

平成 30 年 6 月 20 日現在

機関番号：12102

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05671

研究課題名(和文) マイクロセルラー発泡材料のミクロ構造均質化による力学特性の設計法構築

研究課題名(英文) Establishment of design method for mechanical properties of microcellular foam material by homogenization of microstructure

研究代表者

松田 昭博 (Matsuda, Akihiro)

筑波大学・システム情報系・准教授

研究者番号：20371437

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、ポリウレタンなど、材料内部が微細な空隙で充填されている高分子発泡材料の中で、空孔の形状が均一で微細なマイクロセルラー発泡材料を対象として、剛性や強度などの力学特性を数値シミュレーションで設計する方法の開発を目的とした。マイクロセルラー発泡材料を対象とした力学特性試験によって、発泡材料および母材の力学特性を明らかにするとともに、微視的な構造が周期的に配置する条件で解析することが可能な均質化法を用いた3次元の有限要素解析プログラムを開発した。提案した解析手法によって、発泡材料の微視的な構造を考慮して、剛性等を予測することが可能となった。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this research is to develop a homogenization numerical simulation methods for mechanical characteristics, such as stiffness and strength of microcellular foam materials which contains microscale air voids. Mechanical characteristics of foam and matrix materials were evaluated by mechanical loading tests of microcellular foam. A 3-dimensional homogenized finite element analysis program which is possible to apply the periodic boundary condition of microstructures was developed. Proposed analysis method is possible to predict the stiffens in finite strain region considering the microstructures.

研究分野：計算力学

キーワード：高分子発泡材料 マイクロセルラー発泡 均質化 微細構造

### 1. 研究開始当初の背景

ポリウレタンおよびポリエチレン等の発泡材料は、無数の多面体のセルで構成されており、我々が使用する様々な機械および用具の内部で、防振材、シール材、衝撃吸収材料として用いられている。これらの発泡材料は、内部の発泡セルの構造と気体と樹脂の割合を制御することによって、原材料である樹脂の特性と異なる柔軟に大変形する力学特性を示し、剛性等の密度あたりの強度である比強度を制御することが可能である。現在、スポーツ用シューズや自動車・航空機等の乗車シートなど、衝撃吸収性能が高く、より薄くて軽いものが次々と実用化されており、特に人間と機械とのインターフェイスとして重要度が高まっている。

ここで、発泡材料の力学特性に注目し、特に圧縮変形を受けることを考えた時、小さいひずみ領域ではセル壁を構成する部材が線形弾性的に変形し、さらに大きなひずみを生じた場合はセル壁の部材が弾性座屈を起こす。この時、セルの構造が有するばらつきによって、弾性座屈は材料全体ではなく、剛性の弱い場所で微視的に生じるため、圧縮ひずみの増加に対して一定の応力を生じるプラトー現象が起きる。従来の発泡材料のセル径は 300  $\mu\text{m}$  程度以上であり、そのセル径とセル壁厚さのばらつきは、発泡プロセスと発泡剤に影響を受けるが、平均的なセル径の数倍から半分以下のセル径のものが一定の割合で存在する。これらの、発泡材料のセル構造のばらつきに対する解決方法の一つとして、不活性ガスを用いたマイクロセルラー発泡 (MCF) プロセスの開発が進められている。本プロセスを用いて生成される MCF 材料は、一般的に 0.1 ~ 数十  $\mu\text{m}$  の独立セルを有する発泡体のことを指す。また、本プロセスは、従来の発泡材料と比較してセル径を均一にすることが可能である。

発泡材料内の微視的なセルのセル径やセル壁厚さを均一にできると、圧縮などの変形を受ける際の各セル壁の弾性座屈の応力は一定となり、セル壁の多くが同時に座屈することになるため、剛性や破壊エネルギーの向上を図ることが可能である。

しかしながら、セル構造を均一化することによって高い剛性や破壊強度が得られるものの、セル構造に残るわずかなばらつきが力学特性に大きく影響することになる。加えて、セル構造の形状が MCF 材料の力学的特性に与える影響については未解明な部分が多かった。

### 2. 研究の目的

ポリマー樹脂のレオロジーとしての変形と流動に対して、周期的な微視構造を考慮可能な均質化法を適用した数値シミュレーション技術の開発を行い、材料設計のプロセスの効率化を図ることを目的とした。開発する解析コードは、ポリマー樹脂を有限変形を考慮

