かる。そこで、以下の解析ではパラメータ s_{ss} の値は 77.6MPa で一定とし、空孔がランダムに分布する状態を標準状態とする。

4・2 巨視的負荷状況が多孔質高分子材の圧密変形挙動に及ぼす影響

Fig. 5 は、空孔の初期体積含有率が $f_0 = 40\%$ の場合の、異なる巨視的負荷状況下での多孔質高分子材の巨視

Fig. 4 Equivalent plastic strain rate distributions in matrix of porous polymer for $\Sigma_1/\Sigma_2=0$, $f_0=40\%$.

Fig. 5 Effect of macroscopic triaxiality of loading condition on macroscopic compressive stress-strain relation of porous polymer for $f_0=40\%$.

的な応力-ひずみ関係を示している。Fig. 6は、Fig. 5に対応する多孔質高分子材の各変形段階の相当塑性ひずみ速度分布を示している。

静水圧に近い負荷状況 ($\dot{\Gamma}_1/\dot{\Gamma}_2=1$) の場合、 $\Gamma_2=0.01$ の変形段階で隣接する空孔のリガメント部で局所的な塑性変形が発生し、巨視的な応力-ひずみ関係に降伏点が現れる。その後、全ての空孔を繋がるように塑性域が發展する。さらに、変形が進むにつれ、隣接する空孔のリガメント部で微視的座屈変形が生じ、空孔が歪形となり、空孔の壁面同士が接触する。本研究で用いた解析モデルに接触モデルを取り入れるのは困難であるため、接触が発生する時点で計算を打ち切った。巨視的に一軸引張、一軸圧縮 ($\dot{\Gamma}_1/\dot{\Gamma}_2=-1$) の場合、 $\Gamma_2=0.015$ の変形段階で隣接する空孔のリガメント部で局所的な塑性変形が生じるため、静水圧に近い負荷状況の場合に比べ、巨視的降伏が遅れている。また、変形の後期段階で、座屈変形をするリガメント部の数が少なくなり、微視領域では負荷方

Fig. 6 Equivalent plastic strain rate distributions in matrix of porous polymer for $f_0 = 40\%$ under different macroscopic triaxiality of loading condition.

向に対して 45° 方向に鋭いせん断帯の形成と伝播が主な変形パターンとなる。

巨視的変形応答については、静水圧に近い負荷状況の場合、圧縮方向に垂直する方向の変形が拘束されるため、変形が拘束されない場合に比べ、変形の初期段階での弾性抵抗は大きい。また、巨視的降伏後、静水圧に近い負荷状況の場合、空孔の体積の減少に伴い、多孔質体の密度が上昇するため、巨視的変形抵抗の上昇が顕著になる。これに対して、巨視的に一軸引張、一軸圧縮の場合は、空孔の体積は変化せず、多孔質体の密度が変わらないため、巨視的変形抵抗が緩やかに減少することが分かる。

4・3 空孔の初期体積含有率が多孔質高分子材の圧密変形挙動に及ぼす影響

本研究では高初期相対密度 (0.6 以上) を有する多孔質高分子材を解析対象とするため、本節では空孔の初期体積含有率を $f_0 = 10\%$, $f_0 = 20\%$, $f_0 = 30\%$, $f_0 = 40\%$ にとった場合の多孔質体の圧密変形挙動を調べた。また、それぞれの結果を比較検討することにより、これらの初期体積含有率の空孔を有する多孔質体の圧密変形挙動に及ぼす巨視的負荷状況の影響が、4・2 節に示した結果と類似することが明らかになったため、ここでは巨視的負荷状況を単軸圧縮 ($\dot{\Gamma}_1 / \dot{\Gamma}_2 = 0$) とした場合の解析結果のみを示す。

Fig. 7 は空孔の初期体積含有率が異なる場合の多孔質高分子材の巨視的な応力-ひずみ関係を示している。Fig. 8 は、Fig. 7 に対応する多孔質高分子材の各変形段階の相当塑性ひずみ速度分布を示している。Fig. 9 は空孔の初期体積含有率が異なる場合の多孔質高分子材の巨

Fig. 7 Effect of initial volume fraction of void on macroscopic compressive stress-strain relation of porous polymer for $\Sigma_1 / \Sigma_2 = 0$.

視的体積ひずみ-圧縮ひずみ関係を示している。ここで、Fig. 9 中の V は変形後のユニットセルの体積、 V_0 は変形前の体積を表わしている。空孔の初期体積含有率が大きい場合に比べ、含有率が小さい場合、空孔間の距離が大きいため、母材部での局所的な塑性変形域の形成が遅くなり、巨視的な応力-ひずみ関係では降伏が遅れる。また、変形の後期段階で、空孔の初期体積含有率が小さい場合には、微視領域で負荷方向に対して 45° 方向に鋭いせん断帯が形成し伝播するが、リガメント部での微視的座屈挙動が見られなかった。さらに、巨視的体積ひずみ-圧縮ひずみ関係においては、空孔の初期体積含有率が小さい場合には、変形が進むにつれ、体積の減少傾向

Fig. 8 Equivalent plastic strain rate distributions in matrix of porous polymer for $\Sigma_1/\Sigma_2 = 0$ with different initial volume fraction of voids.

Fig. 9 Effect of initial volume fraction of void on macroscopic volumetric strain-compressive strain relation of porous polymer for $\Sigma_1/\Sigma_2 = 0$.

