プラスチック成形品のネック伝ば解析(3) —有限要素法とデジタル画像相関法を用いた PBT 成形品の材料定数同定法—

藤川 正毅^{*1}・小林 卓哉^{*1}・古市 謙次^{*2}・
児玉 勝洋^{*2}・伊藤 勝也^{*2}・野々村 千里^{*2}

Analysis for Neck Propagation of Plastic Molded Materials (3) —Determination Technique for Material Properties of PBT Molding using the Finite Element Method and Digital Image Correlation—

Fujikawa, Masaki^{*1}/Kobayashi, Takaya^{*1}/Furuichi, Kenji^{*2}/
Kodama, Katsuhiko^{*2}/Ito, Katsuya^{*2}/Nonomura, Chisato^{*2}

It is very important to estimate the neck formation and neck propagation behavior of plastic molded materials in the field of polymer processing. In a previous paper, to evaluate the results on the neck formation and neck propagation behavior for polybutylene terephthalate (PBT) molding in uniaxial tensile test, a numerical model based on the Finite Element Method (FEM) was developed. However, there are some difficulties in determining material properties. In order to overcome them, the authors developed the determination technique for the material properties from not only load-displacement behavior but also the strain distribution around the necked region analyzed by Digital Image Correlation (DIC). Then, it was confirmed that the numerical results under the calculated elasto-plastic constitutive law show good agreement with both experimental load-displacement behavior and strain distribution around the necked region.

Key words : Neck propagation/PBT molding/Finite element method/Digital image correlation/
Elasto-plastic constitutive law

1. 緒 言

高分子材料のネッキングやネック伝ば現象等に代表される不均一変形挙動の研究は、これまでに多くの報告がされている。その中で特に、数値解析により現象を再現しようとした試みには、富田ら^{1)~7)}、Nealeら^{8)~13)}、G'Sellら^{14), 15)}、Fagerら^{16), 17)}、Nimmerら^{18)~21)}の報告がある。また、近年の研究では、破壊条件とその材料の構成則が既知であれば、

高分子成形品の強度を予測することが可能であるとする報告²²⁾がある。したがって、構成則の構築と材料定数の同定手法の確立は、非常に重要な課題である。著者らによる研究^{23)~30)}では、ポリエチレンテフタレート (PET) フィルム^{25)~27)}や、ポリブチレンテフタレート (PBT) 成形品^{28)~30)}を対象とし、弾塑性構成則を用いたモデル化が、ネック伝ば現象の変形挙動の推定に有効であることを示した。有限要素法 (FEM) による解析結果の再現性は、引張試験の荷重-変位線図と徐荷後の試験片形状により確認されている。しかし、荷重負荷時におけるネッキング発生箇所と近傍におけるひずみ分布の再現性は、検証が不十分なままである。また、弾塑性材料定数を同定する有効な手法の確立は未だ確立されていない。

本報では、上記の問題点を克服するための基礎的な検証として、ひずみ速度が十分に小さく、伸長による発熱も無視できるとされる領域³⁰⁾を対象とし、FEM とデジタル画

^{*1} (株)メカニカルデザイン
東京都調布市布田 1-40-2 アクシス調布 2 階 (〒182-0024)
Mechanical Design and Analysis Co.
40-2 Fuda 1-Chome, Chofu, Tokyo, 182-0024, Japan

^{*2} 東洋紡績株式会社総合研究所
大津市堅田 2-1-1 (〒520-0292)
TOYOBO Co., Ltd. Research Center
1-1, Katata 2-Chome, Otsu, Shiga, 520-0292, Japan
2007.5.22 受理

Fig.1 Finite element mesh for test specimen

像相関法 (DIC) を利用した材料定数同定法を確立するとともに、その有効性の検証を行うことを目的とする。本論文の第2章では、引張試験の荷重-変位線図から材料定数を同定する際に生じる問題点について整理する。そして第3章では、問題点を克服し、かつ一意的な材料定数を同定する手法について述べる。最後に第4章では、本手法の有効性と構成則の妥当性の検証のために、引張試験により得られた荷重-変位関係とネッキング発生箇所の近傍におけるひずみ分布データを用いた詳細な比較を行う。

