

高分子材料の成形加工における数値解析

| | |
|-------|---|
| メタデータ | 言語: jpn 出版者: 公開日: 2017-10-05 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: メールアドレス: 所属: |
| URL | http://hdl.handle.net/2297/16626 |

| | |
|------------|--|
| 氏名 | 山下 勝久 |
| 生年月日 | |
| 本籍 | 大阪府 |
| 学位の種類 | 博士(工学) |
| 学位記番号 | 博甲第 617 号 |
| 学位授与の日付 | 平成 16 年 3 月 25 日 |
| 学位授与の要件 | 課程博士(学位規則第 4 条第 1 項) |
| 学位授与の題目 | 高分子材料の成形加工における数値解析 |
| 論文審査委員(主査) | 山田 敏郎(工学部・教授) |
| 論文審査委員(副査) | 内山 吉隆(工学部・教授) 元井 正敏(工学部・教授) 金井 俊孝(自然科学研究科・教授) 石原 伸英(自然科学研究科・教授) |

学 位 論 文 要 旨

A numerical analysis of large deformation behavior under tensile and compressive loadings in injection moldings has been studied. This paper examines the factor controlling the formation and propagation of neck in poly(ethylene terephthalate) (PET) film and poly(butylene terephthalate) (PBT) molding under tensile loading. Tensile tests were used to investigate the load-displacement and deformation behavior of PBT and the accompanying changes in surface temperature. In parallel with this experimental study, a numerical model was developed for the deformation of PBT moldings and neck formation under tensile loading and analyzed using finite element method (FEM) by adapting an elastic-plastic model at stable temperature. The elastic-plastic model was confirmed to agree with the calculation of PET film in the behavior of the neck formation. The load-displacement behavior calculated using FEM could be approximated to experimental data in the region until the neck formation occurred. Furthermore, the dependence of neck formation on strain rate is related to the plastic instability, as demonstrated by the numerical results, and does not depend upon heating effects.

Next, the buckling behavior under compressive loading in the cylindrical moldings in thermoplastic polyester elastomer was investigated. The buckling and compressive behavior could be controlled by dimension of the cylindrical inside and outside diameters. The load-displacement behavior calculated using FEM by adapting an elastic-plastic model and considering the contact boundary condition could be approximated to experimental data.

In addition, the anisotropic properties and the warpage behavior of injection moldings in glass fiber reinforced polyamide 6 were investigated. The experimental results, which examined fiber orientation and thermal expansion coefficient in moldings, indicated symmetrical three-layer structure (skin/core/skin). The warpage behavior was calculated using FEM by adapting a laminate model of three layers from experimental results. In numerical analysis, Jeffery's law fiber orientation model was considered. The numerical results showed agreement with experimental data.

高分子材料における数値解析の研究は、成形加工や製品設計の最適化を目的にプラスチック関連の業界において、近年目覚しく発展している。これまでの研究では、合成繊維における紡糸・延伸工程が単軸問題として、フィルム、シートにおける製膜工程が平面問題として、射出成形、押出成形、ブロー成形における金型、スクリーン、ダイス、パリソンなどの樹脂流動や成形品の変形の問題が三次元問題や擬似的な三次元問題として、各々の検討課題に応じたモデル化が提案されてきた。また、材料のモデル化の方法としては、対象物の受ける負荷の量、速度、時間などの要因や、また、対象物の有する内部構造の方向性、規則性などによって、弾性則、弾塑性則、粘弾性則、クリープ則などの構成則や、また、等方性、直交異方性、積層構造などの数値解析のモデルが多様に提案されてきた。

しかし、高分子材料の変形挙動を対象とした数値解析は、負荷時における大ひずみや大変形などによる幾何学的非線形、材料的非線形の問題や、加工時における熱履歴や配向性などによる非等質性や異方性の問題があり、高精度の解を獲得することが困難な場合も多い。特に大変形領域における伸長時のネッキング挙動や圧縮時の座屈挙動で発現する不均一性変形や、成形時の繊維配向挙動や不均一収縮挙動で発現するそり変形の現象などがこれらの一例として挙げられる。このため、従来の数値解析では、工業分野における製品設計や生産方法の検討に応用できる解析精度が得られない場合が多く、実際の現象を精度良く再現できる数値解析の技術の確立が望まれてきた。