した粘弾性体として扱い、剛性と粘度に対する依存性を導入する。また、樹脂をレオロジーとして評価した変形・流動解析によって得られた MCF 発泡材料の微視構造を用いて、微視的なセル構造と巨視的な MCF 発泡材料の力学特性に与える影響について評価可能にすることである。

### 3. 研究の方法

樹脂の MCF プロセスにおけるレオロジーとしての流動と気泡の生成を再現する有限要素法をベースとした数値解析コードを開発する。解析コードは、ポリウレタンおよびポリエチレン熱可塑性ポリマーを対象として、材料の数値モデルとして非線形の粘弾性体を適用する。粘弾性体はダッシュポットと弾性バネが並列に並ぶモデルとして、温度と時間に依存する剛性と粘性を導入する。解析領域は、構造セル数個分のユニットセルを設けて、周期的な境界条件を付加することによって、ユニットセル周辺に同じユニットセルが並ぶマイクロ構造を再現する。温度と圧力を解析条件として、不活性ガスの気泡核をユニットセル中心に設定し、その気泡核に対して、溶解する不活性ガスの圧力に応じた外力と表面張力をユニットセル上で加え、微視的な構造がセルの力学特性に与える影響について解析を行う。

#### (1) MCF 材料の力学解析

流動解析によって得られたセル構造が周期的に存在すると仮定した均質化法を用いて、MCF 材料の変形解析を行う。構造セルのセル壁についてはひずみに対して応力が線形となる線形弾性体を用いる。材料試験で加える引張もしくは圧縮の変形を解析条件として、構造セルに生じる微視的な変形と応力を求めることで、ユニットセルが周期的に配列した発泡材料の強度等を求める。また、構造セルにばらつきが生じることの影響を評価するために、異なる角度に対して引張・圧縮変形を加えて、数値解析の検証を行う。

#### (2) MCF 材料の力学試験

MCF 発泡材料を製作し、スクリー式静的荷重試験機 (オートグラフ) を用いて強度と破壊エネルギーを力学試験によって求める。試験片は、気泡核を形成するための不活性ガスとして二酸化炭素を用いて、加圧する温度と時間をパラメーターとして作成する。また、試験片の発泡状態を確認するため、マイクロスコープを用いた内部構造の観察を行い、その後引張材料試験と圧縮材料試験を実施する。ここで、ポリマー樹脂として、ポリウレタン樹脂を用いる。試験では、ビデオカメラを用いて試験片のひずみを画像処理することでより正確に変形を求める。変形のビデオ映像からは、3次元の画像解析ソフトウェアである TEMA3D を用いる。

#### 4. 研究成果

##### (1) MCF 材料の力学解析

MCF 材料の剛性及び強度などの力学特性をシミュレーションすることが可能な均質化理論を導入した有限要素解析プログラムを開発した。均質化理論については、ユニットセルに対して周期的な境界条件を付与することで、設定したユニットセルが空間を埋める条件とすることで解析可能にした。材料モデルとして、非線形弾性と粘性を組み合わせた非線形粘弾性モデルを組み込むことで、大きな変形が生じたとしても、適切に母材の特性を再現できる。解析プログラムはプログラム言語 Fortran のソースコードから作成したものであり、汎用性を確保することができた。

MCF 材料の中で、気泡が連続しているオープンセルの発泡材料の複雑な微細構造を周期的な構造と仮定し、均質化理論を適用した結果について図 1 に示す。このユニットセルは切頂八面体であるため、周期的な構造を構成するユニットセルと定義することが可能である。これにより、ユニットセル一つを対象とした解析によって、ユニットセルが空間を充填している構造の力学特性を得ることが可能となる。解析の結果から得られた、変形と応力の関係を図 2 に示す。図には異なる密度の発泡材料の強度がプロットされているが、良い一致を示すことができた。

##### (2) MCF 材料の力学試験

試験片として相対密度の異なる 3 種類のオープンセル発泡材料を用い、試験片の形状を一辺 40mm の立方体型の試験片とした。試験機は AG-20kNXplus (島津製作所製) を用いて実施した。試験条件は、ひずみ 0.6 まで圧縮後、ひずみ 0 まで除荷した。また、試験片の初期長さを基準として公称ひずみを評価し、計測された荷重を無荷重時の載荷面の断面積で除した値を公称応力とした。