2. 材料定数の同定法における問題点

引張試験の荷重-変位線図のみを用いて、材料の真応力-対数ひずみ関係を求める場合、試験片全体の一様な変形が前提条件^{(28), (29)}となる。しかし、ネック伝ばを伴う材料の場合は、試験片の局所で断面積が低下する領域が発生し、試験片全体で応力・ひずみが一様とならない。このため、弾塑性材料の構成則に必要な、真応力-塑性ひずみの関係を求めることができない。現状では、引張試験と同条件で有限要素法 (FEM) を実施し、得られた荷重-変位線図が実験結果を再現するように材料定数を試行錯誤の上で同定する方法^{(28)~(30)}を用いてきた。

本章では、この試行錯誤的な同定法による問題点の整理をする。まず、前報^{(28)~(30)}と同様のダンベル型試験片 (ISO 3176:1993 (E)) の引張試験、汎用 FEM ソフトウェアである MSC.Marc (MSC 製) を用いて計算する。使用した解析モデルを図 1 に示す。ここで、節点数 2331、要素数 1728、完全積分の三次元ソリッド要素 (8 節点 6 面体要素) を用いた。なお、X、Y、Z 方向の対称性を考慮して 1/8 モデルとした。境界条件は、解析モデルの対称性を考慮して、図 1 における辺 AB 上の全節点を X 方向に、辺 AC 上の前節点を 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 方向の変位を完全に拘束し、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 1 における各辺上の全節点とは、図示していない Z 方向の全節点を意味する。次に材料モデルは弾塑性構成則として、前報^{(28), (29)}と同じものを用いる (図 2 の Case-1)。さらに比較検証のため、Case-1 の材料定数をもとに、荷重-変位線図の結果を再現する材料定数を試行錯誤的に二つ作成した (図 2 の Case-2 と Case-3)。これらは、材料が一様変形する領域 (塑性ひずみが 0.2 以下) において、真応力-塑性ひずみは全て同値であるが、ネッキング発生後の材料定数は異なる。以上の材料定数を用いて FEM より得

Fig.2 Relationship between true stress and plastic strain

Fig.3 Experimental and numerical results for load-displacement diagrams

られた荷重-変位線図を図 3 に示す。

Case-1~3 の弾塑性材料定数はそれぞれが大きく異なるにもかかわらず、図 3 の荷重-変位線図には、あまり差が生じていない。試験片が一様変形する領域 (変位 18 mm 程度まで) では、入力している材料定数が同値であるため、結果が同一であったと考えられる。しかし、それ以降の領域でも、入力している材料定数が異なるにもかかわらず、荷重-変位線図はほぼ同じとなった。このことから、引張試験結果がネック伝ばを伴う場合、引張試験の荷重-変位線図から得られる情報のみでは、弾塑性材料定数を一意に決定できない場合があることを意味する。

次に、入力した材料定数の差が、結果のどの成分に影響を与えているかについて検証した。これは、解析結果のネック伝ば発生後の変形状態図を見れば明らかとなる。試験片の変位が 22 mm 引張の時のネック発生位置近傍の変形状態図とネッキングが開始する位置の公称ひずみと変位の関係を図 4、5 にそれぞれ示す。図より、ひずみの解析結果は、ネック伝ば発生直後から大きな差が生じており、その差は最大で 50% 以上にもなる。

ネック伝ばを伴う材料の弾塑性材料定数を同定する場合、荷重-変位線図の実験結果のみを用いると、一意に結果を得る事ができない。つまり、荷重-変位線図を再現する材料定数は幾つか候補が存在するが、それらの材料定数を用いた場合に予測されるネック伝ば発生後のひずみ量はそれぞれに異なる。したがって、ネック伝ばを伴う場合の材料定数の同定には、荷重-変位線図による評価のみならず、

