

## 延伸高分子材料における異方弾性定数の予測\*

佐野村幸夫<sup>\*1</sup>, 早川邦夫<sup>\*2</sup>, 水野 衛<sup>\*3</sup>  
春日幸生<sup>\*1</sup>, 川森重弘<sup>\*1</sup>

### Prediction of Anisotropic Elastic Constants in Drawn Polymers

Yukio SANOMURA, Kunio HAYAKAWA, Mamoru MIZUNO  
Yukio KASUGA and Shigehiro KAWAMORI

Anisotropic elastic constants of constitutive equation of drawn polymers derived by Rivlin and Ericksen's representation theory of tensor-valued function of tensor variables in the field of nonlinear continuum mechanics are predicted. The general expression of the fourth rank elastic tensor  $C_{ijkl}$  is given by the isotropic tensor  $\delta_{ij}$  and the internal variable tensor  $\omega_j$  according to the representation theory. The form of  $C_{ijkl}$  is simplified by assuming the material to be orthotropic. As the internal variable tensor, the logarithm of drawn ratios or deviator tensor of refractive index are employed independently. By comparing the calculated results with experimental ones, it is shown that this model can describe the experimental results of semicrystalline and amorphous drawn polymers.

*Key Words*: Drawn Polymers, Anisotropic Elastic Constants, Internal Variable, Draw Ratio, Birefringence, Nonlinear Continuum Mechanics

#### 1. 結 論

熱可塑性高分子材料を延伸加工すれば、延伸方向に分子鎖が並んで、分子配向するだけでなく、高次構造変化を生じるために、著しい剛性と強度の向上が図れる<sup>1)-4)</sup>。このような性質を利用して、合成繊維、延伸フィルム、延伸ブロー成形によるポリエチレンテレフタレート(PET)ボトルなどの工業製品が生産されている。

一般に、このような延伸材料の力学的性質は著しい異方性をもつだけでなく、延伸に伴ってその力学的性質が変化する。したがって、延伸材料の変形と破壊挙動を予測するためには、まずこのような力学的性質を精密に求める必要がある。Wardら<sup>2)</sup>は、繊維とフィルムの異方弾性定数の予測をするために、ReussとVigotの仮定を用いたaggregate modelを提案した。このモデルでは、擬アフィン変形を仮定し、まず複屈折-延伸比関係から延伸方向と対称軸の間の角度を求めて計算したが、実験結果を表現することができなかった。その後、角度をX線回折と核磁気共鳴によって求めることにより、実験結果を適切に予測できた。一方Ibrahimら<sup>5)</sup>は、一軸延伸ポリプロピレン(PP)の異方弾性定数を、PPの結晶性の体積分率ならび

に結晶相と非晶相の配向関数から予測した。しかし、これらの手法は内部構造を精密に計測する必要があり、困難を伴う。また、延伸ブロー成形によるPETボトルの成形シミュレーションから製品の異方性弾性率分布を求めた研究が公表されたが、その詳細はまだ明らかにされていない<sup>6)</sup>。

本論文では、非線形連続体理論を用いて定式化した延伸高分子材料の異方弾性定数を予測する。Rivlin-Ericksenの表現定理により、最も一般的な4階の異方弾性定数テンソルを2階対称なテンソル変数(内部状態変数)で記述する。さらに、高分子材料は直交異方性以上の複雑な異方性を持たないものとして、直交異方性材料における異方弾性定数を導く。内部状態変数として、延伸比あるいは複屈折をそれぞれ独立して用いる。最後に、本論文における異方弾性定数の計算結果を既報の実験結果と比較し、本手法の妥当性を検討する。

#### 2. 延伸高分子材料の異方弾性構成モデル

延伸高分子材料の弾性定数テンソルは、2階対称なテンソル変数 $\omega$ (内部状態変数)で記述できるものと仮定すれば、次のような一般化されたHookeの法則が成立する<sup>7), 8)</sup>。

$$\sigma = C(\omega) : \varepsilon^e \quad (1)$$

\*原稿受付 2003年 月 日。

<sup>\*1</sup>正員, 玉川大学(〒194-8610 町田市玉川学園6-1-1)。

<sup>\*2</sup>正員, 静岡大学(〒432-8561 浜松市城北3-5-1)