本論文では、射出成形品の大変形領域における変形挙動を対象として、有限要素法を用いた数値解析について検討した。実験解析に基づいて、対象物のモデル化方法と材料の構成則を検討し、実際に生じた変形挙動を数値解析で再現を試みることで、対象とした現象のメカニズムや原因について考察を行った。また、数値解析結果と実験結果の比較により、本論文で提言した数値解析の妥当性を確認した。本論文の内容は、基礎検討としてプラスチックフィルムの一軸伸長におけるネッキング挙動を対象に、平面応力問題を仮定した有限要素法によって再現を試みた。材料の温度変化が無いことを仮定して、構成則に弾塑性モデルを定義した結果、数値解析は、フィルムのネッキング挙動やネック伝ば挙動を近似的に再現することを確認した。なお、本論文で想定したフィルムは、

ポリエチレンテレフタレート (PET) である。次に、上記の数値解析を三次元問題に発展させて、射出成形品の変形問題に応用した。一軸伸長におけるネッキング挙動と圧縮変形時における座屈挙動について再現を試みた結果、数値解析は、いずれも実際の変形挙動や荷重-変位関係を近似的に再現することを確認した。また、射出成形品において成形加工時に生じるそり変形挙動の問題を対象とする数値解析方法について検討した。成形品に存在する繊維配向や異方性特性を実験解析に基づいてモデル化した結果、数値解析は、実際の成形品に生じたそり変形挙動の傾向と一致することを確認した。なお、射出成形品で対象とした素材は、一軸伸長挙動では、ポリブチレンテレフタレート (PBT)、座屈挙動では、ポリエステル系の熱可塑性エラストマー、そり変形挙動では、ガラス繊維強化のポリアミド (PA) を用い、工業分野で幅広く使用されるプラスチックについて研究を進めた。以下に、その内容を示す。

(1) 一軸伸長におけるネッキング挙動解析

PETフィルムなどの一軸伸長において、塑性変形以上のひずみを与えた場合に発生するネッキングやネック伝ばなどの不均一な局所変形について、有限要素法を用いた数値解析によって、その変形挙動の再現を試みた。ネッキング現象の一例として、引張試験において、ネック伝ばが発現したサンプルを Fig.1 に、その時の公称応力-公称ひずみの関係を Fig.2 に示す。

数値解析では、平面応力問題を定義した有限要素法において、等温断熱を仮定する弾塑性構成則を検討した。その結果、実際のフィルムで発現したネッキングやネック伝ばの現象を近似的に再現することができた。ネッキングが発生した構成則を Fig.3 に、そのときの荷重-変位関係の解析結果を Fig.4 に示す。そして、数値解析結果から、ネッキングの発生は、降伏応力と降伏後の硬化係数に影響することを確認した。また、ネック伝ばの発生は、塑性領域の硬化係数に影響することを確認した。しかし、数値解析のネック伝ば後における変形状態は、実際の変形と詳細には一致しておらず、解析方法の改良を次項で試みた。

(2) PBT射出成形品の一軸伸長における変形解析

PBT射出成形品の一軸伸長における変形挙動は、前述のPETフィルムと異なり、降伏直後に発生せず均一な塑性変形がある程度進展した後にネッキングが発生する。この特徴的な挙動について、荷重-変位関係と成形品の温度変化の同時計測による実験解析を行った。そして、本論文で仮定した等温の弾塑性構成則を応用した数値解析を行い、ひずみ速度依存の挙動とそのメカニズムについて考察した。一例として、ダンベル型引張試験片 (ISO3167:1993(E)、チャック間距離 114mm、標線間距離 80mm、厚さ 4mm) の引張試験時における荷重-変位関係と温度変化の実験結果を Fig.5 に示す。

実験結果から、荷重—変位関係は変形初期段階において弾性領域となり、そして、見掛け上の降伏点の後に荷重が減少した。そして、ネッキングが発生して荷重が著しく減少し、その後、ネック伝ばの発生では荷重がほぼ一定値になった。このときの試験片の温度は、ネッキングが開始するまで変化せずほぼ一定で、ネッキングの開始と同時に延伸発熱が発生した。その後、ネック伝ばの状態において、ネック部の温度が最大になり、ほぼ同じ温度で推移した。この荷重—変位関係の挙動は、本論文で検討した平均のひずみ速度が $1.45 \times 10^{-4} \sim 7.25 \times 10^{-3} \text{s}^{-1}$ の領域で全て観察された。また、荷重—変位関係は、Fig.6 に示すようにひずみ速度の増加に伴って、降伏応力が増加し、ネッキングを起こす変形量が減少する挙動を確認した。その時の温度変化は、Fig.7 に示すようにひずみ速度の増加に伴って、ネッキング時の温度が上昇する挙動を確認した。

