

氏名	うんりんいん ゆみこ 雲林院 悠美子
学位(専攻分野)	博士(工学)
学位記番号	博甲第881号
学位授与の日付	平成30年3月26日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
研究科・専攻	工芸科学研究科 先端ファイブ科学専攻
学位論文題目	熱可塑性エラストマーの大変形挙動の研究
審査委員	(主査)教授 横山敦士 教授 鋤柄佐千子 教授 西村寛之

論文内容の要旨

昨今の金属代替として高分子材料が広まる中、特に衝撃吸収性が高い熱可塑性エラストマーは注目を集めている。このため熱可塑性エラストマーの大変形挙動について解明の重要性は増している。一方で高分子材料ではその大変形下で独特のネック等の不均等変形が生じ、さらには発熱の影響もあるなど複雑な現象を呈する。このためその評価は困難であり、定量的な評価技術を開発することが期待されている。

これまでネッキング現象や発熱が発生する箇所においては、従来の引張試験やひずみゲージによるひずみ計測法によって、真応カー真ひずみ曲線を取得してきた。しかし大変形の不均一な変形のため、真ひずみを正確に測定することができなかった。またひずみゲージなどにおいては装置が試験片に直接に接触することから測定精度の課題をもたらしており、測定技術の進歩が必要とされている。

本論文では、熱可塑性エラストマーの成形品において、デジタル画像相関法(Digital Image Correlation:以下DIC)とサーモグラフィックカメラを用い真応カー真ひずみ関係と大変形領域の発熱を観測し、熱可塑性エラストマー(以下TPC)の大変形時の力学特性を評価・考察を行っている。この測定方法により、TPCの引張試験において、ネッキング現象の発生時およびその進展時におけるひずみ計測を行い、TPCの真応カー真ひずみ曲線を非接触に得ることを試みている。これらの測定技術により真ひずみと温度の関係を精度よく考察することを可能とした。従来では難しかった発熱の影響を分離して検討することが可能となった。これにより、ひずみ速度による影響のみを受ける微小変形領域について、真ひずみ速度と降伏応力の関係を把握することを可能としている。

さらに、高分子材料の大変形挙動を表現しうる数値解析法を開発することを行っている。デジタル画像相関法とサーモグラフィックカメラによる同時計測によりネック箇所の真ひずみと温度の関係を捉え、有用な測定から得られるパラメータとして熱の拡散、弾性域のエネルギー、TPCの内部構造等が総合的に影響する発熱交換効率 β を取り入れることができた。またこの値より、構成則の一部を実験値に基づいたパラメータで置き換える手法を構築している。これにより工学的にも汎用性のある発熱を伴う高分子材料のモデリングの簡便化を構築できることを示している。この手法は、実験値に基づいたパラメータとして発熱交換効率 β と温度依存の弾性率、塑性ひず

み一応力曲面を有限要素法で既存の速度依存性の構成則、金属塑性の構成則とを組み合わせること
で構築可能である。この実験計測を用いた数値解析を用いてハニカム材のひずみ速度や発熱を
考慮可能な衝撃解析に応用し、その有効性を確認している。本論文は以上の成果をまとめたもの
で5章および緒論と結論から構成され、以下に各章の概要を示す。

第1章では、本研究に至る背景および目的について述べている。高分子材料を用いた製品設計
と課題、評価方法における課題を挙げている。特に熱可塑性エラストマーにおける製品設計と課
題、評価方法の課題をあげ、本研究の背景、目的について示している。

第2章では、2種類のソフトセグメントとハードセグメントの配合を持つ熱可塑性エラストマ
ーのネック部のひずみ速度依存性について検討し、ネッキング部の真応力-真ひずみ関係、ひず
み速度分布状態、降伏応力の非線形性と内部構造の変化による影響を明らかにしている。またひ
ずみ1以上の大変形領域ではひずみ速度依存モデルのみでは表現できない現象が存在することを
明らかにしている。

第3章では、第2章で述べたひずみ速度依存性について、内部構造の変化が力学特性に与える
影響について Eyring の速度過程を用いた検証を行っている。また引張速度-降伏応力の温度依
存性についても調べており、2つの緩和時間の異なるメカニズムが力学特性に与える影響を明ら
かにしている。

第4章では、DIC とサーモトレーサの同時測定法を用いることにより、試験片の局所的な真ひ
ずみと温度の関係を正確に測定することが可能となり、ひずみ1付近から引張速度による真応力
-真ひずみ関係の上下関係の入れ替りが確認された。塑性ひずみ増加に伴い熱交換効率が上がり、
その後、放熱等の影響を受け温度低下すると考えられる。また本測定によって、ネック現象を議
論する場合には熱交換効率 β が有用であることを明らかにしている。

