

プラスチック成形品のネック伝ば解析(1)

—ポリブチレンテレフタレート成形品のネック伝ば挙動—

野々村千里^{*1}・山下勝久^{*1}・丹下章男^{*1}
上辻靖智^{*2}・横山敦士^{*3}・山田敏郎^{*4}

Analysis for Neck Propagation of Plastic Molding(1)

—Neck Propagation Behavior of Polybutylene Terephthalate Molding—

Nonomura, Chisato^{*1}/Yamashita, Katsuhisa^{*1}/Tange, Akio^{*1}
Uetsuji, Yasutomo^{*2}/Yokoyama, Atsushi^{*3}/Yamada, Toshiro^{*4}

The neck formation and neck propagation behavior of plastic moldings are very complicated and one of the most important subjects in the field of polymer processing. In this paper, we report our results on the necking and neck propagation behavior for Polybutylene terephthalate (PBT) in uniaxial tension tests. In addition, a numerical model for PBT molding has been developed, and the neck propagation behavior under tensile load has been analyzed by the finite element method (FEM). By comparing numerical results with experimental ones, it could be confirmed that necking initiates and propagates after the specimen undergoes uniform plastic deformation. The effect of strain rate on load-displacement behavior has also been studied in uniaxial tensile tests. Furthermore, a constitutive relationship at low strain rates, which can be used to estimate the actual load-displacement behavior, could be obtained by FEM.

Key words : Neck propagation/PBT molding/Finite element method/Strain rate/
Load-displacement behavior

1. 緒 言

高分子材料のネックングやネック伝ば現象等に代表される不均一変形挙動については、従来より多くの研究者によって報告されている。その中で、繊維状、あるいは、シート状の成形物を対象にしたネック伝ば現象を数値解析で再現しようとする試みが、Nealeら^{1)~4)}、G'Sellら^{5),6)}、Fagerら⁷⁾、Nimmer^{8),9)}によって報告されている。著者らも、高分子材料に特有のネックングやネック伝ば現象を対象とし、

シート状試験片の荷重-変位関係や、幅方向および厚み方向の変形挙動の詳細について、有限要素法による数値解析によって再現することを試み^{10),11)}、さらに、数値解析により推定される試験片の荷重-変位関係やネック伝ば時の試験片の外形変化について、ポリエチレンテレフタレート(以下、PETと略す)フィルムを対象とした実験結果と数値解析結果との詳細な比較を試みた¹²⁾。その結果、ネックングやネック伝ば現象の発生メカニズムを定性的に明らかにし、実測の荷重-変位関係を再現するPETフィルムの見掛け上の構成則についての一考察を行ってきた。

PET樹脂以外のネック伝ば挙動についても、多くの研究者によって報告されている。その中で、ポリブチレンテレフタレート(以下、PBTと略す)成形品を対象とし、ネック伝ば現象について実験解析を行ったNiedら^{13),14)}の報告がある。この報告では、実験による荷重-変位関係の温度依存性等についての考察が行われているが、変形挙動の詳細な観察やひずみ速度依存性、さらに、数値解析によるPBT成形品に特有の構成則に関する検討にまでは至っていない。

また、PBT樹脂の基本特性に関する研究についても、これまでに多くの研究者によって報告されている。数値解析によって樹脂の変形挙動を推定し、その構成則を議論する際には、基本となる前述のような力学的特性^{13),14)}以外に

^{*1} 東洋紡績(株)総合研究所

大津市堅田2-1-1 (〒520-0292)

TOYOBO Co., Ltd. Research Center

2-1-1, Katata, Ohtsu 520-0292, Japan

^{*2} 京都工芸繊維大学大学院ベンチャー・ラボラトリー

京都市左京区松ヶ崎御所海道町 (〒606-8585)

Kyoto Institute of Technology, Venture Laboratory

Goshokaido-cho, Matsugasaki, Sakyo-ku, Kyoto 606-8585, Japan

^{*3} 京都工芸繊維大学大学院工学科学研究科

京都市左京区松ヶ崎御所海道町 (〒606-8585)

Kyoto Institute of Technology, Graduate School of Science and Technology

Goshokaido-cho, Matsugasaki, Sakyo-ku, Kyoto 606-8585, Japan

^{*4} 金沢大学工学部物質化学工学科

金沢市小立野2-40-20 (〒920-8667)

Kanazawa University, Faculty of Engineering

2-40-20 Kodatsuno, Kanazawa 920-8667, Japan

2000.9.26 受理

も、構成則の温度依存性（熱伝導解析を含む）を議論するための物理的・熱的特性^{15), 16)}や、変形時の配向・結晶化による構成則への影響を議論するための結晶構造・結晶化特性^{15), 17), 18), 19)}を考慮することも重要となる。しかし、このような基本特性と構成則との関係を詳細に考察した内容については、ほとんど報告されていないのが現状である。

本報では、降伏直後にネッキングおよびネック伝ば現象を起こすPETフィルムとは異なる材料として、PBT成形品を対象とした引張試験により、荷重-変位関係や変形挙動について詳細に検討し、基本となる力学的特性の第一段階の考察を行った。また、マクロな観点からのアプローチとして、PBT成形品のネッキングやネック伝ば現象をとまう大変形挙動について、有限要素法による数値解析を適用することを試みた。さらに、構成則（降伏直後の接線係数の変化）の違いが、ネッキングおよびネック伝ば現象におよぼす影響についての検討を行い、PBT成形品の引張試験結果との詳細な比較を行った。以下、その結果について報告する。