数値解析では、ネッキングの開始までの変形挙動を対象に前項の弾塑性構成則を応用して、下式に示す n 乗硬化則を利用した新規の構成則を考案した。そして、ひずみ速度に依存するネッキング挙動を、降伏応力 σ_y^* の相違によって、数値解析で再現することを検討した。

$$\sigma = \sigma_y^* + K \varepsilon^n \quad (1)$$

ここで、 n はひずみ硬化係数、 K は材料定数、 ε は塑性ひずみであり、ひずみ硬化係数を各条件で同じ値で定義した。なお、有限要素法のモデルはソリッド要素を使用した。

ネッキング時の変形状態における数値解析と実験結果の比較を Fig.8 に示す。図のように数値解析は、実験結果と一致した。そして、荷重—変位関係は、Fig.9 に示すように降伏応力の増加によりネッキングを起こす変形量が低下しており、数値解析において実験結果と同じ傾向が再現された。以上から、本論文の数値解析は、PBT成形品のネッキング挙動を近似的に表現することを確認した。また、数値解析結果から、ネッキングの起点における塑性ひずみは、Fig.10 に示すようにネッキングの開始に伴って著しく増加し、全体のひずみ速度に対し、約20倍の増幅となった。PBT成形品の一軸伸長による発熱は、ネッキングによる急激な塑性ひずみの増加が影響することを確認し、その力学的なメカニズムを解明した。

(3) プラスチック成形品の圧縮挙動における数値解析

熱可塑性エラストマー射出成形品の圧縮変形における荷重—変位関係、および、座屈挙動について、成形品の形状との関係を検討した。本論文で対象とした熱可塑性エラストマーは、ポリエステル系エラストマーであり、ハードセグメントにPBT、ソフトセグメントにポリテトラメチルグリコール (PTMG) から構成されるブロック共重合体である。ソフトセグメントにPTMGを有す

ることから、座屈が発生する大変形領域の圧縮変形に対しても、材料破壊が起これない。このため、前項で仮定した弾塑性構成則の数値解析を応用し、圧縮時の変形挙動や荷重—変位関係について検討を行った。フランジ部を有する円筒中空型成形品を使用して、圧縮試験を行った結果、成形品の荷重—変位関係は、その形状により制御できることを確認した。また、衝撃吸収能を効率的に高めるには、円筒側面部の形状を荷重方向に対して非対称で設計することが有効であることを確認した。

数値解析では、軸対称要素を用いた有限要素法を用いて、実際の圧縮試験と比較した。その結果、実際の荷重—変位関係や変形挙動を近似できることを確認した。また、これらの結果から、実験から確認が困難な成形品内部の変形挙動について予測を行い、成形品の座屈挙動や荷重—変位関係について考察した。本論文で検討した成形品の一例として、実験結果と解析結果の変形挙動の比較を Fig.11 に、荷重—変位関係の比較を Fig.12 に示す。

(4) プラスチック成形品のそり変形挙動における数値解析

ガラス繊維強化のプラスチック射出成形品を対象に、樹脂中に配合されたガラス繊維の配向挙動と成形品のそり変形の関係について、実験解析を行った。実験では、ガラス繊維の重量分率の異なる樹脂と肉厚の異なる成形品を用いて、断面のガラス繊維の観察と線膨張係数の計測による力学特性の異方性について、分析した。その結果、ガラス繊維の配向は、Fig.13 に示すようなスキン／コア／スキンの対称的な三層構造を有しており、各層の厚みにおいて、ガラス繊維重量分率と成形品の肉厚に依存性があることを確認した。また、成形品の線膨張係数の異方性も、同様に、ガラス繊維重量分率と成形品の肉厚に依存性があることを確認した。そして、そり変形の成形実験を行い、成形品の肉厚の依存性を確認した。