各試験の応力ひずみ関係から初期剛性を算出し、初期剛性と相対密度の関係を評価した。初期剛性と相対密度の関係、原点を通る二次関数の近似式を図 3 に示す。図より、初期剛性と相対密度の関係が二次関数でよく近似でき、Gibson と Ashby(1999) が示した式と同様な関係があることを確認した。

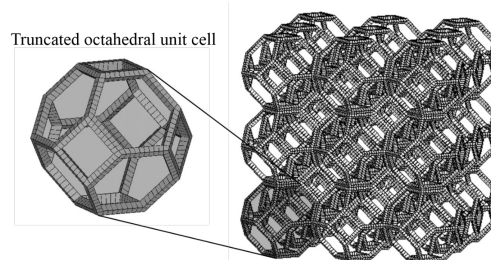


図 1 均質化 FEM 解析で用いたユニットセルと周期境界条件

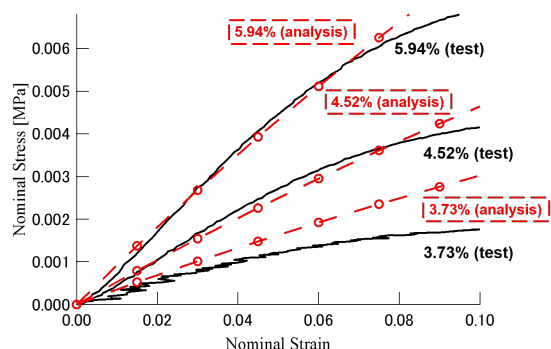


図 2 均質化 FEM 解析と材料試験の結果

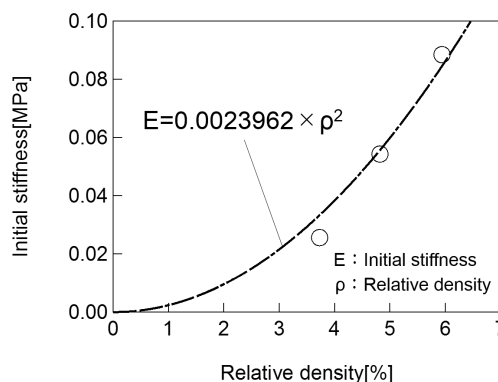


図 3 相対密度と初期剛性の関係

#### 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 6 件)

Akihiro Matsuda, Sho Oketani, Yuki Kimura, Akitaka Nomoto, Effect of microscopic structure on mechanical characteristics of foam rubber, Constitutive Models for Rubber: Proceedings of the 10th European Conference on Constitutive Models for Rubbers, 査読有, pp. 575-579 (2017)

Sho Oketani, Akihiro Matsuda, Akitaka Nomoto, Yuki Kimura, Three-dimensional homogenization finite element analysis of open cell

polyurethane foam、 Constitutive Models for Rubber: Proceedings of the 10th European Conference on Constitutive Models for Rubbers、 査読有、 pp. 581-586 (2017)

Akitaka Nomoto、 Hiroki Yasutaka、 Sho Oketani、 Akihiro Matsuda、 2-Dimensional homogenization FEM Analysis of hyperelastic foamed rubber、 Procedia Engineering、 査読有、 Vol. 147、 pp. 431-436(2016)

Ryuya Shimazu、 Hiroki Yasutaka、 Akitaka Nomoto、 Akihiro Matsuda、 3-dimensional homogenization FEM analysis of hyperelastic low density polymer foams、 Constitutive Models for Rubber: The Proceedings of the 9th European Conference on Constitutive Models for Rubbers、 査読有、 pp.675-681 (2015)

Kohtaro Kobayashi、 Takahiro Isozaki、 Akihiro Matsuda、 Yoshinobu Mizutani、 Yasuhiko Hori、 Lifetime prediction of EP and NBR rubber seal by thermos-viscoelastic model、 Constitutive Models for Rubber: The Proceedings of the 9th European Conference on Constitutive Models for Rubbers、 査読有、 pp.91-96 (2015)