Fig.4 Counter line diagrams of the strain ε_x around necked region

Fig.5 Relationship between nominal strain and displacement

ネック伝ば時におけるひずみ量の評価も重要となる。

3. 弾塑性材料定数の同定法

前章では、ネック伝ばを伴う場合の材料定数同定には、ひずみ計測とその評価が重要であることを確認した。引張試験時にひずみ計測を行う方法の一つに、ひずみゲージがある。しかし、ひずみゲージのような接触タイプの計測では、取り付け部において応力が集中する可能性もあり、ネッキング発生のタイミングや、ネック伝ば現象に悪影響を与える恐れがある。また、ネッキングの発生により生じる変形は公称ひずみで100%を超える場合が多く、一般的なひずみゲージの計測可能範囲を大きく超えてしまう。

そこで本報では、デジタル画像相関法 (DIC) を用いて、ネッキング発生前後における全視野ひずみ計測を行った。DIC は、非接触・全視野で試験片表面の変位・ひずみ計測方法が可能であり、特に大変位・大変形の計測に適しているのに加え、変位計測分解能が0.02ピクセル程度とこの種の計測の中では高精度であるなどの特徴を有している。

本章ではまず、DIC に関する概要をまとめ、続いて弾塑性材料定数の同定に使用した最適化手法の一つである遺伝的アルゴリズム (GA) について簡単にまとめる。そして最後に、弾塑性材料定数を決定するための計算方法について記す。

3.1 デジタル画像相関法 (DIC)³¹⁾

DIC は画像内における計算領域の変形前後の移動量を輝度値分布の相関を用いて計測する手法である。本手法は、物体表面の乱反射像は表面と共に移動し、変形の前後でその特徴が保存されるという考えに基づいている。また、相関を得やすくするため、試験片の表面にランダムパターンを付着する方法が一般的である。変形前後の画像の相関は次式より計算できる。

$$S \left(x, y, u_x, u_y, \frac{\partial u_x}{\partial x}, \frac{\partial u_x}{\partial y}, \frac{\partial u_y}{\partial x}, \frac{\partial u_y}{\partial y} \right) = 1 - \frac{\sum I_u(x, y) I_d(x^*, y^*)}{\sqrt{\sum I_u(x, y)^2 \sum I_d(x^*, y^*)^2}} \quad (1)$$

ここで、 $I_u(x, y)$ は、変形前画像の座標 (x, y) における輝度値、 $I_d(x^*, y^*)$ は、変形後画像の座標 (x^*, y^*) における輝度値である。また、総和記号 Σ は、任意の解析対象点を中心とした $n \times n$ の検索領域の輝度値の総和を示す。輝度相関を調べる座標 (x, y) と (x^*, y^*) が移動前後で対応する場合、次式を得ることができる。

$$\begin{cases} x^* = x + u_x + \frac{\partial u_x}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial u_x}{\partial y} \Delta y \\ y^* = y + u_y + \frac{\partial u_y}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial u_y}{\partial y} \Delta y \end{cases} \quad (2)$$

ここで、 u_x および u_y は、それぞれ計算領域画像の中心における x 方向および y 方向の変位であり、 Δx および Δy は計算領域の中心から点 (x, y) までの距離である。式 (1) の S を最小化する変位 u_x, u_y および変位勾配 $\partial u_x / \partial x, \partial u_x / \partial y, \partial u_y / \partial x, \partial u_y / \partial y$ の6つの変数を検索することにより変位を決定することができる。なお、サブピクセル単位の変位解析をするために、ランダムパターンの双三次関数を用いた補間を行う。計算時間の短縮に対しては、相関演算にニュートン・ラプソン法を用いる方法³¹⁾が提案されている。この計算方法を用いれば、約0.02画素の精度で変位解析を行うことができる。

3.2 遺伝的アルゴリズム (GA)^{32), 33)}

GA は、最適化問題の解を生物の個体に見立て、個体群と複数の個体群の情報を組み合わせる交叉を用いつつ、探索を進める最適化手法であり、解の評価値のみを用いて大域的に最適解の探索を行う手法である。本研究では、ネック伝ば時の弾塑性材料定数の最適化演算に、GA の中でも特に収束性に優れるとされているシンプレックス交叉 (SPX) を用いる実数値 GA³²⁾を適用する。GA 以外の多くの最適化演算は、適切な初期値の設定が必要となり、設定が困難な場合に最適解を得るのが難しくなる。従って、今回の問題のような場合には、GA による最適化が有力であると考えられる。

