

(様式 5)

2022 年 11 月 29 日
Year Month Day

学位（博士）論文要旨

(Doctoral thesis abstract)

論文提出者 (Ph.D. candidate)	工学府博士後期課程 機械システム工学専攻 (major) 年度入学(Admission year) 学籍番号 20833005 氏名 久保漱汰 (student ID No.) (Name)
主指導教員氏名 (Name of supervisor)	桑原利彦
論文題目 (Title)	大ひずみ二軸応力下における樹脂材料の弾塑性変形挙動の測定と解析

論文要旨（2000 字程度）
(Abstract(400 words))
※欧文・和文どちらでもよい。但し、和文の場合は英訳を付すこと。
(in English or in Japanese)
樹脂材料は、日用品から一般工業製品まで幅広く使われている。また、自動車や精密機械などの最先端分野で使われるエンジニアリングプラスチックや特殊エンブラは、生活に不可欠な材料として普及している。特に熱可塑性エンジニアリングエラストマは、今後とも適用箇所の拡大と技術革新が続くことが見込まれる。反発弾性や柔軟性を活かし、衝撃緩和や可動部の保護など、頻繁に大変形を受ける用途で用いられるため、塑性領域における変形挙動を明らかにすることは重要な課題である。
成形シミュレーションを用いて材料の変形挙動を高精度に予測するためには、加工中に材料に付与されるレベルの大きなひずみ範囲まで、材料の変形挙動（応力-ひずみ曲線：ss 曲線）を正確に再現できる材料構成則を確立し、成形シミュレーションに適用する必要がある。樹脂材料の変形挙動を測定する材料試験法として、JIS K7161 に規定されている単軸引張試験法がある。一方、より高精度な材料モデルを構築するためには、単軸応力下での材料試験に加えて、実際の使用環境下における応力状態を再現できる多軸応力試験を行い、その測定値を用いて材料モデルを構築することが必須である。しかし、大変形の二軸応力状態における ss 曲線を精密に測定するための材料試験法が確立されていないため、大変形領域における成形シミュレーションの予測精度は十分ではなく、高精度な材料モデルの構築と、その成形シミュレーションへの適用が渴望されている。
本研究では、樹脂材料としては最も生産量が多いポリエチレンと、ポリエステルを主成分とする熱可塑性エラストマー（TPE、東洋紡株式会社製）を研究対象として、これらの材料に任意の二軸応力状態を負荷することができる二軸バルジ試験機を設計・製作した。この試験機を用いて、精密に制御された線形応力経路による二軸応力試験を実施し、材料の二軸変形挙動を測定した。さらに塑性ひずみの測定方法として、2 種類の手法を検討した。一つは単調に直線応力経路を負荷し、弾性係数を算出し、全ひずみから弾性ひずみを引く方法である。もう一つは、応力の負荷と除荷を繰り返し、除荷直前の応力と除荷時の永久

ひずみを塑性ひずみを測定し、真応力－塑性ひずみ曲線を求める方法である。両者を比較してその特性を評価・検証した。さらに測定された二軸変形特性に基づいて、降伏関数を用いた材料モデルを作成した。

第1章では、本研究にかかわる社会的背景を述べ、ポリエチレンと熱可塑性エラストマの適用事例について述べている。さらに樹脂材料に二軸応力を負荷し、材料の変形挙動を測定する試験方法の現況と関連研究を概説し、それらを踏まえたうえで、本研究の意義を述べている。

第2章では、本研究で設計・製作した、樹脂材料に適した二軸応力試験機（以下、二軸バルジ試験機）について、ハードウェア（機械構造）とソフトウェア（制御系）の両面から記述している。本試験機は、円管樹脂材料に軸力と内圧を同時に付加し、かつ非接触で材料の変形を測定することにより、二軸の真応力－対数ひずみ曲線を測することができる。真応力と対数ひずみの算出手法についてその詳細を記述している。加えて、二軸バルジ試験機のアクチュエータとセンサの制御PCへの接続方法及び、制御プログラムを解説する。線形応力経路下で単調に二軸応力を負荷する試験方法（単調負荷試験）におけるひずみ速度の制御方法と、負荷除荷を繰り返しながら試験を行う方法（負荷－除荷試験）におけるひずみ速度制御方法について、詳細に説明している。

