ABS 樹脂射出成形における保圧条件が 収縮率異方性に与える影響

亀田 隆夫^{*1}・高橋 辰宏^{*2}・小山 清人^{*2}

Effect of Packing Pressure on the Shrinkage Anisotropy of Injection Molded Parts of Acrylonitrile-butadiene-styrene (ABS) Resins

Kameda, Takao^{*1}/Takahashi, Tatsuhiko^{*2}/Koyama, Kiyohito^{*2}

The size of the dependence of the shrinkage anisotropy in different locations of injection molded parts is not frequently reported (shrinkage calculated by comparing the actual plastic parts to the metal mold, while anisotropy refers to differences in the melt flow (MD) and the transverse (TD) directions). In this study, the effects of packing pressure (from 20 to 100 MPa) in the injection molding process on the shrinkage anisotropy at two positions in a molded part were investigated in two ABS resins. The shrinkage anisotropy decreased as a function of packing pressure at both locations, although at different rates. It was found that the shrinkage anisotropy at these two positions was quite similar at around 60 MPa. It was also found that the screw head moved forward (backward) at pressures higher (lower) than 60 MPa. At a packing pressure of 60 MPa the screw head position was almost constant during the packing process in a plunger type injection molding machine where the polymer melt can hardly flow backwards.

In order to get further insight into the causes of the shrinkage anisotropy, birefringence measurements were performed with a transparent ABS resin. The measured birefringence at the two locations of the injection molded part were in good agreement with the respective shrinkage anisotropy values. Moreover, the packing pressure dependence seen in the shrinkage anisotropy was found to be similar for that of birefringence. It was demonstrated that a difference in molecular orientation in the two directions (MD and TD), caused the shrinkage anisotropy, and that the ratio of molecular orientation difference becomes almost identical at the two locations at around 60 MPa of packing pressure.

Key words : Injection molding/Packing pressure/Shrinkage anisotropy/Birefringence/
Molding conditions

1. 緒 言

プラスチック成形加工法の一つである射出成形は、短時間に製品を加工できることから広く利用されている。射出成形品は、成形中に溶融樹脂が固化するときに起こる体積

収縮と、固化した後の熱収縮により成形収縮と呼ばれる現象が起こる¹⁾。また、成形収縮は、プラスチック材料の種類や含有物の種類や量によって異なることが知られている。

射出成形は、樹脂を金型内に流し込む充填過程、その後、樹脂の冷却に伴って起こる体積収縮を補うため、所定の圧力で樹脂を金型内に充填する保圧過程を経て、金型内である程度冷却され、成形品が取り出されるといういくつかの素過程が存在する²⁾。射出成形において溶融樹脂を金型内に充填するとき、樹脂の分子が流動方向に配向すると考えられる。また、配向によって機械物性も変化することが知られている^{3), 4)}。成形条件や分子の配向によって成形収縮が成形品内で変化すると、金型に彫り込まれた形状と異なる成形品が得られることになり、結果としてそり変形などの不具合を発生させると考えられる。

^{*1} 三光合成(株) 技術本部商品開発部
南砺市是安 4185 (〒939-1852)
Sankogosei Ltd., Technical Center
4185, Koreyasu, Nanto 939-1698, Japan

^{*2} 山形大学工学部機能高分子工学科
米沢市城南 4-3-16 (〒992-8510)
Department of Polymer Science and Engineering Faculty of
Engineering, Yamagata University
4-3-16, Jounan, Yonezawa 992-8510, Japan
2004. 9. 28 受理