Akihiro Matsuda、 Development of anisotropic hyperelastic model considering stress softening、 Constitutive Models for Rubber: The Proceedings of the 9th European Conference on Constitutive Models for Rubbers、 査読有、 pp. 265-270 (2015)

[学会発表](計 13 件)

小野寺 隼人、松田 昭博、マイクロセルラーウレタン発泡材の圧縮性超弾性体による力学特性評価、日本機械学会 第 30 回 計算力学講演会、No. 240(2017.9.16)

木村 雄生、松田 昭博、桶谷 翔、加藤 和人、遊部 邦男、軟質ポリウレタンフォームの均質化 FEM 解析、日本機械学会 第 30 回 計算力学講演会、No. 240(2017.9.16)

桶谷 翔、松田 昭博、木村 雄生、加藤 和人、オープンセル発泡体の微細構造を模擬した均質化 FEM シミュレーション、日本機械学会 シンポジウム：スポーツ工学・ヒューマンダイナミクス 2017 講演論文集、No. D-5 (2017.11.9)

松田 昭博、桶谷 翔、均質化 FEM によるクローズドセル発泡材料の微視構造の影響評価、日本機械学会 シンポジウム：スポーツ工学・ヒューマンダイナミクス 2017 講演論文集、No. D-5 (2017.11.9)

小野寺 隼人、松田 昭博、樋口大地、マイクロセルラーウレタンを用いた自動車部品の力学特性評価に関する研究、日本機械学会 関東学生会 第 56 回 学生員卒業研究発表講演会講演論文集、講演番号 1201 (2017.3.16)

木村 雄生、松田 昭博、加藤 和人、高分子発泡材料の力学的特性評価に関する研究、日本機械学会 関東学生会 第 56 回 学生員卒業研究発表講演会講演論文集、講演番号 1102 (2017.3.16)

桶谷 翔、野本 明誉、松田 昭博、3次元均質化 FEM 解析の発泡ゴムへの適用性に関する研究、日本機械学会 M&M2016 材料力学カンファレンス、OS03：ゴムの材料力学、OS03-01(2016.10.10)

野本 明誉、桶谷 翔、松田 昭博、超弾性体の均質化 FEM における発泡構造の影響評価、日本機械学会 M&M2016 材料力学カンファレンス、OS03：ゴムの材料力学、OS03-02 (2016.10.10)

桶谷 翔、野本 明誉、松田 昭博、3次元微細構造を考慮した発泡ゴムの均質化 FEM 解析の開発、日本機械学会 第 24 回 茨城講演会講演論文集、No. 902 (2016.8.26)

桶谷 翔、野本 明誉、安高 啓貴、松田 昭博、3次元微細構造を再現した均質化解析による発泡ゴム材料の力学特性評価手法の開発、日本機械学会 関東学生会 第 55 回 学生員卒業研究発表講演会講演論文集、講演番号 311 (2016.3.10)

野本 明誉、安高 啓貴、桶谷 翔、松田 昭博、発泡ゴム材料の微細構造を再現したゴム試験体の圧縮特性と二次元均質化解析による力学特性評価、日本機械学会 関東支部 第 22 期総会・講演会講演論文集、講演番号 OS0501 (2016.3.10)

野本 明誉、安高 啓貴、松田 昭博、発泡ゴムの微細構造を考慮した力学特性評価手法の開発、日本機械学会 スポーツ工学・ヒューマンダイナミクス 2015 講演論文集、No. B-22(2015.10.30)

野本 明誉、嶋津 龍弥、安高 啓貴、松田 昭博、発泡ゴム材料の力学特性に与える微細構造の影響評価に関する研究、日本機械学会関東学生会第 54 回 学生員

卒業研究発表講演会講演論文集、講演番号 318 (2015.3.20)

〔図書〕(計 1 件)

松田 昭博、嶋津龍弥、【実践】発泡成形、  
第 5 章 軟質発泡材料の特性評価、S&T  
出版、ISBN 978-4-907002-55-8 (2016)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

6 . 研究組織

(1)研究代表者

松田 昭博 (MATSUDA, Akihiro)  
筑波大学・システム情報系・准教授  
研究者番号： : 2 0 3 7 1 4 3 7