以下に、SPX の手順についてまとめる。まず、探索空間として実数空間を考え、個体は次元実数ベクトルとして表現する。そして初期個体群は決定変数空間全体へ一様分布するとして発生させる。

1. $n+1$ 個の親個体 $x^0, \dots, x^n$ を個体群からランダムに選ぶ。
2. 親個体の重心を $g = 1/(n+1) \sum x^i$ とする。
3. $c^0 = 0, p^0 = g + \alpha(x^0 - g)$ と設定する。

4. $k=1, \dots, n$ について次式で計算する.

$$\begin{aligned} p^k &= g + \alpha (x^k - g) \\ c^k &= r_{k-1} (p^{k-1} - p^k + c^{k-1}) \end{aligned} \quad (3)$$

ここで、統計量の遺伝に基づいて $\alpha = \sqrt{n+2}$ が推奨されている。これにより、SPX が間接的に機能分担保説に従う。また、 r_k は 0 から 1 の間で一様乱数を発生させる関数をとした場合に次式より得られる。

$$r_k = u(0, 1)^{1/(k+1)} \quad (4)$$

5. 最終的に子ベクトルは、次式で得られる。

$$c = p^n + c^n \quad (5)$$

なお、以下に示す手順の世代交代モデル^{(32), (34)}を用いた。

1. $n+1$ 個の親個体をランダムに選ぶ。
2. 交叉によって子個体を生成する。
3. $n+1$ 個の親個体からランダムに 2 個体を非復元抽出する。
4. 前に抽出された 2 個体と子個体の中から最良個体および適応度のランキングによるルーレット選択で選んだ 1 個体を選び、個体集団に戻す。なお、突然変異は行わないものとする。

3.3 材料定数同定のために最小化すべき関数

実験より得られる荷重を変位の関数とし、 $F^{exp}(u)$ と表す。FEM より得られる荷重の結果を、 $F^{FEM}(u, H)$ とする。ここで、 H は弾塑性材料定数の加工硬化係数であり、塑性ひずみの関数である。引張試験時の荷重-変位線図を再現する弾塑性材料定数は、 $F^{exp}(u)$ と $F^{FEM}(u, H)$ の残差を最小化するを同定すれば得られる。しかし、前述したように、同定した結果がネック伝ば時における実験のひずみを再現しているとは限らない。そこで、DIC から得られるネッキング発生位置のひずみ $\varepsilon^{exp}(u)$ と FEM の結果である $\varepsilon^{FEM}(u, H)$ の残差も同時に評価する。すなわち、最小化すべき誤差関数を S とした場合、

$$\begin{aligned} S = & \sum_i^N ((F^{exp}(u_i) - F_i^{FEM}(u_i, H))^2 \\ & + A (\varepsilon^{exp}(u_i) - \varepsilon^{FEM}(u_i, H))^2) \end{aligned} \quad (6)$$

と設定する。ここで、 N は実験のデータ数、 u_i は実験の変位である。ここで、 A は次元 (単位) をあわせるための定数で、残差計算中のひずみ評価の重み係数である。本報では、引張荷重とひずみの重みを同程度にするために、

$$A = \sum_{i=1}^N F^{exp}(u_i) / \sum_{i=1}^N \varepsilon^{exp}(u_i) \quad (7)$$

と設定した。これは、荷重の合計値とひずみの合計値の和をそろえるための式である。(A については、最終的に得られた荷重-変位線図およびひずみの結果を評価しながら、その値を変更していくのが最良である。例えば、 A に大きい値を入力すれば、実験のひずみの再現性の強い材料定数を得ることができる。)