2. 実験方法

2.1 引張試験片

PBT樹脂（東洋紡績製：EMC 700-01）を用いて、ダンベル型引張試験片（ISO 3167：1993(E)；全長170 mm，両端部の幅20 mm，平行部の長さ80 mm，平行部の幅10 mm，厚み4 mm，チャック間距離114 mm）を射出成形（樹脂温度：230℃，射出圧力：9.45 MPa）によって成形し、引張試験用の試験片を成形した。その試験片の寸法を図1に示す。

また、一部の試験片には、局所的な変形量を観察して、数値解析と詳細な変形挙動を比較するために、幅方向に5.0 mm×2.5 mm（長手方向×幅方向）の格子状の標線を記し、局所的な変形挙動を観察しながら引張試験を行った。

2.2 引張試験方法

引張試験機には、テンシロン UTM-1/5000 型（東洋精機製）を用いた。クロスヘッドスピード V を1~50 mm/min（ひずみ速度に換算すると、 $1.45 \times 10^{-4} \sim 7.25 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ ）の範囲内で変化させ、また、温度条件は室温（23℃）一定として引張試験を行った。これらの実験条件をまとめて表1に示す。

3. 実験結果

3.1 荷重-変位関係について

PBT成形品において、実験結果から得られる荷重-変位関係（ネック伝ば現象が安定して進行する変形中期段階

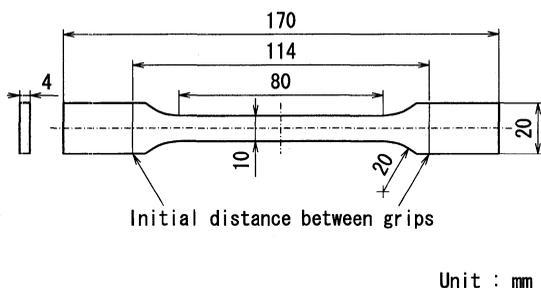


Fig. 1 Dimensions of test specimen

まで)について模式的に表わしたものを図2に示す。同図より、他の樹脂（例えば、ガラス転移点以下の低温域におけるPETフィルム¹²⁾の変形挙動等）で観察される荷重-変位関係とは大きく異なる。

変形初期段階は、荷重と変位の関係が比例的に変化する弾性領域が観察される。そして、降伏を起こした直後（b点）ではネッキングを起こさず、荷重増加の傾きはわずかに減少し、全体がほぼ均一に塑性変形を起こす領域Iが観察される。その後、荷重増加の傾きは大きく減少（c点）して、荷重は緩やかに増加する領域IIが観察される。この領域IIは、領域Iと同様に全体がほぼ均一に塑性変形を起こす領域である。そして、d点に変位量が到達すると荷重は急激に減少してネッキング現象（領域III）が進行する。その後、荷重は極小値（e点）をとり、わずかに荷重が増加する領域が観察され、荷重がほぼ一定値（f点）になると、ネック伝ば現象（領域IV）が開始し、その後、荷重はほぼ一定値でネック伝ば現象が安定に進行する。

引張試験において、 V を変化させた場合（1, 2, 5, 10, 20, 50 mm/min）の荷重-変位関係を図3に示す。なお、

Table 1 Testing conditions

Test material	Polybutylene terephthalate (PBT)
Shape of test specimen	ISO 3167:1993(E)
Initial distance between grips (mm)	114
Temperature (°C)	23 (Constant)
Crosshead speed V (mm/min)	1, 2, 5, 10, 20, 50

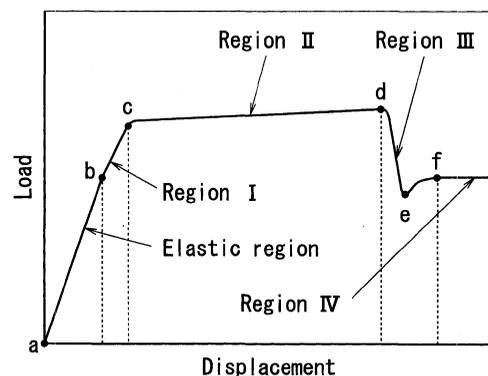


Fig. 2 Generalized load-displacement diagram

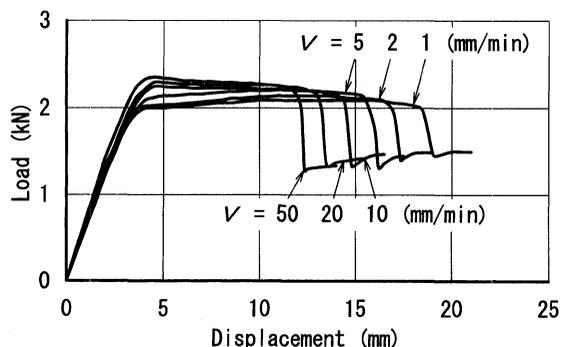


Fig. 3 Experimental result for load-displacement diagrams with varying crosshead speed

同図には、それぞれのクロスヘッドスピードにおいてネック伝ば現象が安定に進行しはじめる変位量までを示している。また、クロスヘッドスピードとヤング率（図3から算出される見掛けの剛性に相当する値をヤング率と定義）の関係を図4に、降伏応力（図3の変位量が約1.5mmにおける公称応力を降伏応力と定義）との関係を図5にそれぞれ示す。両図より、ひずみ速度の増加に対して、ヤング率、降伏応力については、わずかに増加する傾向が観察された。さらに、クロスヘッドスピードと図2におけるd~f点の変位量との関係を図6に、d~f点の荷重との関係を図7にそれぞれ示す。両図より、ひずみ速度の増加に対して、

