

令和元年6月7日現在

機関番号：12605

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2018

課題番号：15K05672

研究課題名(和文) 損傷を考慮した異方性弾塑性構成式とその発泡金属材料の変形過程への適用

研究課題名(英文) Anisotropic elastic-plastic constitutive equations considering the damage tensor and its application to the deformation process of porous metals

研究代表者

長岐 滋 (NAGAKI, SHIGERU)

東京農工大学・工学(系)研究科(研究院)・名誉教授

研究者番号：30135959

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：内部に多数の空孔が存在する発泡金属の変形シミュレーションを行うために、個々の空孔の分布を損傷テンソルと呼ぶ連続変数の分布に置き換える手法を開発した。空孔分布をX線CT装置を用いて同定し損傷テンソルを求める方法を提案し、得られた損傷テンソルの分布を用いて発泡金属材料の3次元弾塑性有限要素解析を行った。その結果、空孔の存在を直接考慮した従来法に比べてはるかに少ない計算コストで応力集中などを計算できる可能性を確認した。また空孔の成長挙動に関して、2次元モデルを用いて実験と理論の検討を進め、多数の空孔を分布させた薄板の引張試験を行い、損傷の発展状況について観察して、提案する手法との対応を確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

内部に多数の空孔を有する発泡金属は、衝撃緩衝材としての用途や軽量化を目指して構造材料として用いること等が検討されているが、実用化に際してはその変形過程のシミュレーションを正確に行う必要がある。多数の空孔の存在を直接考慮した変形シミュレーションには多大な計算コストが必要となるが、本手法の損傷テンソルを用いた方法によれば計算コストを大幅に削減することが期待される。

研究成果の概要(英文)：In order to predict the deformation of porous metals practically, the new method using the damage tensor instead of individual voids existence was developed in this study. The discrete distribution of voids in real porous metallic materials obtained by the 3D CT device was identified as the continuous distribution of damage tensor and three dimensional elastic-plastic deformation analysis of porous metal was carried out using this tensor distribution. It follows that using the proposed method the numerical costs of deformation analysis was decreased so much. The proposed theory was basically based on the anisotropic Gurson's yield function and by conducting a uniaxial tensile testing using a perforated sheet, the correlation was found between the strain distribution and the damage tensor distribution to some extent.

研究分野：固体力学、弾塑性構成式論

キーワード：損傷力学 塑性力学 発泡金属材料 弾塑性構成式 損傷テンソル 異方性降伏関数

## 1. 研究開始当初の背景

発泡金属材料は内部に多数の空孔を有することから、衝撃緩衝材としての用途や軽量化を目指して構造材料として用いること等が検討されている。実用化に際してはその変形過程のシミュレーションを正確に行う必要があるが、個々の空孔を考慮してシミュレーションを行うことは計算コストの上から現実的ではなく、また一方で空孔の幾何学的配置や成長過程が力学的挙動に及ぼす影響について定量的に明らかにすることが必要であると考えられていた。

## 2. 研究の目的

本研究では不規則に空孔が分布する比較的低発泡率の発泡金属材料を、損傷を有する材料とみなすことによって、損傷テンソルを用いて空孔の分布状態を定量的に表現し、空孔が成長していく過程を損傷テンソルの発展式として記述する手法を開発し、より正確な発泡金属の変形過程のシミュレーションを行うことを目的としている。

## 3. 研究の方法

発泡金属材料では当然ながら材料内部に微視的な空孔が多数存在し、変形の進行に従いそれらが成長・結合していく。しかし空孔の分布形態や空孔同士の相互作用が破断に至る具体的な過程やそれらが相互に及ぼす影響については十分には解明されていない。この過程について空孔を直接モデル化し有限要素解析をすることは要素数・節点数が膨大となり現実的でない。そのため空孔が存在することによる材料の損傷状態を内部状態変数として表現した構成式を用い、解析モデルを単純化することを提案する。

一方、近年では材料内部の3次元的情報を比較的容易に知ることができるようになり、たとえば桑水流らはADC12(ダイカスト)およびA1015(純アルミニウム)に発泡剤を添加し気孔率70%程度の発泡アルミニウム材を摩擦攪拌法により作製しそのCT観察に成功している。

そこで本研究では、気孔率が14%程度の発泡アルミニウム材に対して3次元CT画像をもとに空孔分布から損傷テンソルを求め、異方性Gursonの降伏関数に基づく損傷モデルを適用し、有限要素法による単軸引張り試験過程の解析を行って手法の妥当性を検討する。