<sup>\*3</sup>正員, 秋田県立大学(〒015-0055 本荘市土谷字海老ノ口84-4)

ここで、 $\sigma$ 、 $\varepsilon^e$  および  $C(\omega)$  は、それぞれ応力、弾性ひずみおよび 4 階の弾性定数テンソルを表す。なお応力とひずみは、2 階対称なテンソルである。

さて、Rivlin-Ericksen の表現定理によれば、4 階のテンソル  $C$  の最も一般的な表現は、2 階対称な等方テンソル  $\delta_{ij}$  と内部状態変数テンソル  $\omega_{ij}$  を用いて次式で与えられる<sup>9), 10)</sup>。

$$\begin{aligned} C_{ijkl} = & \lambda \delta_{ij} \delta_{kl} + \mu (\delta_{ik} \delta_{jl} + \delta_{il} \delta_{jk}) + \nu \delta_{ij} \omega_{kl} + \pi \omega_{ij} \delta_{kl} \\ & + \rho (\delta_{ik} \omega_{jl} + \delta_{il} \omega_{jk} + \delta_{jk} \omega_{il} + \delta_{jl} \omega_{ik}) \\ & + A \omega_{ij} \omega_{kl} + B \delta_{ij} \Omega_{kl} + C \Omega_{ij} \delta_{kl} \\ & + D (\delta_{ik} \Omega_{jl} + \delta_{il} \Omega_{jk} + \delta_{jk} \Omega_{il} + \delta_{jl} \Omega_{ik}) \\ & + G \omega_{ij} \Omega_{kl} + H \Omega_{ij} \omega_{kl} + K \Omega_{ij} \Omega_{kl} \end{aligned} \quad (2a)$$

$$\Omega_{ij} = \omega_{ik} \omega_{kj}, \quad \Omega_{ij} = \Omega_{ji} \quad (2b)$$

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 1 & (i = j) \\ 0 & (i \neq j) \end{cases} \quad (2c)$$

ここで、 $\lambda$  および  $\mu$  は Lamé の定数、 $\nu$ 、 $\pi$ 、 $\rho$ 、 $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $D$ 、 $G$ 、 $H$  および  $K$  は材料定数である。未延伸状態 ( $\omega = \mathbf{0}$ ) のとき、式(2)は等方性材料の弾性定数に一致する。

本論文では、延伸高分子材料は直交異方性より複雑な異方性を持たないものと仮定して、式(2)から直交異方性の場合の弾性定数を導く。内部状態テンソル  $\omega$  の主方向を、座標軸  $O-x_1, x_2, x_3$  に一致させた場合、2 つの 2 階対称なテンソル  $\omega$  は

$$\omega = \begin{bmatrix} \omega_1 & 0 & 0 \\ 0 & \omega_2 & 0 \\ 0 & 0 & \omega_3 \end{bmatrix} \quad (3a)$$

と書ける。本論文では、この主方向あるいは主軸を対称軸とする直交異方性材料を考える。

直交異方性材料に対する Hooke の法則を Voigt 表記で表現すれば次式となる。

$$\begin{Bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \tau_{23} \\ \tau_{13} \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_{11}^e \\ \varepsilon_{22}^e \\ \varepsilon_{33}^e \\ \gamma_{23}^e \\ \gamma_{13}^e \\ \gamma_{12}^e \end{Bmatrix} \quad (4)$$