そして、その結果を応用して、樹脂流動解析、繊維配向解析、弾性線形応力解析を複合した連成の数値解析を新たに開発した。なお、樹脂流動解析では、Hele-Shaw 流れの理論、繊維配向解析では、Jeffery の理論を用いた。そして、熱応力解析では、先に示した実験結果に基づいて、三層構造分布を仮定したモデル化を行った。実験結果から判明したガラス繊維の層構造を積層理論に基づいてモデル化した結果、数値解析は、実際のそり変形挙動を定性的に再現することを確認した。そして、ガラス強化樹脂を使用した射出成形品の肉厚に依存するそり変形挙動について解明した。本論文で検討した成形品のスキン層とコア層における繊維配向の数値解析結果を Fig.14 に、その時のそり変形の状態を Fig.15 に示す。

本論文では、プラスチック射出成形品の大変形領域におけるネッキングや座屈の不均一変形を予測する方法として、等温均質の弾塑性構成則を仮定した数

値解析を提言した。また、ガラス強化樹脂の射出成形品におけるそり変形挙動を予測する方法として、積層構造を仮定した数値解析を提言した。これらの解析方法は、限定条件下において実際の変形挙動を近似的に表現できることを確認したが、さらに高精度の予測結果を得るためには、残された課題も多く存在している。しかし、プラスチック射出成形品の巨視的な変形挙動をモデル化して、工業的な問題を論じた本論文の研究は、実際の成形品に対する数値解析の実用化に向けた一つのアプローチとして意義があると考えられる。

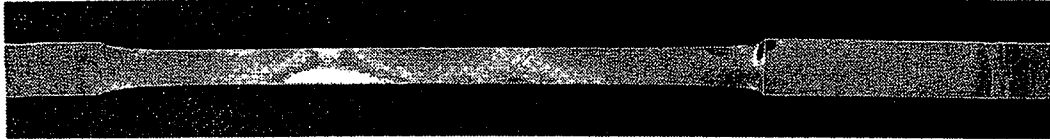


Fig. 1 Photograph of necked PET film.

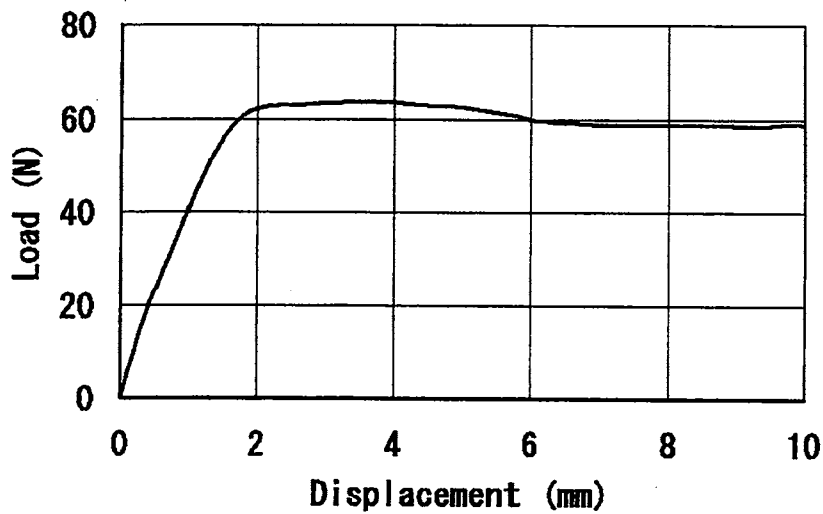


Fig. 2 Load - displacement diagram in experiment.

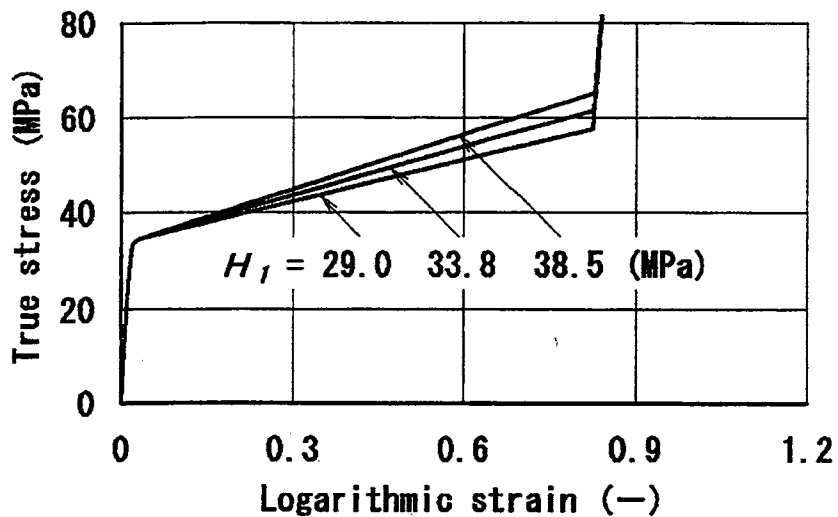


Fig. 3 Uniaxial true stress - logarithmic strain diagrams.