またこのような空孔分布形態による異方性を考慮した異方損傷発展則の妥当性をより精密に検討するために、2次元理想化モデルとしての多孔平板を取り上げ、平板に複数個の空孔を分布させたモデルの単軸引張り試験を行った際の空孔成長挙動を実験的に観測して理論と比較検討することで異方損傷発展則の妥当性を検証する。

## 4. 研究成果

### (1) 理論

空孔の形状や配列形態によって生ずる塑性変形の異方性の影響を考慮するために、長岐・Sowerbyは村上・大野が提案した損傷テンソル $\Omega$ と実質応力テンソル $\mathbf{S}$ をGursonの降伏関数に導入して、次式のような異方性降伏関数 $F_{AG}$ を提案した。

$$F_{AG}(\mathbf{S}, \sigma_M, f) = \left( \frac{S_{eq}}{\sigma_M} \right)^2 + 2f \cosh \left( \frac{hS_{kk}}{2\sigma_M} \right) - (1 + f^2) \quad (1)$$

ここで、 $S_{eq}$ は実質応力 $\mathbf{S}$ の相当応力、 $f$ は空孔の体積分率であり、 $h$ は静水応力の影響を表すパラメータ、 $\sigma_M$ は母材の降伏応力である。また実質応力 $\mathbf{S}$ は損傷効果テンソル $\Phi$ を用いて

$$\mathbf{S} = \frac{1}{2} (\boldsymbol{\sigma} \Phi + \Phi \boldsymbol{\sigma}) \quad (2)$$

$$\Phi = (\mathbf{1} - c\Omega)^{-1} \quad (3)$$

とあらわされる。

不規則な空孔の分布形態を構成的に組み込むためには、内部構造を定量的に評価し、状態変数として損傷を定義する必要がある。そこでここではまず近接する空孔間を結んだ線分の垂直二等分線で領域を分割し、ボロノイ多面体を構成し、各ボロノイ多面体をステレオロジーの方法を用いて等価な直方体へと変換して損傷テンソル  $\Omega$  を求める方法を利用する。

## (2) 3次元分布する空孔のモデル化と有限要素解析

3次元的に分布する空孔のモデル化 X線CTにより観察したADC12アルミニウム合金ダイカスト試験片の内部構造を図1左上に示す。この発泡金属は摩擦攪拌法によって製作した。直径約16mm、長さ約14mmの領域をCTにより断面画像を撮像し3次元化（CADデータ化）したものである。領域中には空孔が193個存在し、空孔の体積分率は14.1%である。ここでは簡単化のため各空孔を球体に近似した。単純に空孔の存在を考慮しながら全体領域を要素に分割したvon Misesの解析モデル（図1中）と、ボロノイ領域分割を行い損傷量を各ボロノイ多面体に割り振って空孔の存在を考慮した異方性Gursonの解析モデル（図1右）を作製し、両者の解析結果を比較した。

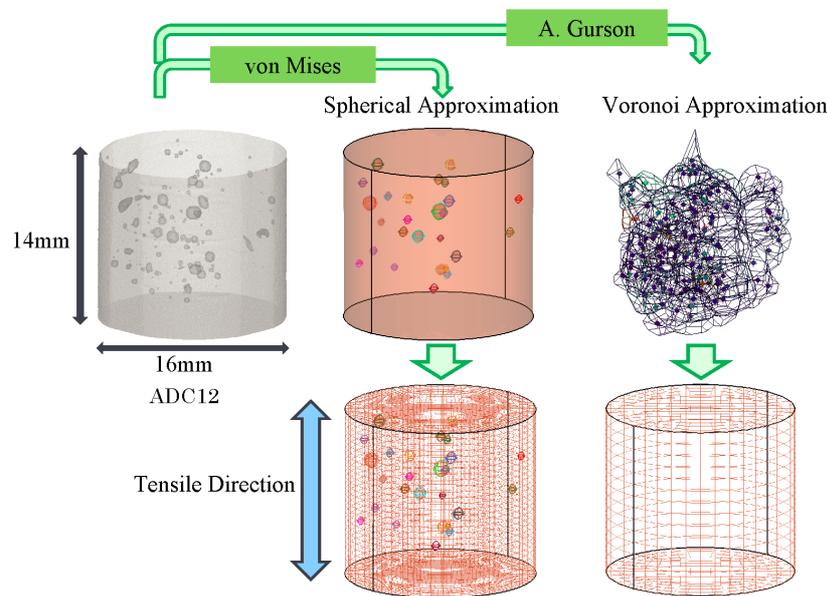


図 1: The void distribution of the porous metal and the finite element models for von Mises type and anisotropic Gurson type constitutive equations.