射出成形品の成形収縮の流動方向（MD）とそれに直交する方向（TD）に対する異方性について Jansen らは、異なる材料において成形収縮率の充填速度、保圧圧力、溶融樹脂温度あるいは金型温度の影響を評価している⁵⁾。Chang は、手法として実験計画法を用いることにより、さらに保圧時間、射出圧力あるいは冷却時間といった成形条件の切り分けを行い、成形収縮に対する成形条件の寄与率を求めている⁶⁾。これらの報告において成形品全体の成形収縮は、保圧圧力や樹脂温度に大きく依存するという結果を得ている。また、これらの報告は、成形品全体の平均的な成形収縮を検討しているが、成形品内の分布について詳細な検討までは行っていない。一方、Leo らは、製品厚さ方向に対する成形収縮分布に対する保圧圧力の影響を製品内の樹脂圧力変化から評価している⁷⁾。この報告において板厚方向の成形収縮率の分布は、保圧圧力に大きく影響するという結果を得ている。このように、保圧圧力は、成形収縮率を変化させることはわかってきている。Jansen は、成形品内における成形収縮率の場所による依存性、特に MD と TD 方向の異方性分布に関する報告を行っている⁸⁾。この報告は、ポリプロピレンを用いて結晶性樹脂の成形収縮異方性分布の成形条件依存性を線膨張率の異方性から議論している。この結果、収縮異方性は、配向結晶化と結晶化度に大きく依存すると結論づけているが、非晶性の樹脂に関する議論までは行われていない。これらの成形収縮を解析的に求める試みも行われており、樹脂圧力の時間変化や残留応力に依存すると考えられている⁹⁾。

成形収縮は、溶融樹脂が冷却される過程で起こることから、射出成形品の線膨張係数に関する研究も行われている。瀬戸らは、射出成形品の線膨張係数に対しても異方性が生じることを報告している¹⁰⁾。この結果から、溶融状態の樹脂が固化し、さらに熱収縮により起こる成形収縮率も、また異方性を持つと考えられる。この線膨張係数の異方性は、分子配向と相関があるという報告もある¹¹⁾。この報告では、成形品の分子配向測定において分子配向計を用いているため、成形品を薄片に切り出し測定を行う必要がある。射出成形品の成形収縮の異方性は、成形品内の平均的な配向に依存すると考えられる。通常の成形品における厚さ方向の平均的な分子配向を測定することは、分子配向計を用いる手法では難しいと考えられる。

保圧過程における成形条件が、成形収縮率に大きな影響を与えることと考えられるが、成形条件依存性を検討するとき、成形機の作動を切り分けることは成形機の特性もあり射出成形機の設定値を変更するだけでは困難である^{12), 13)}。特に通常のインラインスクリュ射出成形機は、射出条件により逆流防止リングの作動が変化する事が知られており、リングが固定されるまでは、樹脂がスクリュ側に逆流する¹⁴⁾。このため、計量された溶融樹脂を金型内にそのまま充填することは非常に困難である。保圧過程における樹脂の動きは、配向に影響を与えることが考えられ、通常のインライン射出成形機を用いた場合、スクリュ位置の測定から樹脂の動きをとらえることは難しいと考えられる。

射出成形品の収縮異方性の成形品内分布は、分子配向と関係があると考えられるが、配向の測定が難しい非晶性樹脂に関する報告は少ない。本報告は、非晶性樹脂の中でも

収縮異方性に対して特異な現象を示した ABS 樹脂射出成形品における、保圧圧力に対する成形収縮異方性の成形品内分布を実験的に検討した。また、逆流防止機構を持たなくても樹脂の逆流が起こりにくいスクリュプリブラ式射出成形機を用いることで、保圧過程における溶融樹脂の流動状況をプランジャー位置の変化から確認することを試みた。さらに、収縮異方性の発現は、射出成形過程で固定化された分子配向に起因すると考え、透明 ABS を用いて光学異方性の分布と収縮異方性との関係を議論する。

2. 実 験

2.1 試料および試験片形状

本実験で用いた試料は、非晶性の非強化熱可塑性樹脂である汎用 ABS（スタイラック ABS 100：旭化成工業製）を用いた。また、保圧圧力の変化による配向分布を複屈折測定より検討するため、透明 ABS（デンカ ABS CL-301：電気化学工業製）を用いた。試験片は、図 1 に示す、長さ 200 mm、幅 40 mm、厚さ 2 mm の平板で、流動方向が長さ方向と同じになるように曲面加工されたファンゲートから樹脂を充填することによって得られた。