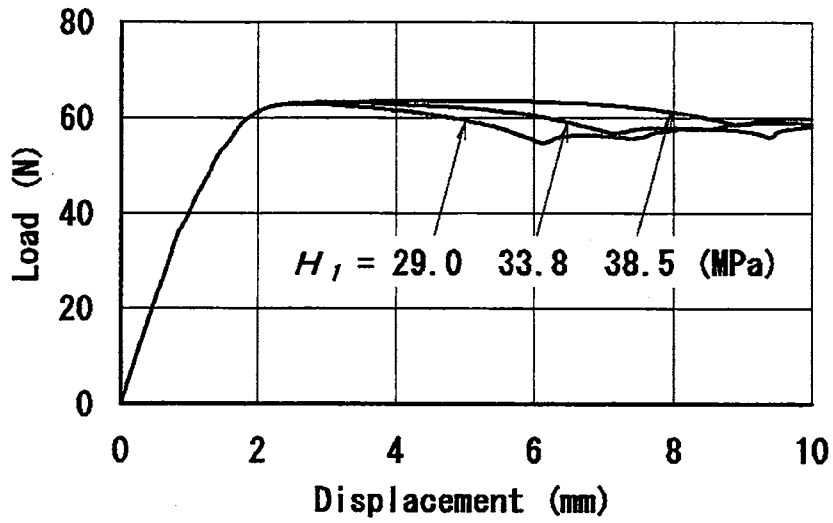


Fig. 4 Load - displacement diagrams by FEM with varying tangent modulus.

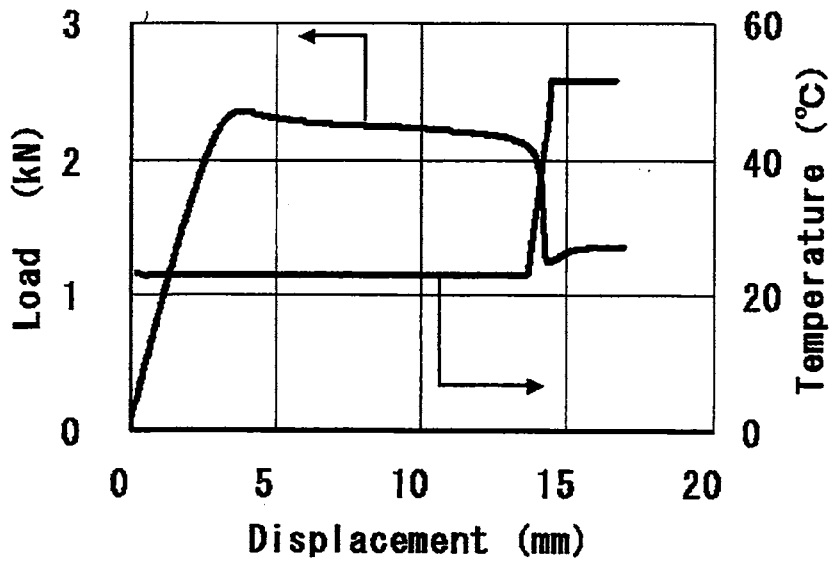


Fig. 5 Experimental results for load - displacement and temperature - displacement diagrams.

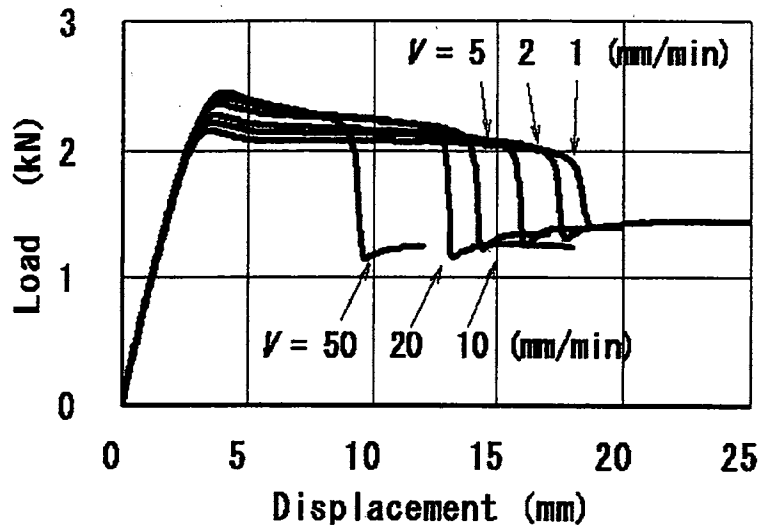


Fig. 6 Experimental results for load - displacement diagrams with varying crosshead speed.