すなわち、この弾性定数テンソル  $C$  は 9 個の独立な弾性定数をもつ。

一方、式(4)を考慮すれば、式(2)中の材料定数には次のような関係が成立する。

$$\nu = \pi, \quad B = C, \quad G = 0, \quad H = 0 \quad (5)$$

したがって、直交異方性の場合、式(2)は次のように内部状態変数と Lamé の定数ならびに新たに導入した 6 個の材料定数を用いて表現できる。

$$\left. \begin{aligned} C_{11} &= \lambda + 2\mu + (2\nu + 2\rho)\omega_1 \\ &\quad + (A + 2B + 4D)\omega_1^2 + K\omega_1^4 \\ C_{22} &= \lambda + 2\mu + (2\nu + 2\rho)\omega_2 \\ &\quad + (A + 2B + 4D)\omega_2^2 + K\omega_2^4 \\ C_{33} &= \lambda + 2\mu + (2\nu + 2\rho)\omega_3 \\ &\quad + (A + 2B + 4D)\omega_3^2 + K\omega_3^4 \\ C_{12} &= \lambda + \nu(\omega_1 + \omega_2) + A\omega_1\omega_2 \\ &\quad + B(\omega_1^2 + \omega_2^2) + K\omega_1^2\omega_2^2 \\ C_{13} &= \lambda + \nu(\omega_1 + \omega_3) + A\omega_1\omega_3 \\ &\quad + B(\omega_1^2 + \omega_3^2) + K\omega_1^2\omega_3^2 \\ C_{23} &= \lambda + \nu(\omega_2 + \omega_3) + A\omega_2\omega_3 \\ &\quad + B(\omega_2^2 + \omega_3^2) + K\omega_2^2\omega_3^2 \\ C_{44} &= \mu + \rho(\omega_2 + \omega_3) + D(\omega_2^2 + \omega_3^2) \\ C_{55} &= \mu + \rho(\omega_1 + \omega_3) + D(\omega_1^2 + \omega_3^2) \\ C_{66} &= \mu + \rho(\omega_1 + \omega_2) + D(\omega_1^2 + \omega_2^2) \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

ここで、1 軸方向の 1 軸延伸を考えると、分子鎖の配向方向は 1 軸となり、その垂直方向の 2 軸および 3 軸における内部状態変数  $\omega_2$  および  $\omega_3$  については  $\omega_2 = \omega_3$  が仮定でき、この材料は横等方性 (transverse isotropy) を示す。このとき、式(6)から、独立な弾性定数は次の 5 個となる。

$$\left. \begin{aligned} C_{11}, C_{22} = C_{33}, C_{12} = C_{13}, \\ C_{55} = C_{66}, C_{44} = (C_{22} - C_{23})/2 \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

### 3. 延伸高分子材料の内部状態変数

**3・1 延伸比による定義** 一般に、延伸高分子材料の弾性定数は、延伸温度、延伸速度ならびに延伸比に依存する。延伸温度と延伸速度を一定とすれば、弾性定数は延伸比だけで表現できる<sup>11), 12)</sup>。内部状態変数は、最も簡単な形として延伸比を用いて、対数ひずみのように

$$\omega = \begin{bmatrix} \ln \beta_1 & 0 & 0 \\ 0 & \ln \beta_2 & 0 \\ 0 & 0 & \ln \beta_3 \end{bmatrix} \quad (8)$$

と記述する。ここに  $\beta_1, \beta_2, \beta_3$  は、それぞれ主延伸比を表す。延伸比とは、繊維やフィルムの延伸によく用いられる用語であり、主延伸比とは主ストレッチと一致する。この延伸比の対数を取ったものは、この分野では、通常 Hencky ひずみと呼ばれている。このとき、未延伸状態では  $\omega = \mathbf{0}$  を満

足する．さらに，高分子材料の非圧縮性を仮定し，各主延伸比には次の関係が成立するものとする．

$$\beta_1\beta_2\beta_3 = 1 \quad (9)$$

**3・2 複屈折による定義** 延伸温度や延伸速度が変化する場合には，延伸高分子材料の異方弾性定数を延伸比だけで表現するのは困難である．

一般に，高分子材料は，変形に伴い分子鎖の配向に関連する光学的異方性が現れ，その分子鎖の配向は複屈折と対応している<sup>13)14)</sup>．さらに，非晶性高分子材料だけでなく，結晶性高分子材料でも延伸比が大きくなれば，透明となり屈折率を測定できる．

本論文では，延伸温度や延伸速度が変化する場合の内部状態変数として，坂本<sup>15)</sup>が2軸延伸PETフィルム of 引張強さを整理するために提案している新しい複屈折の定義と類似のものとして，次のような屈折率テンソル $n$ の偏差テンソルを用いる．

$$\omega = n - \frac{1}{3}(\text{tr } n)\delta$$

$$= \begin{bmatrix} n_1 & 0 & 0 \\ 0 & n_2 & 0 \\ 0 & 0 & n_3 \end{bmatrix} - \left( \frac{n_1 + n_2 + n_3}{3} \right) \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