2.2 成形および成形品調製

本研究では、ソディック社製スクリュプリブラ式射出成形機 TR-150 S を用いてサンプルを成形した。成形機のノズル部分に、保圧過程における溶融樹脂の圧力を測定するためのダイニスコ社製樹脂圧力センサー NP-465 XL を挿入した。表 1 に示す標準の成形条件に設定された成形機により溶融樹脂は、成形品に一定の射出率で充填された。その後、保圧過程において一定の所定圧力を維持しながら充填されることにより成形品を得た。本研究において、成形品は、成形後 $23 \pm 2^\circ\text{C}$ 、 $50 \pm 10\%$ R.H. 中で 20 日間保管され、その後成形収縮測定に供された。

2.3 成形品の成形収縮測定

成形品は、東京精密社製 QM-1000 マイクロスコープを用いて、金型から写し取られた線の間隔を測定された。

Fig.1 Shape of injection molded sample and marked line

Table 1 Standard molding conditions

Flow Rate (cm ³ /s)	17.4
Melt Temperature (°C)	220
Coolant Temperature (°C)	40
Packing Time (s)	10
Cooling Time (s)	15

Fig. 2 (a) : Retardation measuring device,
(b) : measuring points in the molded part

Fig. 3 Sample weight as a function of packing pressure ; (a) : ABS , (b) : Transparent ABS

流動方向の成形収縮率； $S_{//}$ は、(1)式によって算出された。

$$S_{//} = (L_0 - L) / L_0 \quad (1)$$

ここで L_0 は、金型上のけがき線 A と B (あるいは C と D) の距離であり、 L はそれぞれに対応する成形品における線間の距離である。流動に直交方向の収縮率 $S_{\perp}$ も同様に、A と E (あるいは C と G) に対応する距離を測定することによって(1)式を用いて算出された。本研究において、ゲートからの距離による収縮異方性の分布について検討を行うため、図1に示す様にゲートに近い領域 Region 1 と遠い領域 Region 2 に測定箇所を分けて測定を行った。成形品は、金型から取り出し後、室温まで十分下がったと考えられる 24 時間後には、変化の 90% 以上が完了し、その後 10 日ほどで変化がなくなる。従って、ここでの成形収縮率は、溶融樹脂が金型内に充填したときに転写した成形品の寸法と、その後室温まで成形品が冷えた時までの寸法変化量の割合と考えられる。

2.4 光学測定実験

成形品内部における配向の異方性を検討するため、光干渉法を用いた複屈折の測定からレターデーション； R および複屈折度； Δn を算出することで検討することを試みた。測定は、図2(a)に示すような偏光顕微鏡を用いて、サンプルを直交ニコル状態に配置して白色光を透過し、観測される干渉色の波長強度分布の測定を行った。Region 1 および 2 においてより詳細に光学異方性分布を見るために、図2(b)に示すように各領域 3 か所の測定部分を定めた。波長強度分布を求めるために、浜松ホトニクス社製マルチチャンネル検出器 PMA-11 型を用いて分光測定を行った。これらの波長を読み取り、レターデーション； R を以下の式によって算出した。

$$m = \lambda_{PI} / 2 (\lambda_{VI} - \lambda_{PI}) \quad (2)$$

$$R = m \cdot \lambda_{VI} \quad (3)$$

ここで、 λ_{PI} 、 λ_{VI} はそれぞれ強度の極大値および極小値の波長であり m は次数である。ここで、 m は整数の値をとることから、読み取った各波長に対して、2 式を満足する整数 m を算出し、レターデーション R を算出した。また、複屈折度； Δn は、4 式を用いて算出した。

$$\Delta n = n_2 - n_1 = R / T \quad (4)$$

ここで、 T (nm) は測定箇所における厚みである。

求められた Δn から流動方向とそれに直交する方向に対する分子配向の強度を比較することが可能と考えられる。

3. 結果と考察

3.1 成形収縮異方性

図3に、保圧圧力の変化に対する成形品重量の影響を示す。保圧圧力が上昇するにつれて、成形品の重量は、ほぼ直線的に増加する。これは、保圧圧力が高くなるに従って樹脂が成形品により多く充填されることになるため、成形品重量も増加したと考えられる。またこのことから、成形品の体積は、保圧圧力の増加に伴って、ほぼ直線的に増加すると考えられる。透明 ABS の重量は、汎用 ABS のそ