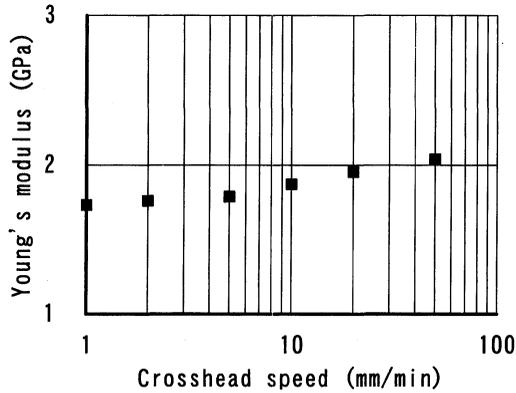


Fig. 4 Relation between Young's modulus and crosshead speed

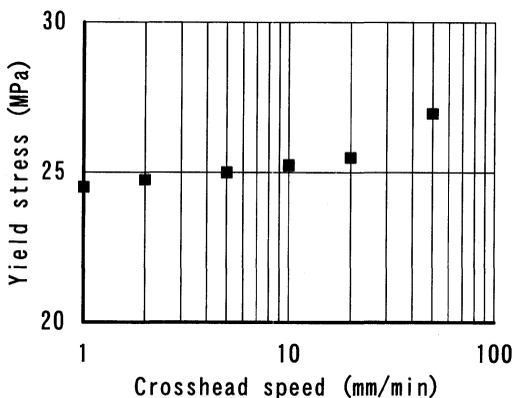


Fig. 5 Relation between yield stress and crosshead speed

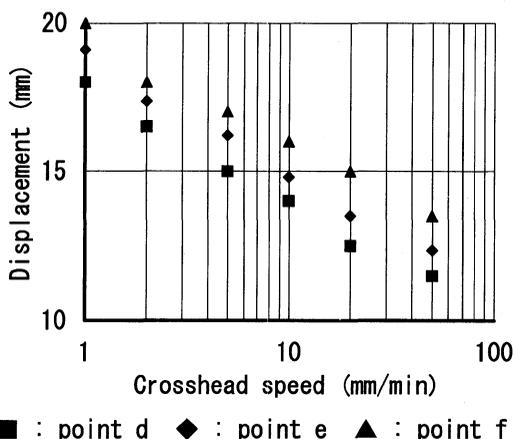


Fig. 6 Relation between displacement at points d, e, f and crosshead speed

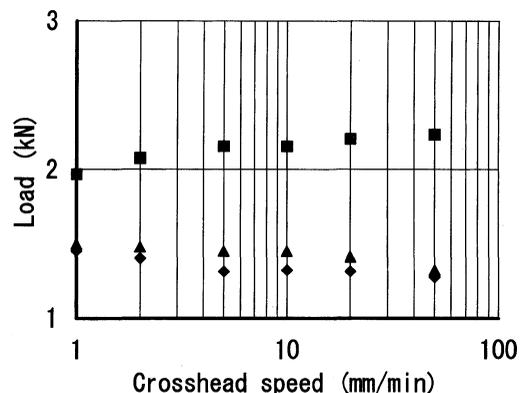
d~f点の変位量はそれぞれ減少し、また、d点の荷重は増加し、ef点の荷重はそれぞれ減少することが観察された。

3.2 変形挙動について

$V=1$ mm/minの場合、前述の荷重—変位関係と変形挙動の観察から、変位量が約1.5mmまでは、全体が弾性変形をしており、その変位量で降伏を起こすことが確認できる。その後、変位量が約3.5mmで荷重増加の傾きは大きく減少するが、変形挙動については全体が均一な塑性変形が進行していく。そして、変位量が約17.5mmでネッキングが開始し、その直後、変位量が約19.5mmでネック伝ば現象が開始する。その後は、安定にネック伝ば現象が進行していくことが確認された。

3.3 ネック領域における局所変形について

ネック領域における試験片の断面プロファイルを観察すると、幅方向のプロファイルは、両端部が厚く、中央部が薄くなる変形挙動が観察される。クロスヘッドスピードを変化させた場合のネック領域における幅との関係を図8に、厚みとの関係を図9にそれぞれ示す。なお、幅と厚みについては、試験片を試験機から取外した状態での測定値を示している。両図から、クロスヘッドスピードの増加にともない、幅の変化はほとんどなく、また、厚みの変化についてはわずかな減少がそれぞれ確認された。さらに、試験片の断面プロファイルを詳しく測定するために、表面粗さ測定機SV-624(ミットヨ製)を用いて測定した。 $V=1$ mm/minの場合のネック領域における幅方向の中央部からの距



■ : point d ◆ : point e ▲ : point f

Fig. 7 Relation between load at points d, e, f and crosshead speed

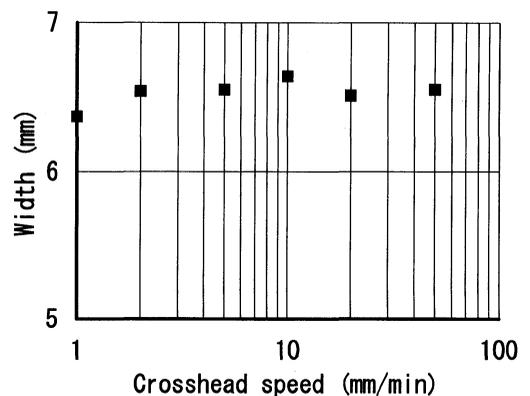


Fig. 8 Relation between width and crosshead speed

離と厚みとの関係を一例として図10に示す。同図より、中央部から両端部にかけて緩やかな厚みの増加が確認された。

4. 有限要素法による変形解析

前述の実験結果から、降伏直後にはネッキングが起これず、全体が均一な変形が進行した後にネッキングおよびネック伝ば現象を起こすPBT成形品に特有の変形挙動について、実験結果からは得ることが困難な情報を得るために数値解析による考察を行い、構成則の違いが変形挙動におよぼす影響についての検討を行った。本報では、ひずみ速度の影響を極力なくすため、ひずみ速度が十分に遅い領域である $V = 1 \text{ mm/min}$ の場合の実験結果を対象にして、数値解析による変形挙動の再現について試みた。