ここで， $n_1$ ， $n_2$ ，および $n_3$  はそれぞれ屈折率テンソル $n$ の主値である．

さらに，複屈折 $\Delta n_1$ ， $\Delta n_2$  および $\Delta n_3$  を

$$\Delta n_1 = n_3 - n_2, \Delta n_2 = n_1 - n_3, \Delta n_3 = n_2 - n_1 \quad (11)$$

のように定義すると，式(10)は次式のように表現できる．

$$\omega = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} \Delta n_2 - \Delta n_3 & 0 & 0 \\ 0 & \Delta n_3 - \Delta n_1 & 0 \\ 0 & 0 & \Delta n_1 - \Delta n_2 \end{bmatrix} \quad (12)$$

なお，未延伸状態では高分子材料は光学的等方性を示し，屈折率は $n_1 = n_2 = n_3$ となるので，式(11)および(12)から $\omega = 0$  となり，弾性特性は等方的となる．

ここで，3 軸方向に一軸延伸する場合を考える．このとき，分子鎖は 3 軸方向に配向し，配向方向と垂直な方向である 1 軸および 2 軸における屈折率 $n_1$  および $n_2$  は等しいと仮定すると次式が成立する．

$$\Delta n_1 = -\Delta n_2 \equiv \Delta n, \quad \Delta n_3 = 0 \quad (13)$$

これを式(12)に代入すると次式を得る．

$$\omega = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} -\Delta n & 0 & 0 \\ 0 & -\Delta n & 0 \\ 0 & 0 & 2\Delta n \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots(14)$$

式(14)および式(6)から，3軸方向の1軸延伸において材料は横等方性を示す．このことは，本論文において定義した式(10)が，高分子材料の異方弾性特性を規定する内部状態変数として用いることの妥当性を示すものといえる．

#### 4．計算結果と実験結果との比較

Fig.1(a)(b)(c)は，それぞれ1軸延伸した塩化ビ

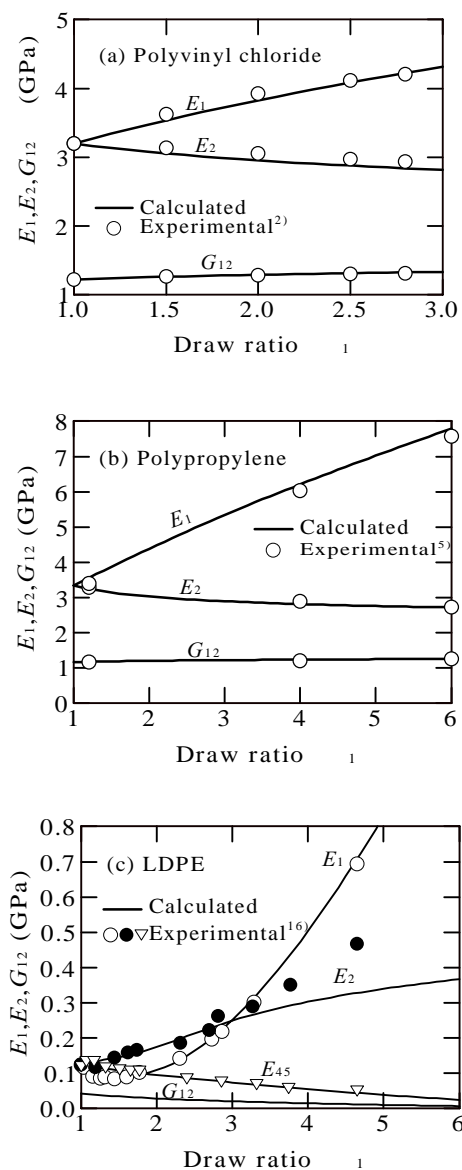


Fig. 1 Comparison of calculated results with observed elastic moduli as a function of draw

ニル<sup>2)</sup> (非晶性高分子材料), ポリプロピレンフィルム<sup>5)</sup> (結晶性高分子材料) および低密度ポリエチレン<sup>16)</sup> (結晶性高分子材料) に対する異方弾性定数の実験結果と計算結果を示す. 内部状態変数として, 式(8)の延伸比を用いた.