以上より、式(6)の重み値を適切に設定すれば、荷重-変位線図の再現性のみならず、ひずみの変動も再現可能な弾

Fig.6 Procedure of the proposed determination technique for material properties

Unit : mm

Fig.7 Dimensions of test specimen

塑性材料定数を決定することができる。

式(6)を最小化するために構築したシステムを図6に示す。まず、GA のアルゴリズムに基づき、解析のための初期条件の範囲を入力する。(初期条件の値の範囲は、任意に設定する必要がある。しかし、使用する実数値 GA では、この範囲の外に収束解がある場合でも、追跡することが可能である。)

GA のアルゴリズムに基づき入力値が決定され、FEM を実行する。その結果に対して式(6)を計算すれば、残差 S を計算できる。次に、その値の判定 (収束性の判定) を行い、もし収束性が十分でない場合、再度、GA のアルゴリズムの元で新たな初期条件が設定され、FEM を再実行する。この手順を繰り返すことにより、式(6)を最小化する弾塑性材料定数を得ることができる。

4. 実験結果への適用

4.1 引張試験

PBT 樹脂 (東洋紡績製: EMC 700-01) を用いて、ダンベル型試験片 (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, チャック間有効距離 114 mm) を射出成形により成形した。その試験片形状を図7に示す。引張試験機には、インストロン万能試験機 (インストロン製: 3365 型ツインコラム試験システム) を用いた。クロスヘッドスピードは、ひずみ速度の影響を極力小さくするため、ひず

み速度が十分に遅い領域である 1 mm/min とした。ひずみ速度が十分に遅い場合、塑性変形による発熱は瞬間的に放熱し、常に放熱量が発熱量を上回り、ネック部の温度上昇がほとんど無い事が既に確認されている³⁰⁾。また、温度条件は室温 (23℃) 一定とした。さらに、引張試験時における試験片の変形状態をデジタル画像相関法 (DIC) で解析するため、図 8 に示すように、デジタルカメラ (富士写真フィルム製: FinePix S2 Pro) を設置した。この時、DIC の相関を得やすくする目的で、試験片表面に、スプレーによりランダムな白と黒の模様を吹き付けた。以上より得られた荷重-変位線図を図 9 に、撮影画像を図 10 に示す。図 10 の (a)~(f) は、それぞれ荷重-変位線図上の (a)~(f) のタイミングで撮影された画像と対応している。両図から、(a)~(d) までは、試験片はほぼ一様に変形しているが、(d) から (e) で引張荷重が急激に下がるタイミングで局所くびれが発生し、(e)~(f) 以降では、ネック伝ばしていく事がわかる。次節では、撮影した画像に DIC を適用し、定量的なひずみ分布を計算する。

4.2 弾塑性材料定数の同定

前節の引張試験結果および撮影画像から得られるひずみ

Fig. 8 Experimental apparatus for DIC in tensile test

Fig. 9 Experimental result of the load-displacement diagram

を解析した結果を式 (6) に入力し、材料定数を同定する。ここでは、弾塑性材料定数である真応力-塑性ひずみ関係 (加工硬化係数) を図 2 のように 5 直線で近似できると仮定して、それぞれの真応力-塑性ひずみの最適化演算を行った。ただし、図 2 の最後の立ち上がり部については、一定値を超えるとネック伝ば挙動にはほとんど変化が無いという知見^{23)~24)}により、ネック伝ばが起こる一定値を仮定した。また、図 9 の (a)~(c) では、材料は一様変形するため、真応力-対数ひずみ関係より算出した。つまり、図 2 の左から 4, 5 点目の位置 (それぞれの真応力と塑性ひずみ) を今回提案した手法により算出した。得られた真応力-塑性ひずみ関係の結果を図 11 に示す。また、入力した材料定数を定量的に記すために、図 12 で各パラメータを定義し、それらを表 1 に示す。ただし、図 12, 表 1 には便宜上、真応力-塑性ひずみ関係の勾配である加工硬化係数ではなく、真応力-対数ひずみ (全ひずみ) 関係の勾配である接線係数を示している。実際の FEM では GA によって最適化された加工硬化係数を用いて計算を実行している。なお、図 12 の bc 間は、一直線ではなく二直線で近似しているので、表 1 の H_1 には二つの数値を記載している。