数値解析には、これまでにPETフィルムを対象としたネック伝ば解析^{(10)~(12)}に使用したものと同様の汎用有限要素法ソフトウェア(MARC)を用いた。モデル化についても前報^{(10)~(12)}と基本的に同様として、数値解析を行った。

4.1 要素分割および境界条件

ダンベル型試験片の形状から、チャック間距離114 mm(平行部の長さ80 mm, 平行部の幅10 mm, 厚み4 mm)を解析対象とした。前報^{(10)~(12)}においては、試験片の長さ、幅に対して厚みが非常に小さいことから平面応力要素を用いたモデル化を行ってきた。しかし、本報における試験片形状では、厚み方向の変形量も無視できないため、三次元ソリッド要素でのモデル化を実施した。

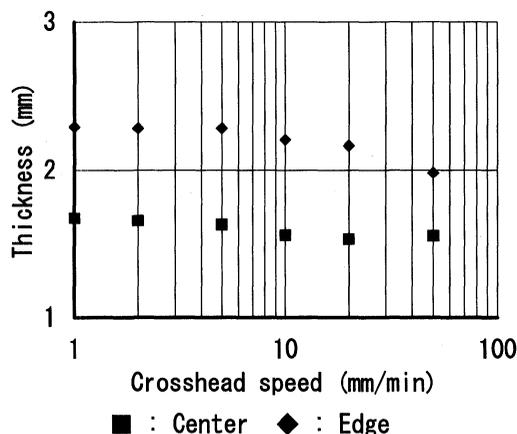


Fig. 9 Relation between thickness and crosshead speed

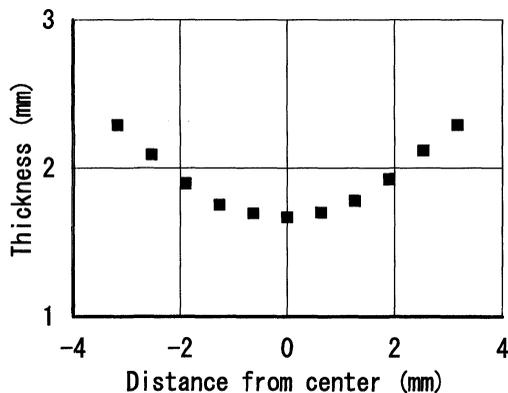


Fig. 10 Relation between thickness and distance from center at necked region

解析対象は、試験片の対称性を考慮して、1/8モデルとした。このモデルにおけるX-Y平面の要素分割図(X方向に36分割、Y方向に6等分割)を図11に示す。また、同図には図示していないが、厚み方向(Z方向)には8等分割の要素分割を行っており、総要素数は1728、総節点数は2331である。なお、実際の引張試験では、試験片のわずかな不整(例えば、幅や厚みがわずかに小さい部位が存在する等)のある箇所からネッキングが開始する。数値解析では、前述のような試験片の不整を考慮していないため、後述の境界条件下ではネッキングは試験片中央部(図11における辺AB間)で発生する。よって、この部分の要素分割を細かくした。

境界条件は、解析モデルの対称性を考慮して、図11における辺AB上の全節点をX方向に、辺AC上の全節点をY方向に、最下面の全節点をZ方向にそれぞれ完全拘束した。また、辺CD上の全節点に対しては、試験機のチャックによる拘束を模擬してY方向の変位を完全拘束し、さらに、X方向には強制変位を与えた。なお、三次元ソリッド要素で要素分割を行っているため、前述の図11における各辺上の全節点とは、図11に図示していないZ方向の全節点を意味する。

4.2 構成則の設定

引張試験から実測される荷重-変位関係から、その材料の真応力-対数ひずみ関係を求めることができるのは、試験片全体が均一変形していることが前提⁽¹⁰⁾となる。そこで、その材料の見掛け上の構成則である真応力-対数ひずみ関係を図12に示すように簡略化(直線近似)した。このことにより、数値解析によって各領域における応力状態の違いを考慮に入れ、引張試験時に得られる荷重-変位関係に相当するものを再現し、見掛け上の構成則を推定することを試みた。