第5章では、第4章で精度化した発熱交換効率 β と実験値で構成則の一部を置き換えた手法を
構築している。これにより引張速度に応じた温度上昇傾向を再現できており、また大変形側の発
熱が生じる領域において、速度に応じた真応力-真ひずみ関係を定性的に再現できた。大変形時
の発熱現象と力学挙動を考慮した検討手法として、本手法の妥当性を確認している。発熱と配向
結晶化等をダイレクトに切り分けて扱うことは難しく、今回取り入れた β で発熱を考慮すること
で的確に発熱現象を取り込んだ設計へと活かせる手法を提示し、熱可塑性エラストマーの内部発
熱現象について詳細に考察している。

第6章では第2章、3章でのひずみ速度を検討した結果と、第4章、5章でひずみと発熱の関
係を検討した結果を踏まえて、製品設計の応用に関する検討結果と考察を行っている。本章では、
バンパーの衝撃緩衝材として想定されるハニカム成形品の落錘試験時の力学特性の評価を行い、
その有効性を確認している。

第7章では、各章で得られた知見をまとめ、結論として本研究の成果を統括し今後の展望をま
とめ、本論文における結びとしている。

論文審査の結果の要旨

熱可塑性エラストマーの製品設計において、ひずみ速度依存性や発熱の影響を考慮することは
重要な課題である。

しかしながら、金属材料はじめ、より構造の複雑な樹脂においては、大変形時の挙動においても不明な点が多く、ひずみ速度のよる内部構造への影響やそれらによって返される力学挙動への影響を考慮することは困難である。これらの困難さを生み出す原因として、大変形時に発生するネッキングなどの不安定現象や内部発熱による影響がある。これらの現象に関する観測と解明を含め設計に活かす手段を探し当てることが本論文の主眼である。

研究の結果、熱可塑性エラストマーに関するネック発生時の測定方法についてデジタル画像相関法を用いた直接的なひずみ計測を行うことで、局所変形部分のひずみ状態を把握することが可能になった。熱可塑性エラストマーの体積一定仮定の妥当性と材料によっては、体積変化を考慮する必要があり、またひずみ速度には分布があることが提示されていた。これらの成果は、高分子材料の大変形挙動を精密に測定できる可能性がある手法として高く評価された。

また、熱可塑性エラストマーの内部構造の変化がひずみ速度依存性などの力学特性に及ぼす影響について詳細に検討した結果、ハードセグメントとソフトセグメントの組成比が異なる高分子の引張速度と内部構造の変化について力学挙動から相違を明確にしておき、さらには発熱の影響についても検討を行って、その詳細な検討結果は高分子材料の大変形挙動の解明に有用であることが評価された。

本論文の成果を実際の高分子製品の設計に適応すれば、これまで未着手であった衝撃を生じる場合のひずみ速度依存性や発熱の影響を予測した設計への展開が期待できる。このような手法は従来確定されておらず、本手法を構築した意義は大きいと考えられ、工業的にも意義深いところが高く評価された。

本研究をまとめるに当たり基礎となったレフェリー制のある雑誌に掲載された（掲載決定済、印刷中を含む）3報の論文を下記に示す。

(1) Isogai Yumiko, Yokoyama Atsushi, Nguyen Thi Thanh Binh, Sumiyama Takuya,

Kenji Furuichi, Nonomura Chisato

Deformation behavior of thermoplastic elastomer specimens:

Observation of the strain behavior in a wide range of tensile speeds

Polymer Engineering & Science, Article DOI:10.1002/pen.24792, in press.

(2) 磯貝悠美子、和田将宜、横山敦士、村田真伸、住山琢哉、古市謙次、野々村千里

熱可塑性エラストマーの大変形挙動—デジタル画像相関法とサーモグラフィックカメラの同時計測による真ひずみと温度の観測—

プラスチック成形加工学会誌「成形加工」に掲載決定済

(3) 磯貝悠美子、古市謙次、住山琢哉、山下勝久、野々村千里

熱可塑性ポリエステルエラストマー成形品の変形挙動

—ハニカム型成形品の圧縮変形解析—

プラスチック成形加工学会誌「成形加工」第29巻第5号 2017、p.167-173

※上記論文にある磯貝悠美子（Yumiko Isogai）は、申請者雲林院悠美子（Yumiko Unrinin）と同一人である。

上記3編はすべて申請者が筆頭著者である。以上の結果より、本論文の内容には十分な新規性と独創性ならびに高い学術的な価値があることを全審査員が認めた。