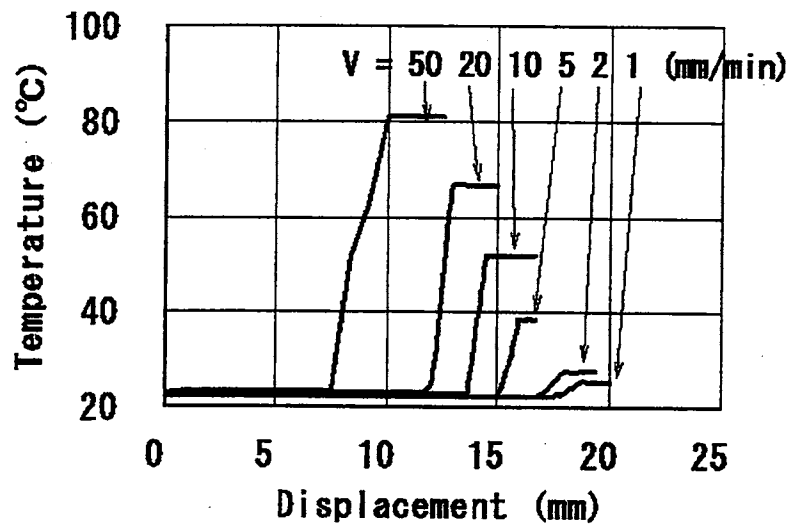
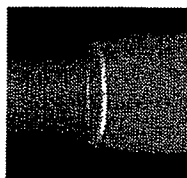
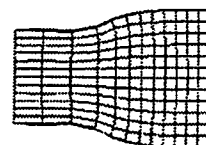


Fig. 7 Relationship between displacement and temperature with varying crosshead speed.



Photograph of necked PBT molding



Deformation diagram by FEM

Fig. 8 Comparison of deformation diagrams at necked region between experiment and FEM.

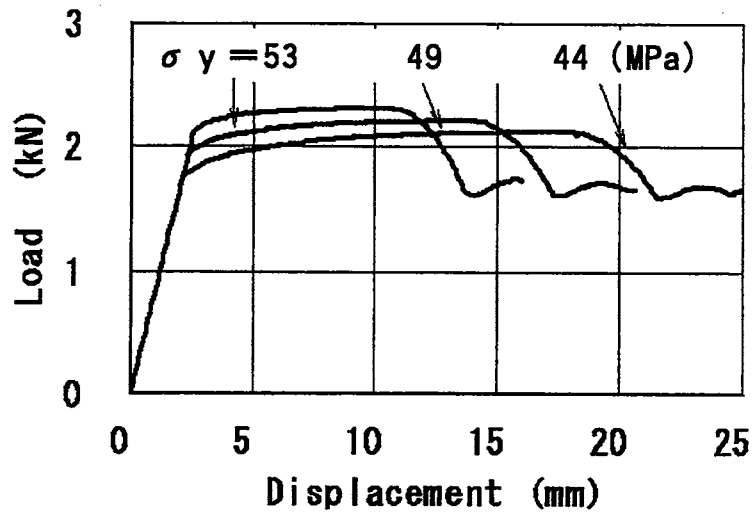


Fig. 9 Numerical results for load - displacement diagrams with varying yield stress.