(a)

(b)

Fig.4 Shrinkage ratio as a function of packing pressure ; (a) : ABS, (b) : Transparent ABS ; ○ : Flow direction of region 1 ; □ : Flow direction of region 2 ; ● : Transverse direction of region 1 ; ■ : Transverse direction of region 2

れと比べて重くなっているが、透明 ABS の比重は 1.09 g/cm^3 であり汎用 ABS である 1.05 g/cm^3 と比べて大きいことによると考えられる。成形品重量の保圧圧力に対する増加の傾向は、汎用あるいは透明 ABS いずれも同様な傾向を示していることがわかる。

図 4 に成形収縮率の保圧圧力による影響を示す。成形収縮率は、保圧圧力の上昇に伴って小さくなる。成形収縮率が小さくなるにつれて、金型内の成形品寸法に近くなり成形品が大きくなることから、保圧圧力の上昇に伴って溶融樹脂の密度が上がり成形品が収縮しにくくなると考えられる。また、成形収縮率は、流動方向 (MD) に比べてそれと直交方向 (TD) が大きいという異方性をもつことがわかる。これは、金型への熱伝導によって溶融樹脂の固化層が成長するとき、流動に伴って分子や充填材が配向するためと考えられる。分子や充填材が流動方向に配向することによって、線膨張係数が流動方向に比べてそれに直交方向では増加し、流動方向の成形収縮率は、それに垂直な方向に比べて小さくなると考えられ、収縮異方性が発現すると考えられる。さらに、流動方向の成形収縮率における保圧

(a)

(b)

Fig.5 Shrinkage anisotropy as a function of packing pressure ; (a) : ABS, (b) : Transparent ABS ; ● : region 1 ; ■ : region 2

圧力の増加に対する減少量は、流動方向に直交する方向のそれに比べて小さいことがわかる。このことから、保圧圧力によって成形収縮異方性は変化すると考えられる。これらの傾向は、汎用あるいは透明 ABS いずれも同様な傾向を示していることがわかる。

図 5 に、収縮異方性の保圧圧力による影響を示す。ここで、収縮異方性 Sa は、5 式によって算出された。

$$Sa = SH_{Td}/SH_{Md} \quad (5)$$

ここで、 SH_{Md} および SH_{Td} はそれぞれ、流動方向とそれに垂直な方向の成形収縮率である。

成形収縮率は、流動方向に比べてそれに直交する方向が大きいことから、成形収縮率の異方性は 1 より大きな値をとる。成形収縮率の異方性は、保圧圧力の上昇に伴って小さくなる傾向がある。これは、流動方向に対する成形収縮率に対する保圧圧力の影響が小さいことによると考えられる。この結果、保圧圧力が上昇するにつれて流動に直交する方向の成形収縮率が大きく低下することから、収縮異方性が小さくなると考えられる。また、収縮異方性は、ゲートに近い Region 1 の方が、ゲートから遠い Region 2 に比べて小さいことがわかる。このことから、成形収縮異方性は成形品内で分布をもつことがわかる。また、Region 1 の収縮異方性は、いずれの樹脂においても影響の無くなる

Fig.6 Shrinkage anisotropy as a function of packing pressure; (a) : ABS , (b) : Transparent ABS

明確な保圧圧力が存在せず、保圧圧力の上昇とともに低下する傾向を示す。しかし、Region 2 の収縮異方性は、保圧圧力が 60 MPa を超えると保圧圧力の影響が無くなりほぼ一定になる。このことから、収縮異方性の成形品内における分布は、保圧圧力によって変化すると考えられる。