図12は、弾性領域(A~B点間)と、降伏後の領域1(B

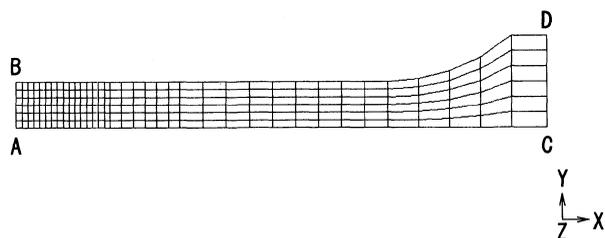


Fig. 11 Finite element mesh for test specimen

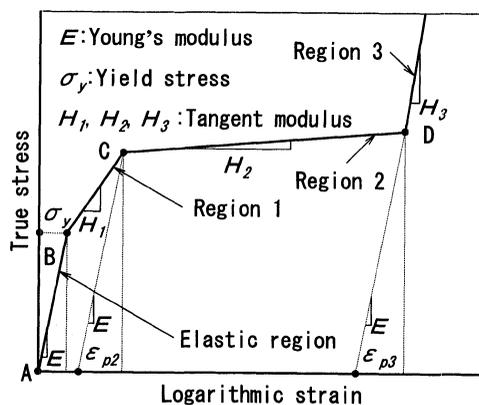


Fig. 12 Uniaxial true stress-logarithmic strain curve

～C点間), 領域2 (C～D点間), 領域3 (D点以降) とに区別することができる。本報では, 引張試験時の荷重-変位関係より決定したヤング率 E , 降伏応力 σ_y , 領域1の接線係数 H_1 を一定とし, 未知量である領域2の接線係数 H_2 と, 領域2, 3の開始点における相当塑性ひずみ ϵ_{p2} , ϵ_{p3} をパラメータとして数値解析を行った。なお, 領域3の接線係数 H_3 については, 前報¹⁰⁾の数値解析結果から一定値を超えるとネック伝ば挙動には変化が無いという知見より, ネック伝ばが起こる一定値を仮定した。このような構成則に関する数値解析条件を表2に総括する。

5. 数値解析結果

5.1 荷重-変位関係について

荷重-変位関係は E , σ_y , H_1 , H_2 , H_3 , ϵ_{p2} , ϵ_{p3} に大きく依存する。前述のように引張試験時の荷重-変位関係より決定した E , σ_y , H_1 , H_3 を一定として, H_2 , ϵ_{p2} , ϵ_{p3} を変化させた場合の数値解析結果から得られた変形中期段階(ネック伝ば現象が安定に進行する段階)までの荷重-変位関係を図13～15にそれぞれ示す。このような結果から, $H_2=19.4$ MPa, $\epsilon_{p2}=0.170$, $\epsilon_{p3}=1.10$ の場合が実験結果を最もよく再現していると考えられ, その場合の数値解析結果によって再現された荷重-変位関係について, 実験結果と比較したものを図16に示す。同図から荷重-変位関係については, ほぼ定量的な一致が確認された。

Table 2 Conditions of numerical analysis

Young's modulus	E (GPa)	1.73 (Constant)
Poisson's ratio	ν (-)	0.38 (Constant)
Yield stress	σ_y (MPa)	24.5 (Constant)
Tangent modulus in Region 1	H_1 (MPa)	83.9~64.2 (Constant)
Tangent modulus in Region 2	H_2 (MPa)	4.89, 19.4, 33.6
Tangent modulus in Region 3	H_3 (GPa)	1.47 (Constant)
Equivalent plastic strain at the beginning of Region 2	ϵ_{p2} (-)	0.162, 0.170, 0.178
Equivalent plastic strain at the beginning of Region 3	ϵ_{p3} (-)	1.00, 1.10, 1.20
Yield criteria		von Mises
Hardening rule		Isotropic hardening

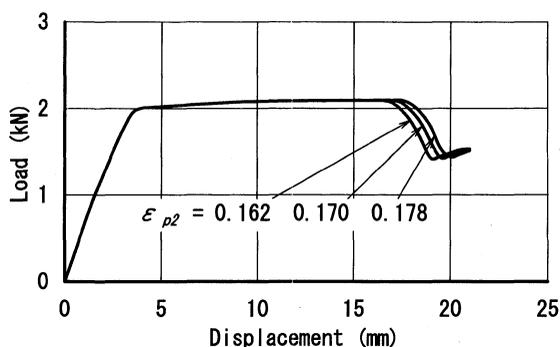


Fig. 13 Numerical result for load-displacement diagrams with varying ϵ_{p2} ($H_2=19.4$ MPa, $\epsilon_{p3}=1.10$)

5.2 変形挙動について

数値解析によって得られた荷重-変位関係が, 実験結果とはほぼ定量的に一致した構成則を用いた場合について, 変位量 D を変化させた場合の X-Y 平面における変形状態図を図17に示す。なお, 同図では, $D=1.5$ mm の時は全体が均一な弾性変形を, $D=3.5$ mm の時は降伏後の全体が均一な塑性変形を, $D=18.0$ mm の時はネック開始直後を, $D=19.0$ mm の時はネック進行中を, $D=25.0$ mm の時はネック伝ば進行中をそれぞれ示しており, 実験結果とはほぼ定量的に一致していることが確認できた。

5.3 ネック領域における局所変形について

前述の数値解析によって得られた荷重-変位関係が, 実

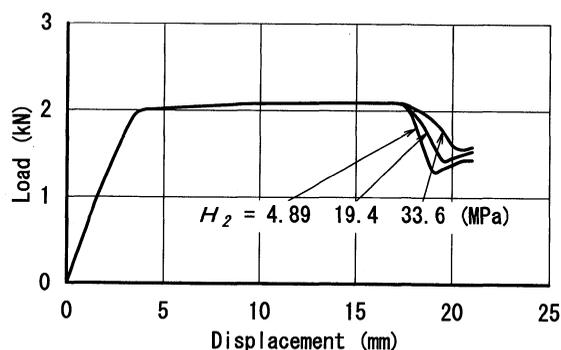


Fig. 14 Numerical result for load-displacement diagrams with varying H_2 ($\epsilon_{p2}=0.170$, $\epsilon_{p3}=1.10$)

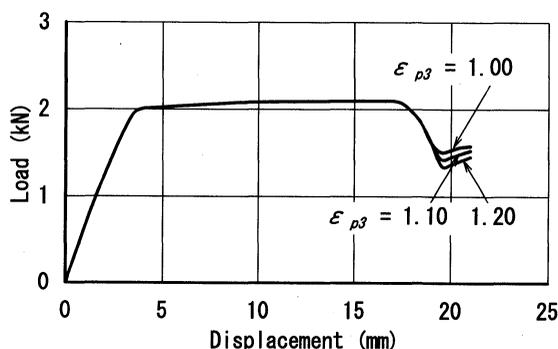


Fig. 15 Numerical result for load-displacement diagrams with varying ϵ_{p3} ($H_2=19.4$ MPa, $\epsilon_{p2}=0.170$)