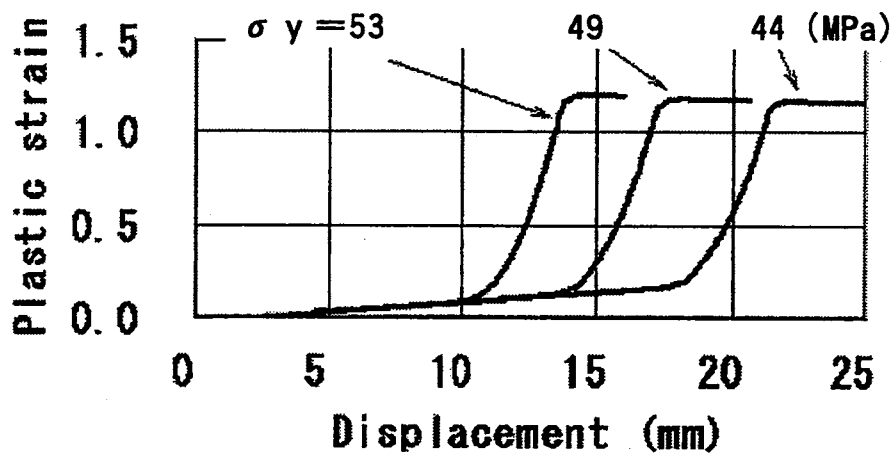


Fig. 10 Relationship between plastic strain and displacement by FEM with varying yield stress.

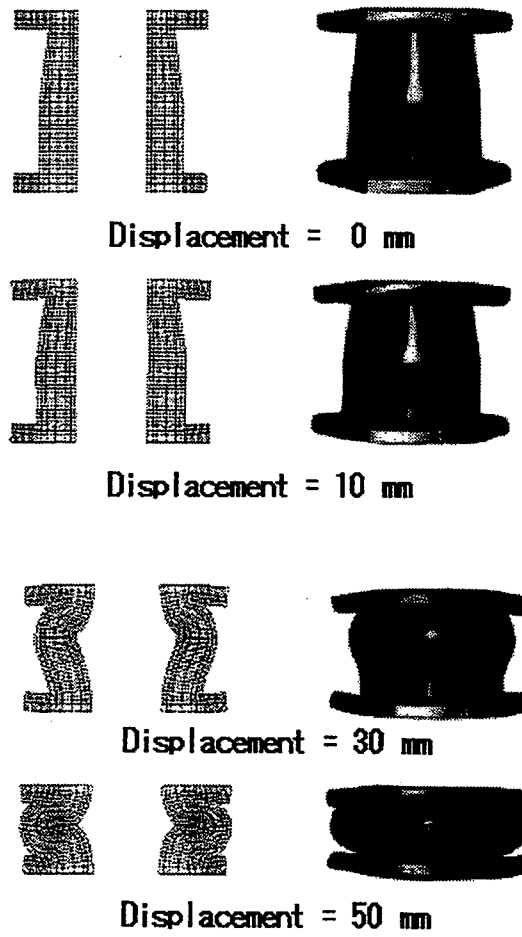


Fig. 11 Deformation diagrams and photographs of cylindrical moldings.

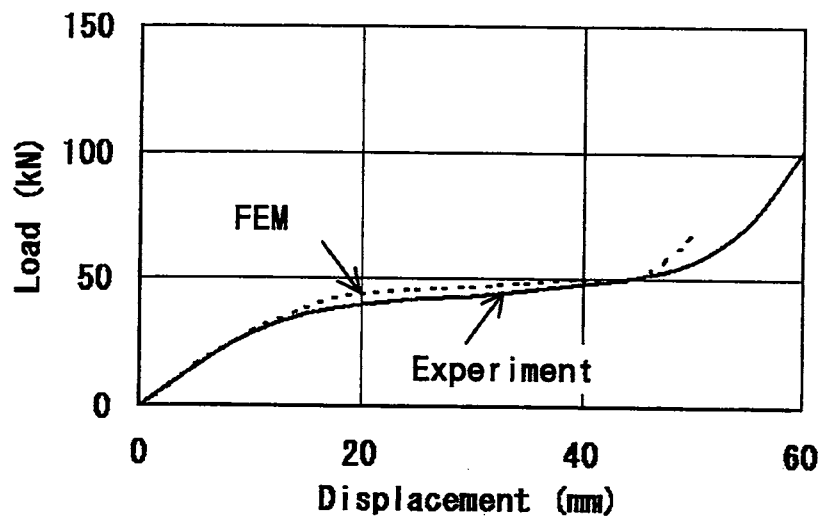


Fig. 12 Load - Displacement diagram.