材料定数のうち,  $\lambda$  と  $\mu$  は, 未延伸材料の値を用いた. また,  $\nu, \rho, A, B, D$  および  $K$  のうち 3 つの材料定数を決定し, そのほかの定数は零とした. 計算に用いた材料定数を次に示す.

$$\left. \begin{aligned} \lambda &= 7.633 \text{ GPa}, \mu = 1.164 \text{ GPa}, \nu = 2.00 \text{ GPa}, \\ \rho &= 0.10 \text{ GPa}, A = 0.70 \text{ GPa}, \\ B &= D = K = 0 \text{ GPa} \quad (\text{Polypropylene}) \end{aligned} \right\} (15b)$$

$$\left. \begin{aligned} \lambda &= 1.988 \text{ GPa}, \mu = 1.22 \text{ GPa}, \nu = 0.01 \text{ GPa}, \\ \rho &= 0.20 \text{ GPa}, A = 0.15 \text{ GPa}, \\ B &= D = K = 0 \text{ GPa} \quad (\text{Polyvinyl chloride}) \end{aligned} \right\} (15a)$$

$$\left. \begin{aligned} \lambda &= 0.636 \text{ GPa}, \mu = 0.042 \text{ GPa}, \rho = -0.04 \text{ GPa}, \\ A &= 0.05 \text{ GPa}, K = 0.17 \text{ GPa}, \\ \nu &= B = D = 0 \text{ GPa} \quad (\text{LDPE}) \end{aligned} \right\} (15c)$$

本計算における  $E_1, E_2$  および  $G_{12}$  については, 式

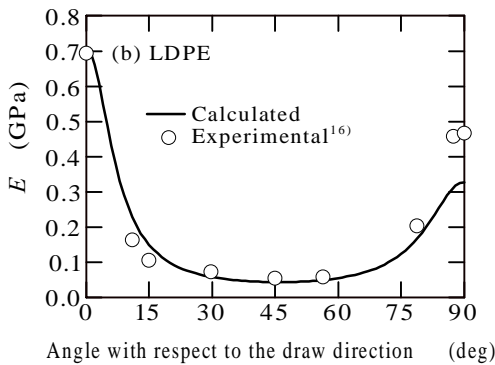
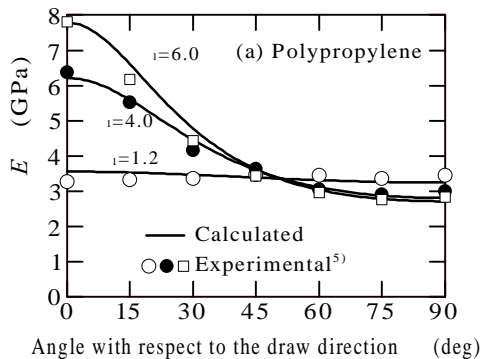


Fig. 2 Comparison of calculated results with experimental results for tensile moduli as a function of angle with respect to the draw direction.

(4) における弾性係数テンソル  $C$  の逆行列を計算し, 次式の工学的弾性係数を用いた直交異方弾性ひずみ - 応力の関係式と比較することにより求めた.

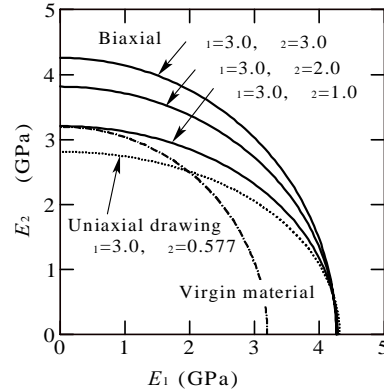


Fig. 3 Polar plots of calculated results in moduli under uniaxial and biaxial drawn polyvinyl chloride.