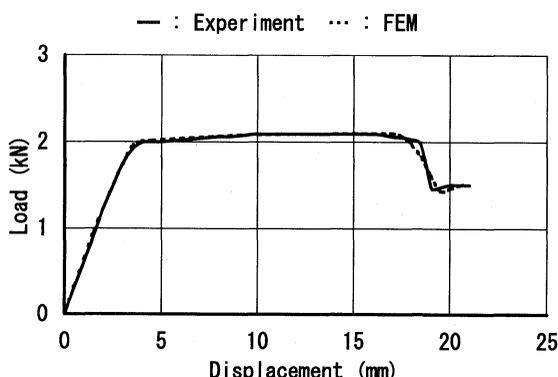


Fig. 16 Comparison of load-displacement diagrams between experimental and numerical results

験結果とほぼ定量的に一致した構成則を用いた場合について、ネック領域と非ネック領域における試験片の幅、厚みを実験結果と比較した。なお、実験結果は引張試験機から取外した試験片を対象としている。そこで、数値解析では、ネック伝ばが安定に進行している $D = 25 \text{ mm}$ から除荷させ、弾性ひずみ分を除去した状態での比較を行った。これらの試験片の幅、厚みに関する実験結果と数値解析結果とをまとめて表3に示す。

また、ネック伝ばが安定に進行している変位量において、数値解析により得られたネック領域の変形状態図と、引張試験から得られた試験片の写真を図18に拡大して示す。試験片のネック領域と非ネック領域との境界付近における外形を比較すると、数値解析結果と実験結果にはわずかな差はあるが、ほぼ定量的な一致が見られる。また、ネック領域の変形状態を全体的に比較すると、幅および厚みの変化、ネック領域の長さ、外形についてもよい一致を示しており、変形挙動のほぼ定量的な一致が確認された。

このように、荷重-変位関係と変形挙動について、実験結果と数値解析結果とがよい一致を示した $H_2 = 19.4 \text{ MPa}$, $\epsilon_{p2} = 0.170$, $\epsilon_{p3} = 1.10$ の場合における降伏後の真応力-塑性ひずみ関係を図19に示す。

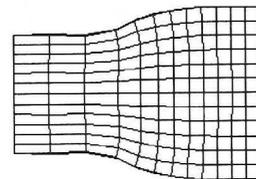
6. 考 察

PBT成形品における詳細な変形挙動の実験結果について、数値解析から得られた知見を含めて考察する。

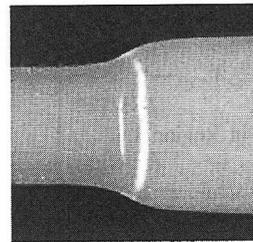
6.1 荷重-変位関係について

実験から得られる荷重-変位関係(図2参照)における弾性領域は、本報で仮定した真応力-対数ひずみ関係(図

12参照)の弾性領域に対応する。弾性領域においては、ひずみの値も小さく、図2の荷重と図12の真応力との間には、試験片の初期断面面積による比例関係が成立する。降伏後の荷重-変位関係における領域I~II(図2参照)は、真応力-対数ひずみ関係(図12参照)の領域1に対応する。つまり、降伏直後の図2の領域I(b-c点間)は図12の領域1の前半部分に、図2の領域II(c-d点間)は図12の領域1の後半部分にそれぞれ対応する。これは、変位とひずみの関係が非線形となる大変形領域で、真応力-対数ひずみ関係の接線係数を直線で仮定している(簡略化)ことと、全体の均一な塑性変形が進むにつれ、試験片の断面面積が減少していき、公称応力と真応力に差がでてくるためである。その後、接線係数が図12の H_2 の値になると、ネッキングが発生するための条件を満たし、図2の領域IIIの前半(d-e点間)は図12の領域2に対応する。図2のd点からe点における荷重の減少量は、図12の ϵ_{p3} の値(領域2の大きさ)に依存する。また、図2における荷重減少の傾き(d-e点間)は、図12の H_2 の値に対応する。その後、図2のe-f点間におけるわずかな荷重増加は試験片中央部における幅方向の両端部(図11のB点近傍



(a) Numerical result for deformation diagram



(b) Photograph of necked PBT molding

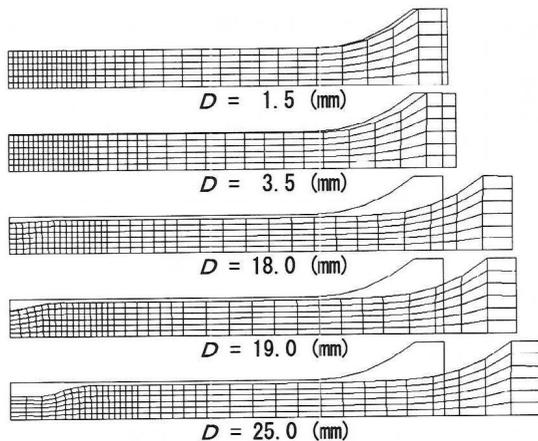


Fig. 17 Numerical result for deformation diagrams with varying displacement

Table 3 Comparison of width and thickness between experimental and numerical results

		Experiment	FEM	
Necked region	Width (mm)	6.37	6.30	
	Thickness (mm)	Center	1.67	1.95
		Edge	2.29	2.21
Unnecked region	Width (mm)	9.65	9.65	
	Thickness (mm)	3.87	3.86	