が緩やかになるため、巨視的降伏後、多孔質体の密度の上昇によるひずみ硬化は顕著に現れず、巨視的変形抵抗はほぼ一定となる。

5 結 言

本研究では、高分子複合材を対象とする均質化法に基づいたマルチスケール数値解析手法を高密度多孔質高分子材に適用すると同時に、空孔の分布状態を考慮可能な有限要素解析モデルを用い、高分子母材の材料特性、空孔初期体積含有率および巨視的負荷状況が多孔質体の圧密変形挙動に及ぼす影響を調べた。その結果、以下のことが明らかとなった。

(1) 多孔質高分子材の巨視的弾性係数、降伏応力および微視領域における局所的な変形パターンは、高分子

母材の分子鎖セグメントが回転した後の分子間抵抗を表すパラメータ S_{ss} に依存しない。

(2) 多孔質材の巨視的降伏後の変形抵抗は s_{ss} の値が小さくなるにつれ小さくなるが、変形の後期段階での変形抵抗は s_{ss} の値に関係なく、ほぼ同程度で緩やかに上昇する。

(3) 巨視的負荷状況が静水圧状態に近づくにつれ、微視領域内の局所的な塑性変形が促進され、変形の早い段階で降伏が現れる。一方、変形の後期段階では、隣接する空孔のリガメント部での微視的座屈変形に伴い、多孔質体の密度が上昇し、巨視的変形抵抗の上昇が顕著になる。

(4) 空孔の初期体積含有率が小さくなるにつれ、微視領域では負荷方向に対して 45° 方向に鋭いせん断帯の形成と伝播挙動が促進されるが、多孔質体の密度の上昇が抑えられるため、巨視的降伏後ひずみ硬化が現れず、巨視的変形抵抗はほぼ一定となる。

最後に、本研究で得られた解析結果は、高初期相対密度を有する多孔質高分子材の、圧密変形挙動を再現可能な降伏関数の構築に、新たな知見を与えていることを記しておく。これまで、多孔質高分子材の降伏関数の具体的な形を決めるには、母材の材料特性、空孔の体積含有率および巨視的平均応力値の3要素が多孔質材の変形抵抗に及ぼす影響を考察することが必要とされてきた。⁸⁾ しかし、多孔質高分子材は圧縮される場合、微視的座屈変形の有無によって、空孔の体積含有率変化の仕方が異なることが本研究により明らかとなり、その降伏関数を構築するには、従来の3要素に加えて微視的座屈変形の影響も検討すべきであることが示唆された。

参 考 文 献

- 1) G. S. Mustin, "Theory and Practice of Cushion Design", pp.201-210 (1968) The Shock and Vibration Center, US Department of Defence.
- 2) W. L. Ko, "Deformations of foamed elastomers", Journal of Cellular Plastics, Vol.1, No.1, pp.45-50 (1965).
- 3) M. R. Patal and I. Finnie, "Structural features and mechanical properties of rigid cellular plastics", Journal of Materials, Vol.5, No.4, pp.909-932 (1970).
- 4) L. J. Gibson and M. F. Ashby, "The mechanics of two-dimensional cellular materials", Proceedings of the Royal Society of London A, Vol.382, pp.25-42 (1982).
- 5) L. J. Gibson and M. F. Ashby, "The mechanics of three-dimensional cellular materials", Proceedings of the Royal Society of London A, Vol.382, pp.43-59 (1982).
- 6) M. J. Silva and L. J. Gibson, "The effects of non-periodic microstructure and defects on the compressive strength of two-dimensional cellular solids", International Journal of Mechanical Sciences, Vol.39, No.5, pp.549-563 (1997).
- 7) N. Ohno, D. Okumura and 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, Vol.50, No.6, pp.1125-1153 (2002).
- 8) V. Tvergaard, "Influence of voids on shear band instabilities under plane strain conditions", International Journal of Fracture, Vol.17, No.4, pp.389-407 (1981).
- 9) V. Tvergaard, "Interaction of very small voids with larger voids", International Journal of Solids and Structures, Vol.35, No.30, pp.3989-4000 (1998).
- 10) A. C. Steenbrink, E. Van der Giessen and P. D. Wu, "Void growth in glassy polymers", Journal of the Mechanics and Physics of Solids, Vol.45, No.3, pp.405-437 (1997).
- 11) W. Lu and Y. Tomita, "Estimation of deformation behavior of rubber-blended glassy polymers", Journal of the Society of Materials Science, Vol.50, No.6, pp.578-584 (2001).
- 12) Y. Tomita, "Computational Elasto Plasticity", pp.117-142 (1990) Yokendo Ltd.
- 13) A. S. Argon, "A theory for low-temperature plastic deformation of glassy polymers", Philosophical Magazine, Vol.28, No.4, pp.839-865 (1973).
- 14) M. C. Boyce, D. M. Park and A. S. Argon, "Large Inelastic deformation of glassy polymers, part I : rate dependent constitutive model", Mechanics of Materials, Vol.7, No.1, pp.15-33 (1988).
- 15) E. M. Arruda and M. C. Boyce, "A three-dimensional constitutive model for large stretch behavior of rubber elastic materials", Journal of Mechanics and Physics of Solids, Vol.41, No.2, pp.389-412 (1993).
- 16) V. C. Orsini and M. A. Zikry, "Void growth and interaction in crystalline materials", International Journal of Plasticity, Vol.17, No.10, pp.1397-1417 (2001).
- 17) N. Takano, Y. Ohnishi, K. Nishiyabu and M. Zako, "Deep-drawing simulation of knitted fabric reinforced thermoplastics by homogenization theory and experimental verification", Journal of the Society of Materials Science, Vol.50, No.5, pp.461-467 (2001).
- 18) I. M. Ward and J. Sweeney, "An Introduction to the Mechanical Properties of Solid Polymers", pp.1-16 (2004) John Wiley & Sons Ltd.
- 19) Y. Takeuchi, "Porous Materials-Characterization, Production and Application", pp.1-15 (1999) Fuji Technosystem Co., Ltd.