以上の入力より計算される荷重-変位線図とネッキング発生開始位置におけるひずみ ϵ_x を図 13 に示す。その結果、FEM においても、実験と同様に荷重の低下と同じタイミングで ϵ_x が立ち上がる。FEM により得られた結果は、全

Fig. 10 Photographs of the specimen at necking region by DIC

Fig. 11 Relationship between true stress and plastic strain obtained by proposed technique

Fig. 12 Uniaxial true stress-logarithmic strain curve

Table 1 Conditions of FEM obtained by proposed technique

Young's modulus	E (GPa)	1.73
Poisson's ratio	ν (-)	0.38
Yield stress	σ_y (MPa)	24.5
Tangent modulus	H_1 (MPa)	1340, 85.3
Tangent modulus	H_2 (MPa)	64.2
Tangent modulus	H_3 (MPa)	20.1
Tangent modulus	H_4 (GPa)	1.47
Equivalent plastic strain	ϵ_{p2} (-)	0.0045, 0.070
Equivalent plastic strain	ϵ_{p3} (-)	0.170
Equivalent plastic strain	ϵ_{p4} (-)	1.10
Yield criteria	von Mises	
Hardening rule	Isotropic hardening

Fig. 13 Numerical result of load-displacement diagram with strain ϵ_x at position necking starts

領域で実験値と良く一致した。図 14 には、図 13 の ϵ_x を ϵ_y に置き換えた場合の結果を示す。この場合でも、両者はよく一致した。図 15, 16 に、変位が 22 mm の時における FEM と DIC のネッキング部の近傍におけるひずみ分布を比較した結果を示す。両図の解析結果は定量的にも良く一致している。以上より、今回適用した FEM と DIC を組み合わせたネック伝ば材の弾塑性材料定数の同定法の有効

Fig. 14 Numerical result of load-displacement diagram with strain ϵ_y at position necking starts

Fig. 15 Counter line diagrams of the strain ϵ_x around necked region

Fig. 16 Counter line diagrams of the strain ϵ_y around necked region

性を確認することができた。

5. 結 言

本論文では、引張試験でネッキングおよびネック伝ば現象が発生する PBT 試験片を対象として、従来の FEM を

利用した弾塑性材料定数の決定に関する問題点について整理し、改善策を提案した。提案方法は、引張試験の荷重-変位線図と変形中のひずみの再現性を評価しながら弾塑性材料定数を同定するものであり、以下に示す結論を得た。

- 1) 引張試験の荷重-変位線図を再現する弾塑性材料定数は、多数の候補があり一意に決定できない可能性がある。材料定数の差は、ネック伝ば現象が発生している場合のひずみに影響を与える。
- 2) ネック伝ば現象が発生している場合のひずみ計測方法には、非接触かつ大変形時の計測が可能なデジタル画像相関法 (DIC) が有効である。
- 3) DIC から得られるネック伝ば時のひずみデータと引張試験の変位-荷重の両材料定数を重み係数で結びつけ、最小化すべき関数を構築した。
- 4) 提案手法を PBT 試験片における材料定数の同定に適用し、得られた材料定数を用いて有限要素法 (FEM) を実施した結果、引張試験の荷重-変位線図のみならず、ネック伝ば現象が発生している場合のひずみも再現できることを確認した。また、ネック伝ば現象が発生している近傍部の DIC と FEM の結果を全視野で比較した結果、両者は定量的に良く一致した。これにより、PBT 成形品の材料モデルを弾塑性構成則とする仮定は、良好に試験を近似できるものであることを確認した。