Fig. 18 Comparison of deformation behavior at necked region between experimental and numerical results

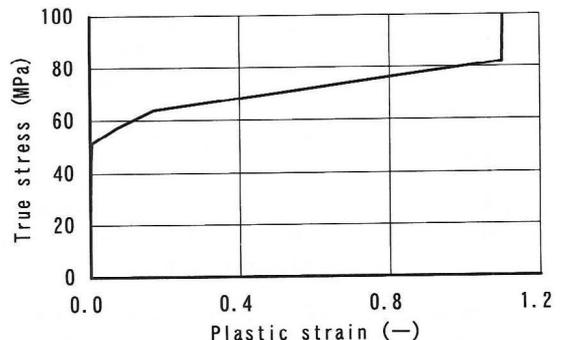


Fig. 19 True stress-plastic strain curve

部分)が図12のD点に到達してないため、この領域が変形することに起因する。数値解析結果を詳細に検討すると、ネッキング開始時には、X-Y平面においては、試験片中央部における幅方向の中央部(図11のA点近傍部分)から45°方向に、また、X-Z平面においても同様に、厚み方向の中央部(図11のA点における最下面近傍部分)から45°方向にそれぞれシアバンドが発生する。このシアバンドの幅が大きくなることによって変形が進むため、試験片中央部における幅方向の両端部の変形が遅れると考えられる。最後に、試験片中央部における変形が安定すると、ネック部の変形が徐々に進行してネック伝ばが開始する。これは、ネッキング変形終了後の箇所が図12の領域3に達し、その部分の剛性(H_0)が高くなることによって、それ以上変形がほとんど進行しないため、ネッキングを起こしていない箇所へと変形が順次伝ばしていく。

このように、PBT成形品においては、他の樹脂(例えば、PET)が降伏直後にネッキングが開始するのと異なり、塑性変形が均一に進行する領域が存在するのは、図12の領域1が存在することによると考えられる。前報¹²⁾において仮定したPETフィルムの構成則は、降伏直後に接線係数が急激に減少するような場合であり、図12の領域1は存在しないため、降伏直後にネッキングが開始する。この現象は、Vincentによるネック伝ばの現象論的解析結果²⁰⁾とも一致し、PBT成形品に特有の荷重-変位関係を数値解析によって再現できたことが示唆される。

6.2 変形挙動について

格子状の標線を記した試験片について、ネック伝ばが安定に進行して、ネック量が一定となった領域における標線を観察すると、伸張方向の標線の長さは変形前が5mmであったのに対し、変形後は約16mmとなっている。これを伸張比 λ に換算すると、 $\lambda=3.2$ となり、本報で仮定した図12のD点における ϵ_{ps} の値を λ に換算すると $\lambda=3.1$ となり、両者はほぼ一致する。

また、幅と厚みの変化については、厚みは幅方向の中央部と両端部において多少の差はあるものの、幅の変化についてはほぼ一致している。また、図18より、ネック領域の長さ等の外形に関する変形量についても、実験結果を数値解析結果がほぼ定量的に再現している。さらに、非ネック部の幅と厚みの変化もほぼ一致していることから、本報における数値解析(ひずみ速度が十分に遅い領域)の妥当性が示唆される。

6.3 ひずみ速度が構成則に与える影響について

本報の引張試験においては、室温(23°C)での環境下において一定の温度条件下での実験を行っているが、 $V=50$ mm/minの場合、ネック部における温度は明らかに上昇していることが観察されている。これは、ネック部の塑性変形の進行によって発生する局所的な発熱の効果によるものと考えられる。ひずみ速度が十分に遅い場合には、塑性変形により発熱したネック部は瞬間的に放熱してしまい、放熱量が発熱量を上回るためネック部の温度上昇がほとんど見られないが、ひずみ速度が速い場合には、塑性変形により発熱したネック部が放熱する前に新たな塑性変形が進展し、発熱量が発熱量を上回るためネック部の温度上昇が顕著に起こると考えられる。したがって、実験結果から得

られた荷重-変位関係のひずみ速度依存性について考察する際には、塑性変形による発熱量が無視できる範囲内では問題ないが、明らかに塑性変形の進行中に温度上昇の見られる場合には温度依存性を無視できなくなる。

実験結果から、ひずみ速度の増加により、ヤング率、降伏応力については、わずかな増加の傾向(図4,5参照)が見られるが大きな変化はない。一方、ひずみ速度の増加により、ネッキングが開始する変位量(図2におけるd点の変位量)については、減少の傾向(図6参照)が見られる。弾性領域においては、前述のような発熱による影響は無視できると考えられるが、塑性領域(特にネッキング進行以降の領域)においては、発熱による剛性低下を無視することができないと考えられる。

このように、PBT成形品の構成則を検討することにおいて、ネック部の塑性変形による局所的な発熱が起こった後、変形速度よりも放熱時間が十分に速い(瞬時に放熱して、周りの雰囲気温度となる)場合には、本報で示した温度依存性を考慮していない構成則を用いた数値解析の妥当性が示唆される。しかし、塑性変形による発熱の効果が無視できないひずみ速度の領域においては、温度依存性による構成則の変化を考慮することが不可欠となる。