図 6 に成形収縮異方性分布度 D_{sa} の保圧圧力による影響を示す。ここで、成形収縮異方性分布度は、6 式により算出された。

$$D_{sa} = S_{a2}/S_{a1} \quad (6)$$

ここで、 S_{a1} 、 S_{a2} はそれぞれ、Region 1 および 2 における収縮異方性である。樹脂によらず 60 MPa 程度の保圧圧力で成形異方性分布度の値は、1 に近づく様な極値をとる。このことから、保圧圧力の変化によって、収縮異方性の分布が変化し、さらに本実験において 60 MPa という保圧圧力を設定することで、Region 1 および 2 における収縮異方性の分布が小さくなる事が考えられる。

このような挙動は、汎用あるいは透明 ABS いずれにも共通する。保圧圧力が変化するとき成形品内の樹脂流動挙動を検討するため、図 7 に充填完了直前から保圧過程における、射出成形機のプランジャー位置の時間変化を示す。保圧過程におけるプランジャーの動きは、どのような保圧圧力においてもある位置で止まることがわかる。これは、所定の保圧圧力で充填可能な樹脂量があり、所定の樹脂量を充填すると、それ以上の樹脂が充填できないため、プラ

Fig.7 Plunger location during packing process ;
● : 30 [MPa] ; ▲ : 50 [MPa] ; × : 60 [MPa] ;
○ : 70 [MPa] ; △ : 90 [MPa]

ンジャーの動きが止まるものと考えられる。保圧圧力が 50 MPa 以下のとき、プランジャーは保圧過程に入ったとき後退する様な挙動を示す。これは、プランジャーにかかる樹脂圧力が充填過程から保圧過程に切り替わる時、充填圧力に比べ保圧圧力が小さいためプランジャーが押し戻され则认为される。また、保圧圧力が大きくなるにつれて射出プランジャーが押し込まれることがわかる。これは、保圧圧力の増加に伴って樹脂が圧縮されることによるものと考えられる。このことは、先に示したサンプル重量が保圧圧力の増加に伴って、ほぼ直線的に増加するという結果を支持するものと考えられる。このように、保圧圧力の値によってプランジャーが前後する挙動が見られることから、保圧圧力の変化に伴って保圧過程で形成される分子配向に影響を与え则认为される。

成形収縮異方性は、成形品内の厚さ方向の分子配向と関係があると考えられる。非晶性樹脂の分子配向を測定する方法として、分子配向計で測定する方法が考えられる。しかし、通常の成形品のような厚みのサンプルを直接測定することはできない。そこで透明な ABS 樹脂成形品に対する光学異方性測定を行うことで、分子配向強度の分布を検

Fig.8 Retardation measuring method; (a): An example of observed samples under polarized conditions (Packing Pressure; 80 [MPa]); (b) distribution of wavelength

討することを試みた。

3.2 光学異方性

保圧過程における保圧圧力の変化に対する分子配向の度合いを検討するために、白色光を用いた偏光干渉法によるレターデーション測定を行うことにした。

図8(a)に直交ニコルで観察した所定の保圧圧力をかけて成形した成形品の干渉色の分布を示す。また、図8(b)に図8(a)で丸印をつけた部位における干渉色の波長強度分布と、その波長強度の極値に対するレターデーション R および Δn の算出例を示す。次数 m は7式に示すように、2式に強度の極大値の波長 503.8 nm と極小値の波長 587.7 nm を代入することで、ほぼ整数値が得られることから3であると決定した。

$$m = 503.8 / 2 \times (587.7 - 503.8) = 3.002 \approx 3 \quad (7)$$

次数を3式に代入し8式に示す様にレターデーション R を算出した。

$$R = 3 \times 587.7 = 1763.1 \quad (8)$$

複屈折度 Δn は、測定箇所における成形品の厚みの測定値 $1988 \times 10^3 \text{ nm}$ とレターデーションを4式に代入し9式に示すように算出した。

$$\Delta n = 1763.1 / (1988 \times 10^3) = 0.887 \times 10^{-3} \quad (9)$$

このように、各測定点における次数 m 、レターデーション R および複屈折度 Δn を算出した。また、成形品の厚みが0.2 mmになるように薄片を成形品から切り出し同様に測定した結果からも、複屈折度の大きさはオーダーが一致することから、複屈折度はそれほど高くはなく、平均的な分子配向強度はそれほど大きくないと考えられる。