参 考 文 献

- 1) 富田佳宏：数値弾塑性力学 有限要素シミュレーション—基礎と応用，155(1990)，養賢堂
- 2) 富田佳宏，高橋孝幸，進藤明夫：日本機械学会論文集，A-56(1)，121(1990)
- 3) Tomita, Y., Takahashi, Y. and Shindo, A. : *Intern. J. Mech. Sci.*, **32**(4), 335(1990)
- 4) 富田佳宏，林健一：日本機械学会論文集，A-58(4)，647(1992)
- 5) 富田佳宏，林健一，田中繁之：日本機械学会論文集，A-58(10)，1859(1992)
- 6) Tomita, Y. and Hayashi, K. : *Intern. J. Solids Struct.*, **30**(2), 225(1993)
- 7) 富田佳宏，田中繁之：日本機械学会論文集，A-61(1)，120(1995)
- 8) Hutchinson, J. W. and Neale, K. W. : *J. Mech. Phys. Solids*, **31**(5), 405(1983)
- 9) Neale, K. W. and Tugcu, P. : *J. Mech. Phys. Solids*, **33**(4), 323(1985)
- 10) Tugcu, P. and Neale, K. W. : *Intern. J. Solids Struct.*, **23**(7), 1063(1987)
- 11) Tugcu, P. and Neale, K. W. : *Intern. J. Mech. Sci.*, **29**(12), 793(1987)
- 12) Tugcu, P. and Neale, K. W. : *J. Eng. Mater. Tech., Trans. ASME*, **110**(4), 395(1988)
- 13) Neale, K. W. and Tugcu, P. : *Intern. J. Numer. Methods Eng.*, **25**(2), 99(1988)
- 14) Marquez-Lucero, A., G'Sell, C. and Neale, K. W. : *Polymer*, **30**(4), 636(1989)
- 15) G'Sell, C. and Marquez-Lucero, A. : *Polymer*, **34**, 2740(1993)
- 16) Fager, L. O. and Bassani, J. L. : *Intern. J. Solids Struct.*, **22**(11), 1243(1986)
- 17) Fager, L. O. and Bassani, J. L. : *Mech. Mater.*, **9**(3), 183(1990)
- 18) Nimmer, R. P. : *Polym. Eng. Sci.*, **23**(3), 155(1983)
- 19) Nimmer, R. P. and Miller, L. C. : *J. Appl. Mech., Trans. ASME*, **51**(4), 759(1984)
- 20) Nimmer, R. P. : *Polym. Eng. Sci.*, **27**(1), 16(1987)
- 21) Nimmer, R. P. : *Polym. Eng. Sci.*, **27**(4), 263(1987)
- 22) 岡崎剛，石川優：成形加工シンポジウム'06, 275(2006)
- 23) 野々村千里，鈴木利武，石原英昭：成形加工，**4**(9)，583(1992)
- 24) 野々村千里，鈴木利武，石原英昭：成形加工，**5**(1)，60(1993)
- 25) 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)
- 26) Nonomura, C., Yamashita, K., Ito, K., Suzuki, T., Ishihara, H., Nakai, A., Yokoyama, A. and Yamada, T. : *Plastics, Rubber, Composites-Processing & Applications*, **30**(10), 468(2001)
- 27) Toda, A., Tomita, C., Hikosaka, M., Hibino, Y., Miyaji, H., Nonomura, C., Suzuki, T. and Ishihara, H. : *Polymer*, **43**(3), 947(2002)
- 28) 野々村千里，山下勝久，丹下章男，上辻靖智，横山敦士，山田敏郎：成形加工，**13**(5)，323(2001)
- 29) Yamashita, K., Ito, K., Tange, A., Nonomura, C., Watanabe, D., Nakai, A., Yokoyama, A. and Yamada, T. : *Plastics, Rubber, Composites-Processing & Applications*, **30**(10), 477(2001)
- 30) 山下勝久，丹下章男，野々村千里，仲井朝美，山田敏郎：成形加工，**16**(10)，666(2004)
- 31) Bruck, H. A., McNeill, S. R., Sutton, M. A. and Peters III, W. H. : *Exp. Mech.*, **29**(3), 261(1989)
- 32) 樋口隆英，筒井茂義，山村雅幸：人工知能学会論文誌，**16**(1)，147(2001)
- 33) 小野功，佐藤浩，小林重信：人工知能学会論文誌，**14**(6)，1146(1999)
- 34) 佐藤浩，小野功，小林重信：人工知能学会論文誌，**12**(5)，734(1997)