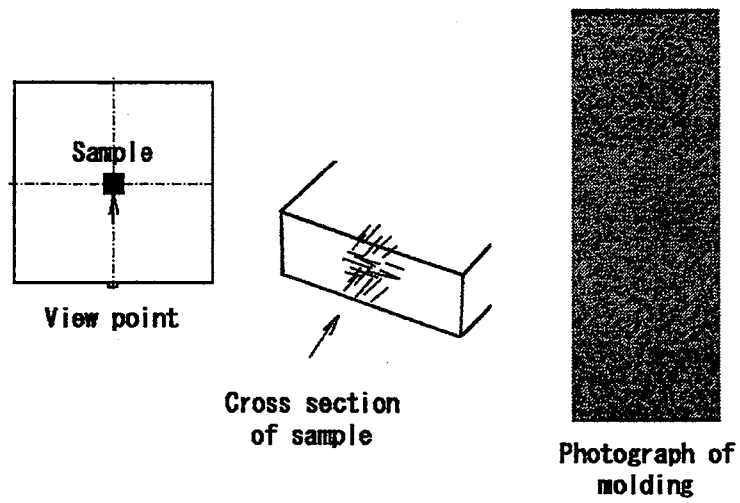


Fig. 13 Schematic diagram in cross section of molding.

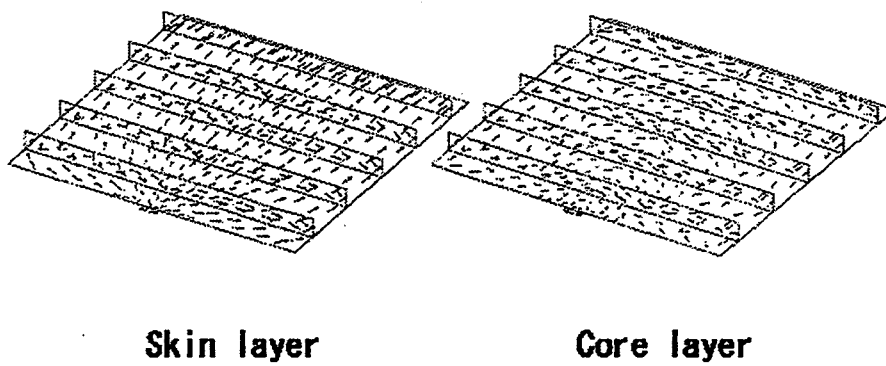


Fig. 14 Numerical results for glass fiber orientation in skin and core layers.

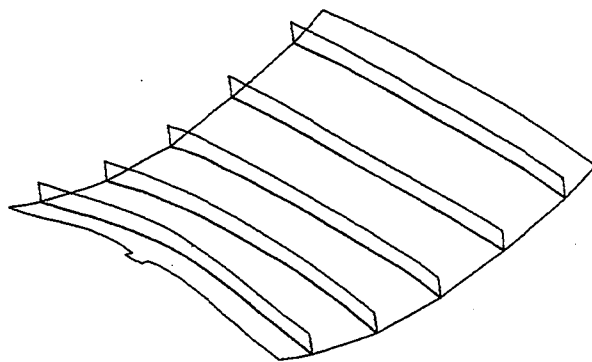


Fig. 15 Numerical results for warpage deformation.

学位論文審査結果の要旨

山下氏より提出された学位論文に関して、各審査委員によって個別に審査を行うと共に、平成16年1月27日に開催された口頭発表の結果を踏まえて、同日に論文審査委員会を開催して協議を行った。その結果、以下のように判定した。

高分子材料における変形挙動の数値解析は、幾何学的非線形性、材料非線形性、異方性、不均一性などを考慮する必要があり、高精度の近似解を獲得することが困難な場合が多い。本論文では、ポリブチレンテレフタレートおよびポリエステル系熱可塑性エラストマーを使用した射出成形品を対象に、大変形領域で発生するネッキング挙動および座屈挙動について、弾塑性理論を応用した独自の数値解析手法を提案し、高精度の解析技術を確率している。その解析技術を用いて、著しい非線形性を示す変形挙動のメカニズムを解明し、射出成形品における変形挙動の制御方法および最適設計を提言している。さらに、ガラス強化樹脂を使用した射出成形品におけるそり変形挙動の数値解析についても研究し、実験解析からガラス繊維の配向挙動における層構造の形状依存性を見出し、実際の挙動を反映した斬新な積層構造モデルを確立している。その積層構造モデルを用いた数値解析により、成形品のそり変形挙動を精度良く予測することが可能となり、ガラス強化樹脂のそり変形挙動のメカニズム解明が可能となった。以上の成果は、学術面のみならず、射出成形品の製品設計および生産技術に対する重要な指針を与え、当該研究分野の発展に大きく寄与するものである。従って、本論文は博士（工学）の学位に値するものと判断する。