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{13} \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{12}}{E_2} & -\frac{\nu_{13}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{12}}{E_2} & \frac{1}{E_2} & -\frac{\nu_{23}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{13}}{E_3} & -\frac{\nu_{23}}{E_3} & \frac{1}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{23}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{13}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \tau_{23} \\ \tau_{13} \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} (16)$$

Fig.1 中の実線と各記号は, それぞれ計算結果および実験結果を表す. また, 図中の  $E_1, E_2$  および  $G_{12}$  は, それぞれ延伸方向の縦弾性係数, 延伸方向と直角方向の縦弾性係数ならびに横弾性係数である. さらに, Fig.1(c) の  $E_{45}$  は延伸方向と  $45^\circ$  傾いた方向における縦弾性係数を表す.

一方, Fig.2 は, ポリプロピレンフィルムおよび低密度ポリエチレンの延伸方向と角度  $\phi$  傾いた方向の縦弾性係数  $E_\phi$  を示し, 次式で求まる.

$$\begin{aligned} S_{11}(\phi) &= S_{11} \cos^4 \phi + (2S_{12} + S_{66}) \cos^2 \phi \sin^2 \phi + S_{22} \sin^4 \phi \\ E_\phi &= 1/S_{11}(\phi) \end{aligned} (17)$$

Fig.1 および Fig.2 に見られるように, いずれの材料においても計算結果は, 実験結果に見られる異方弾性定数を適切に表現できることがわかる.

Fig.3 は, Fig.1(a) で定めた材料定数を用いて, 1 軸あるいは種々の 2 軸延伸を行ったときの弾性係数  $E_1$  および  $E_2$  の関係を示す. 1 軸延伸の場合, 延伸軸方向に垂直な方向の縦弾性係数  $E_2$  が未延伸材料のそれよりも減少する. 一方, 実線で示される

2 軸延伸の場合，幅方向の変形を拘束した場合 ( $\beta_1=3.0, \beta_2=1.0$ ) では，延伸方向のみの縦弾性係数が増加し， $E_2$ の変化は見られないが， $\beta_2$ の増加とともに $E_2$ も増加し，等 2 軸延伸 ( $\beta_1=\beta_2=3.0$ ) では， $E_1=E_2$ となり，材料は面内等方性となることがわかる．

Fig.4 および 5 は，内部状態変数として複屈折を考えた場合の式(14)を使用した場合のPMMAおよび PETにおける弾性コンプライアンス $S_{ij}$ の各成分の計算結果と実験結果<sup>13), 14)</sup>との比較を示す．図中の実線と種々の記号は，それぞれ計算結果と実

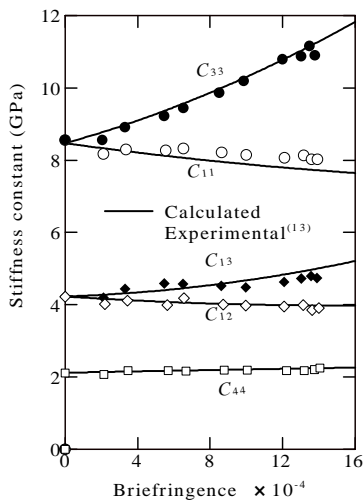


Fig.4 Comparison of calculated results with observed elastic moduli as a function of birefringence in drawn PMMA.

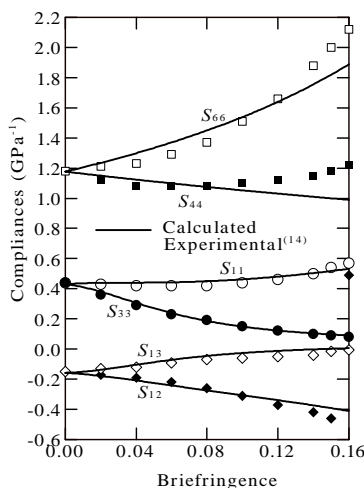


Fig. 5 Comparison of calculated results with observed elastic compliances as a function of birefringence in drawn polyethylene terephthalate.