第3章では、低密度ポリエチレン押出し円管を供試材として、二軸応力下における変形挙動を精密に測定している。まず単調負荷試験を行い、真応力-対数全ひずみ曲線を測定した。さらに等仕事面を測定し、その形状を観察することで異方性を評価した。単軸引張応力状態の試験については、管軸方向と円周方向の単軸応力状態では変形特性に差異は見られなかったが、二軸応力下では明らかな異方性を示すことがわかった。すなわち、正確な材料特性の把握には、二軸応力試験が必要不可欠である。さらに、真応力－塑性ひずみ曲線の測定方法を提案している。一つの試験片に対して負荷除荷を繰り返し、除荷直前の真応力と除荷時の塑性ひずみの関係から材料の真応力－塑性ひずみ曲線を測定している。この試験結果から等塑性仕事面を測定し、材料の異方性を評価するとともに、異方性降伏関数を用いた材料モデリングの手法を提案している。

第4章では、ポリエステル系熱可塑性エラストマ押出し円管の真応力－塑性ひずみの関係を測定した。この材料では、二軸応力単調負荷試験と二軸応力負荷除荷引張試験を実施している。金属材料と同等の手法で二軸応力単調負荷試験から測定した真応力－塑性ひずみ曲線と負荷除荷試験によって測定した同曲線を比較している。さらに等塑性仕事面を測定し、これに異方性降伏関数を適用することで、同材料で成形シミュレーションを行う際の材料モデルを同定している。結果、材料の加工硬化挙動と変形挙動を同時に精度よく再現したい場合には、降伏関数には $Y_{ld2000-2d}$ (A)を用い、塑性ポテンシャルには $Y_{ld2000-2d}$ (B)を用いる、非関連流れ則に基づく材料構成則の構築を推奨している。

第5章では1～4章の結果を総括して、本研究で得られた知見及び残された課題を示した。

(英訳) ※和文要旨の場合(400 words)

Polymeric materials are widely used in general industrial products. In particular, elastomers are frequently used in construction parts, such as shock mitigation and protection of moving parts. These parts may be subjected to multiaxial stresses and large plastic strains in service. Therefore, it is important to precisely measure the deformation behavior of elastomers subjected to multiaxial stresses with large strain, and to make a material model to be used in numerical simulations to predict optimum part geometry and the deformation behavior in service.

Chapter 1 summarizes the background and objective of this study.

Chapter 2 describes a material testing apparatus for measuring the biaxial deformation behavior of a polymer tube. It applies an axial force and internal pressure to a tubular specimen to quantitatively evaluate the deformation behavior of polymeric materials. The feedback control circuit for controlling the biaxial stress components and strain rate constants are explained.

Chapter 3 describes the experimental results of the material testing of a polyethylene (LDPE) tube with an outer diameter of 17 mm and a thickness of 2 mm. The test sample are subjected to linear stress paths with stress ratios of $\sigma_\phi : \sigma_\theta = 1:0, 4:1, 2:1, 4:3, 1:1, 3:4, 1:2, 1:4$, and $0:1$, where σ_ϕ and σ_θ are the axial and circumferential stress components applied to the center of the bulging specimen, respectively. Biaxial stress-strain curves are successfully measured for every linear stress path at a nearly constant logarithmic strain rate of $1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$. The experimental results of the LDPE subjected to repeated loading-unloading are described. The plastic strain is obtained as the permanent strain after unloading. The contours of equal plastic work plotted in the principal stress space show significant anisotropy of the test material. A method of material modeling using an anisotropic yield function is also presented.

Chapter 4 describes the experimental results of a thermoplastic elastomer (TPE, manufactured by Toyobo Co., Ltd.) subjected to monotonic loading and repeated loading-unloading with linear stress paths. For the former, the plastic strain is obtained by subtracting the elastic strain from the total strain. For the latter, the plastic strain is obtained as the permanent strain after unloading. The true stress-plastic strain curves measured using the two testing methods were found to almost coincide with each other. Finally, from the observed ss curves, we propose a material model that can reproducer the deformation behavior of the test sample under biaxial stress states.

Chapter 5 summarizes the concluding remarks of the present study.