

## 第5回国際高分子加工学会レポート

# 射出成形

高橋秀郎\* 金井俊孝\*\*

### はじめに

国際高分子加工学会第5回年次大会(PPS-5)では、射出成形と圧縮成形のセッションにおいてポスター発表を含めて35件の論文発表が行われた。このセッション以外でも二、三の射出成形に関する発表があったが、本稿では上記セッションでの発表に限って紹介する。

射出成形関係の発表論文の約半数がCAEに関するもので、流れ解析から繊維配向、冷却、保圧、成形品に生じる収縮、ソリ、残留応力、複屈折率などの解析に至る広範囲の発表がなされた。その他の発表は、加熱筒内でのスクリュ可塑性、精密成形、射出成形解析に必要な材料物性の測定(粘度、 $p-v-T$ 関係)、射出成形品の品質(ウエルドラインの強さなど)、新たな構造の発現

にかかわるものであった。

### 1. 射出成形 CAE 関係

#### (1) 繊維配向

Tuckerによる特別講演を含めて3件の発表があった。今回のトピックスと考えられるので発表の概要を含めて紹介する。

Tuckerは、射出成形品における繊維配向の予測について紹介した<sup>1)</sup>。

繊維強化プラスチックの射出成形品では、成形品を厚さ方向に表面からスキン層、シェル層、コア層の3層に分けた場合、繊維はスキン層ではランダムに配列し、シェル層では流れ方向に配向する。コア層では流れが拡大流の場合、流れに垂直に、縮小流の場合、流れ方向に配向する。Tuckerは、Jefferyの配向の式<sup>2)</sup>に繊維同志の相互作用によって繊維の配向が阻害される項を取り込むことによって、実際の繊維強化プラスチックの成形時に生じ

る繊維配向のより正確な記述法を既に提案している<sup>3)</sup>。ここでは、繊維配向の表記法として、配向分布関数の代わりに配向テンソル $a_{ij}$ を使った表記法が紹介された<sup>3)</sup>。図1のベクトル $p$ により繊維1本の配向を定義する。 $a_{ij}$ は次式となる。

$$a_{ij} = \langle p_i p_j \rangle \quad (1)$$

$a_{ij}$ によれば、繊維の平面方向の配向は図2のように表すことができる。 $a_{ij}$ を用いて配向の式を記述することによりデータ数が少なくなり、数値計算する上でメモリーを節約できる利点がある。

荻下らは、Jefferyの配向の式を用いて繊維配向を解析し、実際との比較結果を発表した<sup>5)</sup>。解析結果の検証は、図3に示す円板(センターゲート)の場所1、2における中心層の繊維の配向を顕微鏡観察により調べることによって行われた。

Jefferyの配向の式に基づく計算では、繊維充てん率の影響が無視される

\*Hideroh Takahashi  
 (株)豊田中央研究所 研究10部高分子加工研究室  
 \*\*Toshitaka Kanai  
 出光石油化学(株) 樹脂研究所