有限要素モデル 異方性 Gurson の解析モデルでは 20 節点 2 次 6 面体要素を用い、領域を 3,300 要素、13,889 節点分割した。比較のために作成した Mises モデルでは、領域を 8 節点 1 次 6 面体要素を用いて分割し、要素数は 36,949、節点数は 39,885 とした。これらのモデルに対して単軸引張変形の解析を行った。母材のヤング率  $E$  は 74.5GPa とし、加工硬化則については  $\sigma_M = A(\epsilon^p)^n$  の形を仮定し、 $A = 7.08 \times 10^2 \text{MPa}$ 、 $n = 0.209$  を用いた。

計算結果 巨視的な引張りひずみを 3.0%与えた場合について、モデルの下面から 10mm の断面における相当塑性ひずみ分布の解析結果を図 2 に示す。通常の von Mises の降伏関数を用いて空孔の存在をそのまま考慮した解析結果では、当然のごとく空孔の周辺にひずみの集中が生じていることがわかる。一方、異方性 Gurson の降伏関数による解析結果においても、空孔が存在する位置においてひずみが集中していることが再現できている。ただしひずみの絶対値等については両者に関差がある。これは空孔の成長過程を十分に記述できていないことにも一因があると考えられる。

## (3) 2次元モデルにおける空孔成長挙動に関する検討

先に述べたように、空孔を有する材料の変形過程の正確なシミュレーションを行うためには、変形

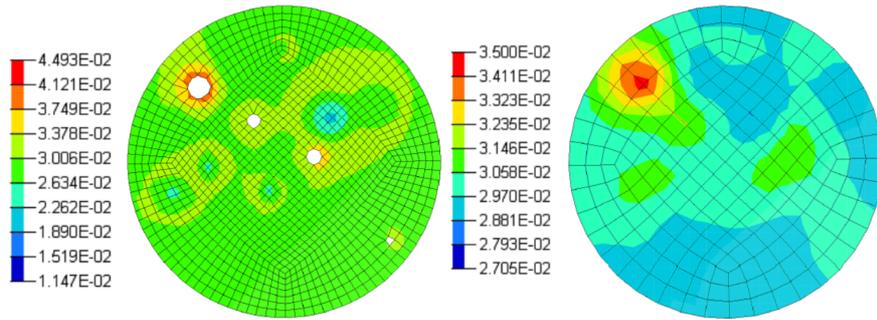


図 2: The equivalent plastic strain distributions for both von Mises and anisotropic Gusion models at 10mm from the bottom section.

に伴う空孔の成長挙動をも詳しく調べる必要がある．そこでここでは空孔を有する材料（発泡金属）の2次元理想化モデルとして多孔平板をとりあげ、荷重負荷時の空孔の変形状態と対応する損傷テンソルの変化について検討した．

平板に配置する空孔のパターンの一例は、図3に示すように損傷テンソルを導出できる最小の個数である5つとしたモデルである．このモデルでは空孔は直径2mmとし、空孔の配置に関しては、平面上に等間隔に分布するモデルにおける空孔体積分率  $f$  が 0.10, 0.15, 0.20 となる配置を用い、単位セルの長辺を  $2L_2$ 、短辺を  $2L_1$  とし形状比  $L_2/L_1$ 、単位セルの主軸  $X_2$  と荷重方向  $X'_2$  とのなす角である配列角  $\theta$  をパラメータとして配置させている．形状比  $L_2/L_1$  は 1, 4/3, 3/2 の3種類とし、配列角  $\theta$  は  $0^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $90^\circ$  の5種類である．この他にも様々な円孔配置パターンについて検討したが、ここではこの例についてのみ報告する．

実験の供試材にはステンレス鋼 SUS304 を用い、試験片形状は、平行部の幅を 80mm、肩部の半径を R28、平行部の長さを 160mm、試験片の厚さを 0.5mm とした．図3に試験片の形状を示す．試験片の中央部に5つの空孔を分布させ、試験片の中心から下 50mm の所に塑性ひずみゲージを貼り付け単軸引張試験を行い、試験片の巨視的なひずみを計測し、巨視的なひずみが 0.01 毎に各空孔の写真撮影し空孔の変形量を測定して損傷量を求めた．