験結果を示す．Fig.5 の縦軸の弾性コンプライアンス $S_{ij}$ については，式(4)の弾性定数行列 $C_{ij}$ の逆行列と次式の直交異方性弾性体の弾性ひずみ - 応力関係式から求めた．

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{13} \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & 0 & 0 & 0 \\ S_{12} & S_{22} & S_{23} & 0 & 0 & 0 \\ S_{13} & S_{23} & S_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \tau_{23} \\ \tau_{13} \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} \quad (17)$$

また，計算には次の材料定数を用いた．

$$\left. \begin{aligned} \lambda &= 4.23\text{GPa}, \mu = 2.12\text{GPa}, \nu = 5.0 \times 10^2 \text{GPa} \\ \rho &= 2.7 \times 10^2 \text{GPa}, B = 5.0 \times 10^5 \text{GPa}, \\ A &= D = K = 0 \text{GPa} \quad (\text{PMMA}) \end{aligned} \right\} \quad (18a)$$

$$\left. \begin{aligned} \lambda &= 2.27\text{GPa}, \mu = 0.85\text{GPa}, \nu = 1.0\text{GPa}, \\ \rho &= 3.0\text{GPa}, A = 5.0 \times 10^2 \text{GPa}, \\ B &= D = K = 0 \text{GPa} \end{aligned} \right\} \quad (18b)$$

(Polyethylene terephthalate)

これらの図から，いずれの材料においても計算結果は，実験結果を適切に表現することがわかる．

## 5 . 結 言

延伸高分子材料の異方弾性構成モデルを，Rivlin-Ericksen の表現定理による非線形連続体力学を適用して定式化し，その異方弾性定数を求める手法を導いた．高分子材料の内部状態変数変数として，延伸比または複屈折を採用した．定式化した異方弾性定数に対する計算結果を，既報の実験結果と比較したところ，両者はよく一致した．したがって，本手法は延伸高分子材料の異方弾性定数の予測に有効であると考えられる．

## 謝 辞

本研究は日本塑性加工学会シミュレーション統合システム分科会「構成式の開発と汎用有限要素法プログラムへの組込み研究班」の活動の一部であり，また，平成 12 年度玉川大学学術研究所研究活動等助成金ならびに平成 16 年度玉川大学工学部共同研究助成金を受けている．ここに記して謝意を表す．

## 参 考 文 献

- 1) 中山和郎，海藤彰，高分子をならべる，(1993)，共立出版．

- 2) I.M. Ward , *Mechanical Properties of Solid Polymers 2<sup>nd</sup> edition*, (1985), John Wiley & Sons.
- 3) I. M. Ward (ed.), *Structure and Properties of Oriented Polymers 2<sup>nd</sup> edition*, (1997), Chapman & Hall.
- 4) I. M. Ward, P. D. Coates and M. M. Dumoulin, *Solid Phase Processing of Polymers*, (2000), Hanser.
- 5) A. M. Ibrahim, A. R. Wedgewood and J. C. Seferis, *Polymer Engineering and Science*, **26-9** (1986), 593-599.
- 6) H. -J. Park, H. Sohn, J. R. Kim and I. S. Yoon, 成形加工 '03 , (2003) , 319-320.
- 7) J . P . Cordebois and F. Sidoroff : J.P.Boehler 編, *Mechanical Behavior of Anisotropic Solids*, (1982), 761, Martinus Nijhoff.
- 8) 村上澄男 , 富永道明 , 栄輝 , 日本機械学会論文集(A編) , **56- 531** (1990) , 2217--2304.
- 9) A. Baltov and A. Sawczuk , *Acta Mech.*, **1/2** (1965), 81-92.
- 10) S. Murakami and A. Sawczuk , *Nuclear Engineering and Design*, **65** (1981) , 33-47.
- 11) 佐野村幸夫 , 成形加工 , **12-11**(2000) , 736-741.
- 12) Y. Sanomura, *Material Science Research International*, (2003), in print.
- 13) H. Wright, C. S. N. Faraday, E. F.T. White and L. R. G. Treloar, *J. Phys. D, Appl. Phys.*, **4**(1971), 2002-2014.
- 14) G. Raumann , *Brit. J. Appl. Phys.*, **14**(1963), 795-799.
- 15) 坂本国輔 , 高分子論文集 , 48-3(1991) , 181-184.
- 16) G. Raumann and D. W. Saunders, *Proc. Phys. Soc.*, **77** (1961), 1028-1037.