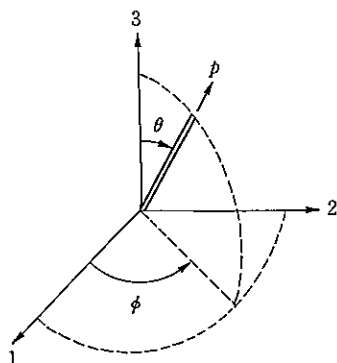


図1 繊維配向の座標軸の定義

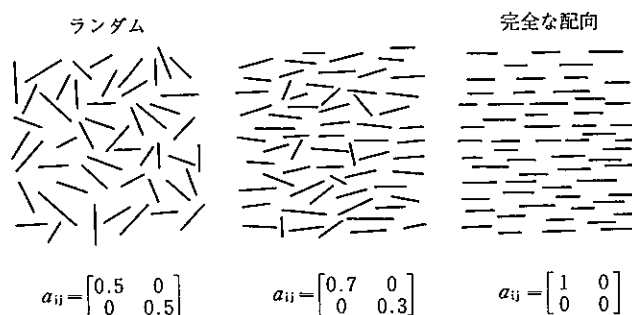


図2 繊維の平面配向の状態と対応する配向テンソル

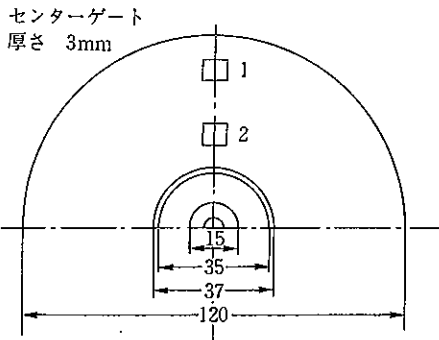


図3 円板状試験片の寸法

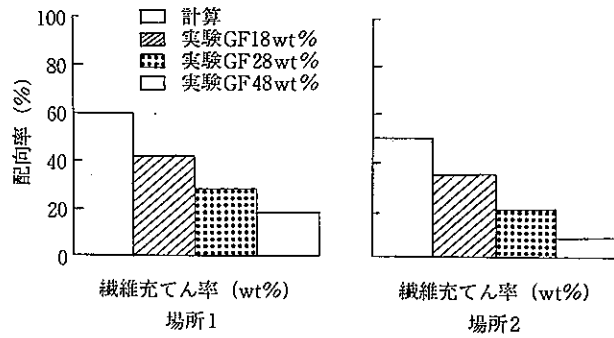


図4 繊維充てん率と配向率の関係

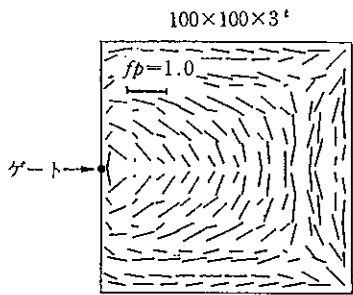


図5 計算による配向パラメータの分布 (GF20wt% 強化ポリプロピレン,  $C_1=0.1$ )

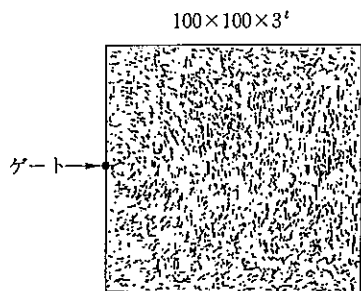


図6 金属繊維の分散状態のX線写真 (ポリプロピレン)

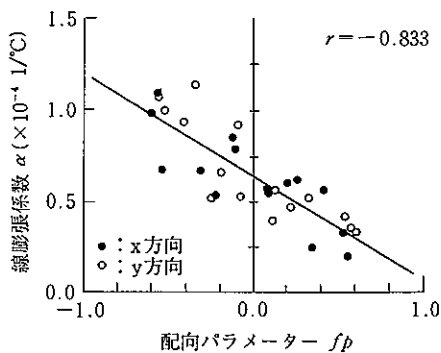


図7 配向パラメータ (計算値) と線膨張係数 (実測値) の相関図

が、実際には図4のように繊維充てん率によって配向率が変化する。この結果、Jefferyの式を繊維充てん率の高い系に適用するには問題がある。

一方、松岡らは、配向の式としてFolgar-Tuckerの式<sup>2)</sup>を用い、繊維同志の相互作用を考慮して射出成形品に生じる繊維の配向を解析した<sup>6)</sup>。解析結果の検証は、金属繊維をトレーサと

して混入してX線で観察する直接法と、射出成形品の線膨張係数の分布を調べ配向パラメータ (計算値) との相関を調べることによる間接法で行われた。図5、6にそれぞれ計算による配向パラメータの分布とX線による金属繊維の分散状態を示す。図5の計算結果から、ゲート近くの放射状の流れでは流れに直角方向の配向が、壁面近傍では壁面に沿う配向が予測されるが、これらの結果は図6に示す繊維の分散状態と定性的に一致している。配向パラメータと線膨張係数とは、良い相関