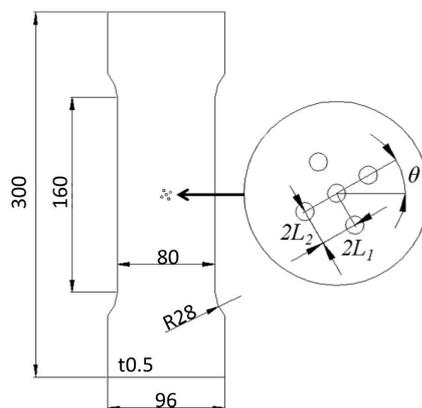


図 3: Shape of specimen

損傷量の変化について、実験結果と本研究で提案した理論を用いた数値計算結果を比較する．荷重方向のひずみである  $\varepsilon_{22}$  を横軸、 $X'_1 - X'_2$  座標系での損傷テンソル成分  $\Omega_{11}$ ,  $\Omega_{22}$  を縦軸としてそれぞれグラフを作成した．実線が計算結果、各プロットが実験結果を示している．異なる単位セル形状

比についても比較を行うため、単位セルの形状比  $L_2/L_1$  が 1 の場合を青、 $4/3$  の場合を緑、 $3/2$  の場合を赤とした。

例として空孔体積分率  $f = 0.10$  について、図 4 に空孔配列角度  $\theta = 0^\circ$ 、図 5 に配列角度  $\theta = 45^\circ$  の比較結果を示す。ここでは、図 4 の単位セル形状比  $L_2/L_1 = 1$  の実験結果と合うようにパラメータを決めているが、図 4 の異なる単位セル形状比についても実験結果と数値計算の結果はよく一致している。また、実験結果は荷重方向に垂直な面における損傷量である  $\Omega_{22}$  はあまり変化せず、荷重方向の面における損傷量である  $\Omega_{11}$  が大きく増加しているため損傷が異方的な成長を示していることが分かる。これは、実験で  $X_2'$  方向に引張っているため、空孔が  $X_2'$  方向に延びるため荷重方向の面における損傷量である  $\Omega_{11}$  が大きく増加したと考えられる。数値計算の結果についても実験結果と同様に  $\Omega_{22}$  はあまり変化せず、 $\Omega_{11}$  が大きく増加しているため、本研究の構成式は損傷の異方的な成長を表現できていると言える。また、異なる空孔体積分率についても実験結果と計算結果はよく一致した。

異なる空孔配列角度での比較を行った図 5 の場合では、 $\Omega_{11}$  についてはある程度の一致が見られ、 $\Omega_{22}$  については過小評価する結果となり、配列角度  $\theta = 0^\circ$  の場合ほど実験結果と数値計算の結果に定量的な一致は見られない。しかし、実験結果、計算結果ともに  $\Omega_{11}$  が大きく増加し、 $\Omega_{22}$  があまり増加していないので損傷の異方的な成長を表現できていることから定性的な一致が見られた。

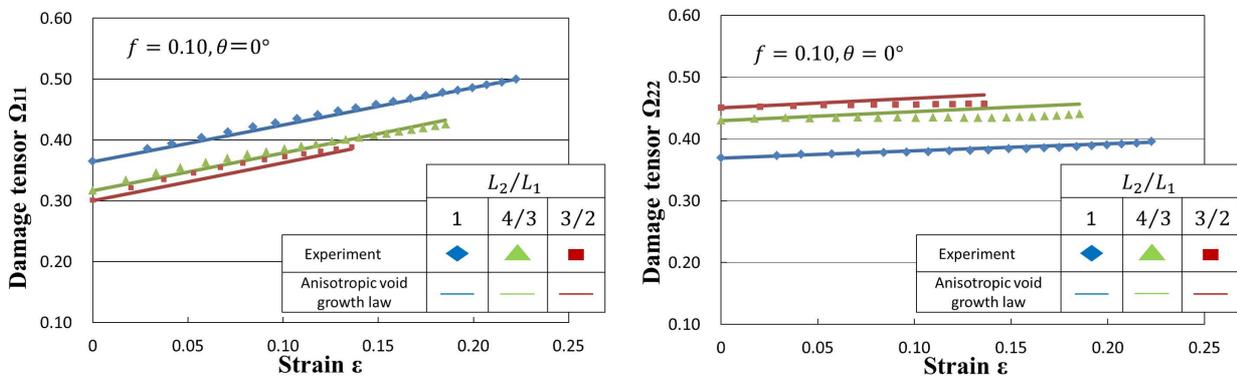


図 4: Strain  $\varepsilon$ -Damage tensor  $\Omega$  diagram  $f = 0.10, \theta = 0^\circ$