図9に各保圧圧力における測定点に対して算出された複屈折度 Δn を示す。 Δn は、ゲートから遠くなるに従って徐々に低下する傾向がある。このことから、ゲートから遠くなるに従って徐々に分子配向強度が低下すると考えられ

Fig.9 Distribution of Δn along measuring points

**Fig.10 Δn as a function of packing pressure ;
● : Region 1, ■ : Region 2**

る。また、保圧圧力が20 MPaから徐々に上昇するにつれて、ゲート近傍というよりはむしろゲートから遠いRegion 2の Δn 値が上昇する。このことから、ゲートから遠い部分の配向が保圧圧力の上昇に伴って増加すると考えられる。さらに保圧圧力が上昇し、40~50 MPaとなると、 Δn の差は成形品内で一度同じような値をとる。このことから、保圧圧力が40~50 MPaのとき、厚み方向の平均的な分子配向強度は、成形品内で分布が小さくとなると考えられる。さらに保圧圧力が上昇すると、ゲートに近いところから Δn が上昇する。このことから、保圧圧力が60 MPaを超えると、ゲートに近いところから徐々に分子配向強度が上昇するものと考えられる。

本研究で用いた材料は、海島構造をとるABS樹脂でありゴム層とASマトリックス層に分けられる。ゴム層をTEM観察したところ保圧圧力が20あるいは90 MPaのときにおいてもほぼ球形をしており、ゴム層の変形により収縮異方性が発現しているというよりは、AS領域の分子配向による影響の方が大きいと考えられる。

図10に、Region 1に属する Δn 測定点(1~3)とRegion 2に属するそれ(4~6)の平均値に対する保圧圧力による影響を示す。Region 1において、 Δn の保圧圧力の増加に対する影響は、保圧圧力が60 MPa以下の時上昇傾向はごくわずかで、それ以上の保圧圧力において圧力上昇に対する増加の傾向は大きくなる。保圧圧力が20~50 MPaの時、樹脂が保圧過程において充填する時に配向した分子は、保圧過程中的樹脂流動が少ないことから緩和が進むと考えら

Fig. 11 Δn distribution as a function of packing pressure

れる。しかし、保圧圧力が上がると、保圧過程中的樹脂の流動量が増え分子が緩和する以上に流動による分子配向が大きくなると考えられる。これに対して、Region 2において、 Δn の平均値の保圧圧力依存性は、保圧圧力が 80 MPa 以下の時、保圧圧力が上昇するにつれて徐々に Δn の平均値は上昇するが、それ以上の保圧圧力では保圧圧力の上昇に伴う上昇傾向が無くなることがわかる。このように、場所により保圧依存性が異なることから Δn の平均値の分布が保圧圧力により変化すると考えられる。

図 11 に Δn 分布度 $D_{\Delta n}$ に対する保圧圧力の影響を示す。ここで、 Δn 分布度は、10 式によって算出された。

$$D_{\Delta n} = \Delta n_1 / \Delta n_2 \quad (10)$$

ここで Δn_1 、 Δn_2 はそれぞれ Region 1 と Region 2 における Δn の平均値である。この値が 1 に近いほど Region 1 と Region 2 との間の Δn が近いことから、厚さ方向の平均的な配向の強度分布が小さいということを示す。保圧圧力が 40 MPa 以下のとき、保圧圧力が上昇するにつれて急激に配向強度分布は小さくなる。保圧圧力が 50~80 MPa の時、 Δn 分布度に対する保圧圧力の影響がほとんど無くなり、さらに保圧圧力が上昇すると、配向強度分布が大きくなるという挙動を示す。この傾向は、図 6 に示す成形収縮率の異方性分布度に対する保圧圧力が極小値をとる傾向と一致する。このことから、成形収縮異方性は、溶融樹脂が金型内に充填された時の分子配向分布に依存すると考えられる。