6.4 基本特性が構成則に与える影響について

ネッキングやネック伝ば現象をともなうような大変形挙動において、マクロな変形挙動を対象とした構成則を議論している本報での考察だけでなく、本来、PBT樹脂の結晶構造も考慮した構成則の検討が必要であると思われる。Hallら¹⁷⁾は、PBT結晶形態におよぼすひずみ量の影響について詳しく考察しており、ひずみが0.0で α 型結晶の分率が0.99、ひずみが0.086で α 型結晶の分率が0.45、ひずみが0.142で α 型結晶の分率が0.04になると報告している。ひずみ速度が十分に遅い領域である $V=1$ mm/minの場合において、PBT成形品がネッキングを起こすひずみ量が0.2以上であるため、ほとんど β 型結晶に転移していると考えられる。これは、Tashiroら¹⁸⁾の報告にあるマクロな力学挙動は、ミクロな構造変化を直接反映しているという内容と定性的に一致する。しかし、ひずみ速度が速くなると、ネッキングを起こすひずみ量が小さくなり、ほとんど β 型結晶に転移しているとは限らない領域となる。このように、本報で実測したひずみ速度依存性や、変形時の発熱による効果(温度依存性)、結晶構造と変形挙動との関係については不明確な点も残されている。よって、結晶構造と構成則との詳細な関係を考察することが今後の検討課題である。

また、本報で対象としたPBT成形品は、射出成形によって成形しているため、スキン・コア層は明らかに存在していると考えられる。Hobbsら¹⁹⁾は、PBT成形品を対象に金型温度の影響によって、スキン層の厚みが増加すると報告している。このスキン層の厚みは、結晶化特性、力学的特性に影響をおよぼすと考えられている。本報における数値解析では、スキン・コア層を平均化した構成則で議論をしているが、ネック伝ばをともなうような大変形挙動について、マクロな観点からの数値解析によって、変形挙動の第一段階を考察することは、工業的にも十分に意味があると考えられる。

このように、結晶構造、層構造を含めて、前述の温度依存性やひずみ速度依存性を考慮した構成則を詳細に検討することが大きな今後の検討課題である。

7. 緒 言

PBT 成形品の引張試験片を対象に、ネッキングやネック伝ば現象をともなった場合の荷重-変位挙動やネック伝ば時の成形品の詳細な変形挙動の観察を行った。また、有限要素法による数値解析もあわせて実施し、実験結果との比較を行った結果、次に示す結論を得た。

- ① PBT 成形品は、降伏直後にはネッキングは発生せず、全体がほぼ均一に塑性変形が進行することが観察された。その後、ネッキングおよびネック伝ば現象が起こることも確認できた。
- ② PBT 成形品の室温における荷重-変位関係におけるひずみ速度依存性を引張試験により明らかにした。
- ③ PBT 成形品を対象に、ひずみ速度が十分に遅い領域において、実測の荷重-変位関係を再現する見掛け上の構成則を数値解析より得ることができた。
試験片の幅、厚さ方向における変形挙動の定量的な数値解析、ひずみ速度依存性を正確に記述する構成則の検討、塑性変形による発熱を同時に考慮した構成則の検討、さらに、結晶構造、層構造と構成則との関係を詳細に検討することが今後の研究課題として残る。

本研究の引張試験を実施するに当たり、協力を頂いた東洋紡績の根岸聖司氏、末吉由弥氏にお礼申し上げる。

本研究の発表を許可された東洋紡績に深謝する。

参 考 文 献

- 1) Neale, K. W. and Tugcu, P. : *J. of the Mech. and Phy. of Solids*, **33**, 323 (1985)
- 2) Tugcu, P. and Neale, K. W. : *Intern. J. of Solids and Structures*, **23**, 1063 (1987)
- 3) Tugcu, P. and Neale, K. W. : *Intern. J. of Mech. Sci.*, **29**, 793 (1987)
- 4) Tugcu, P. and Neale, K. W. : *J. of Eng. Mat. and Tech., Transactions of the ASME*, **110**, 395 (1988)
- 5) Marquez-Lucero, A., G'Sell, C. and Neale, K. W. : *Polymer*, **30**, 636 (1989)
- 6) G'Sell, C. and Marquez-Lucero, A. : *Polymer*, **34**, 2740 (1993)
- 7) Fager, L. O. and Bassani, J. L. : *Intern. J. of Solids and Structures*, **22**, 1243 (1986)
- 8) Nimmer, R. P. : *Polym. Eng. and Sci.*, **27**, 16 (1987)
- 9) Nimmer, R. P. : *Polym. Eng. and Sci.*, **27**, 263 (1987)
- 10) 野々村千里, 鈴木利武, 石原英昭 : 成形加工, **4** (9), 583 (1992)
- 11) 野々村千里, 鈴木利武, 石原英昭 : 成形加工, **5** (1), 60 (1993)
- 12) 野々村千里, 福永守高, 鈴木利武, 石原英昭 : 成形加工, **7**(6), 397 (1995)
- 13) Nied, H. F. and Stokes, V. K. : *J. of Eng. Mat. and Tech., Transactions of the ASME*, **108**, 113 (1986)
- 14) Nied, H. F., Stokes, V. K. and Ysseldyke, D. A. : *Polym. Eng. and Sci.*, **27**, 101 (1987)
- 15) Yokouchi, M., Sakakibara, Y., Chatani, Y., Tadokoro, H., Tanaka, T. and Yoda, K. : *Macromolecules*, **9**, 266 (1976)
- 16) Bornschlegl, E. and Bonart, R. : *Colloid and Polym. Sci.*, **258**, 319 (1980)
- 17) Hall, I. H. and Mahmoud, E. A. : *Polymer*, **29**, 1166 (1988)
- 18) Tashiro, K., Nakai, Y., Kobayashi, M. and Tadokoro, H. : *Macromolecules*, **13**, 137 (1980)
- 19) Hobbs, S. Y. and Pratt, C. F. : *J. of Appl. Polym. Sci.*, **19**, 1701 (1975)
- 20) Vincent, P. I. : *Polymer*, **1**, 7 (1960)