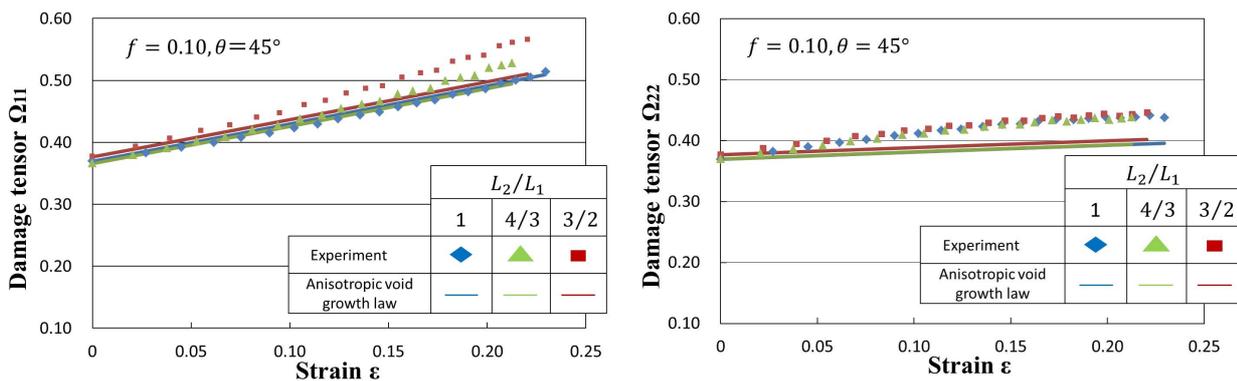


図 5: Strain  $\varepsilon$ -Damage tensor  $\Omega$  diagram  $f = 0.10, \theta = 45^\circ$

#### (4) 結 言

発泡金属の変形解析において、CT 画像に基づく 3 次元的な損傷評価を考慮した異方性 Gurson の降伏関数を用いた有限要素弾塑性解析によって、複雑な空孔分布に対して簡易な要素分割を用いて引張変形における空孔の影響によるひずみの集中を再現できることがわかった。

さらに、空孔を規則的に配列させた 2 次元モデルでの単軸引張試験において、異方損傷発展則の数値計算の結果と実験結果の比較を行った結果、様々な空孔体積分率、単位セル形状比、配列角度について提案する損傷発展則は損傷の異方的な成長を表現できることがわかった。

## 5. 主な発表論文等〔雑誌論文〕(計3件)

- (1) S. Nagaki, D. Saboi, K. Muroi, M. Iizuka and K. Oshita, Anisotropic Damage Evolution for Perforated Sheet Under Tensile Deformation, 査読有, Key Engineering Materials, 725, 2017, pp.489-494
- (2) 飯塚誠, 長岐滋, 大下賢一, 熱力学的考察に基づく多孔質材料の異方性弾塑性構成式, 査読有, 日本機械学会論文集, 83-847, 2017, pp.1-13
- (3) 飯塚誠, 長岐滋, 大下賢一, 舘俊光, 塚本平, 多孔平板における空孔の異方的成長の計測と解析, 査読有, 材料, 66-11, 2017, pp.847-852

## 〔学会発表〕(計5件)

- (1) 大下賢一, 長岐滋, 木口瑞玖, 片岡拓也, 異なる空孔直径を有する平板の単軸変形下での損傷評価, 日本機械学会講演論文集, No.18-1, 2018
- (2) T. Kataoka, S. Nagaki and K. Oshita, Damage Evaluation of Perforated Sheet Using Anisotropic Gurson's Yield Function, Proc. ISEM'16, 2016
- (3) 長岐滋, 吉井良, 大下賢一, 宇都宮登雄, 半谷禎彦, 異方性 Gurson の降伏関数を用いた発泡金属材料の弾塑性変形解析, 日本機械学会講演論文集, No.14-1, 2016
- (4) 飯塚誠, 長岐滋, 大下賢一, 熱力学的考察に基づく多孔質材料の弾塑性構成式析, 日本機械学会講演論文集, 2016
- (5) S. Nagaki, D. Saboi, K. Muroi, M. Iizuka and K. Oshita, Anisotropic Damage Evolution for Perforated Sheet Under Tensile Deformation, Proc. AEPA2016, 2016

## 〔その他〕

ホームページ等

<http://web.tuat.ac.jp/nagaki/index.html>

## 6. 研究組織

### (1) 研究分担者

研究分担者氏名：大下 賢一

ローマ字氏名：(OSHITA, kenichi)

所属研究機関名：東京農工大学

部局名：大学院工学研究院

職名：助教

研究者番号(8桁)：60334471

### (2) 研究協力者

研究協力者氏名：宇都宮 登雄

ローマ字氏名：(UTSUNOMIYA, takao)

研究協力者氏名：半谷 禎彦

ローマ字氏名：(HANGAI, Yoshihiko)

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。