4. 結 言

本研究では、充填過程と保圧過程における射出成形品の成形収縮と光学異方性について報告し、以下のようなことがわかった。

1. 射出成形品において、成形収縮率は、保圧圧力を変化させても流動方向に比べてそれと直交する方向のほうが 1.05~1.7 倍大きいことがわかった。
2. 収縮異方性 (TD/MD) は、保圧圧力が高くなるにつれ 60 MPa までは急激に減少し、60 から 100 MPa まではわずかしこ減少しない。また、その収縮異方性のゲート近傍と遠い 2 カ所の領域における場所による差

は、保圧圧力の値によって変化し、60 MPa 付近で最小となった。

3. 光学異方性測定の結果から、複屈折度 Δn は保圧圧力の増加とともに上昇する。収縮率は、保圧圧力の増加とともに減少することとあわせると、保圧圧力の低いところでは分子が緩和し、高いところでは分子が緩和せず固化することを意味していると考えられる。また、複屈折度 Δn の場所依存性については、ゲート付近が大きい。
4. 成形収縮異方性の場所依存性が小さいとき、複屈折度の場所依存性も小さい。保圧圧力を適切に制御することにより、ゲートからの距離による収縮異方性の差を変化させることが可能であることがわかった。

謝 辞

本報告を作成するにあたり、東京工業大学の伊藤浩志先生には、成形品の光学異方性測定に関する測定のご指導をいただきました。福島県ハイテクプラザの菊地時雄博士には、光学測定を行うための透明 ABS としてデンカ ABS CL-301：電気化学工業製を提供と成形品の偏光フィルムを用いた複屈折観察のご指導を頂きました。また、金沢工業大学の瀬戸雅宏博士には、光学測定用の薄片切削を行っていただきました。この場を借りてお礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) McKelvey, J. M.: 高分子加工工学, 現代工学社 298 (1971)
- 2) Tadmor, Z., and Gogos, C. G.: プラスチック成形加工原論, 562 (1991), シグマ出版
- 3) Lawrence, E. N. and Rolf Buchdahl, R.: *J. Appl. Phys.*, **21**, 488 (1950)
- 4) Rider, J. G. and Hargreaves, E.: *J. Polym. Sci.*, **7**, 829 (1969)
- 5) Jansen, K. M. B. and Titomanlio, G.: *Polym. Eng. Sci.*, **38**, 839 (1998)
- 6) Chang, Tao C.: *Polym. Eng. Sci.*, **41**, 703 (2001)
- 7) Leo, V. and Cuvellez, CH.: *Polym. Eng. Sci.*, **36**, 1961 (1996)
- 8) Jansen, K. M. B.: *Int. Polym. Proc.*, **13**, 309 (1998)
- 9) Jansen, K. M. B. and Titomanlio, G.: *Polym. Eng. Sci.*, **36**, 2029 (1996)
- 10) 瀬戸雅宏, 山部 昌: 成形加工, **13**, 812 (2001)
- 11) 瀬戸雅宏, 寺倉祐二, 佐々木幹夫, 山部 昌: 成形加工, **15**, 148 (2003)
- 12) Hoi-pang, T. and Furong, G.: *Polym. Eng. Sci.*, **39**, 3 (1999)
- 13) 黒川靖也: プラスチック成形技術, **19**(1), 9 (2002)
- 14) 室富昭広, 横井秀俊: 成形加工シンポジア '02, 327 (2002)
- 15) 栗屋 裕: 高分子素材の偏光顕微鏡入門, 71 (2003), アグネ技術センター