を示した(図7)。繊維同志の相互作用係数  $C_1$  の影響も検討され、発表では  $C_1=0.1$  が用いられた。

### (2) 金型冷却解析

2件の発表<sup>7),8)</sup>があった。一つは境界要素法 (BEM) を用いたもので、他は有限要素法 (FEM) を用いたものである。

### (3) 保圧解析

溶融プラスチックの  $p-v-T$  関係を用いた保圧過程の解析に関して D. Huilier の総説<sup>9)</sup>があり、研究発表においても多田が保圧過程の圧力分布を計

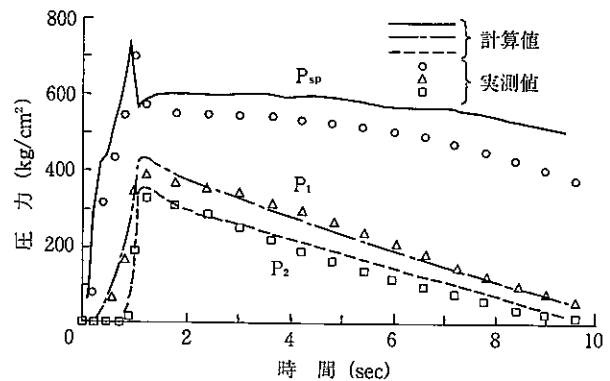
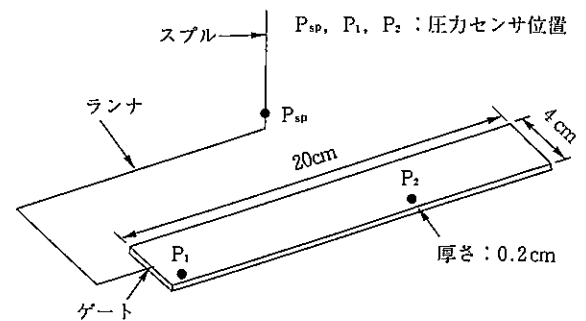


図8 圧力の計算値と実測値の比較 (ポリスチレン)

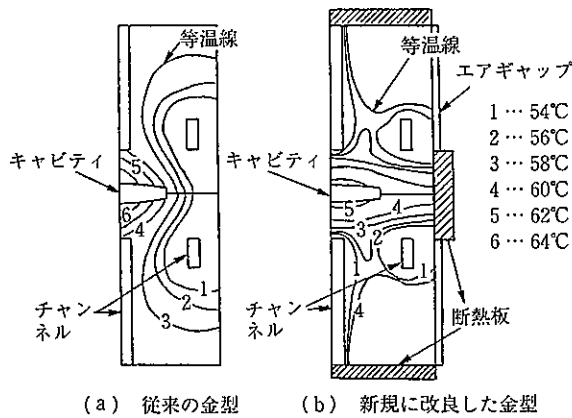
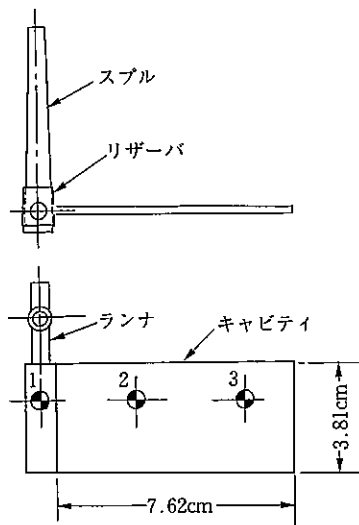


図10 金型内温度分布図

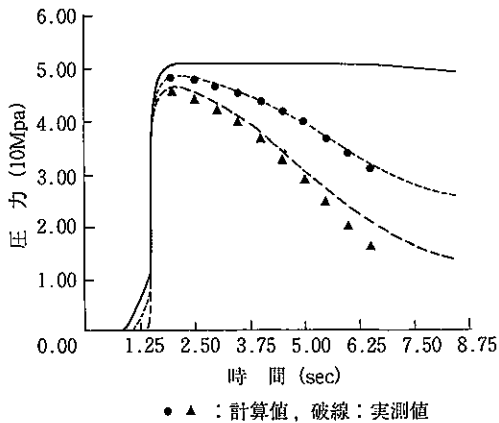


図9 保圧過程の圧力

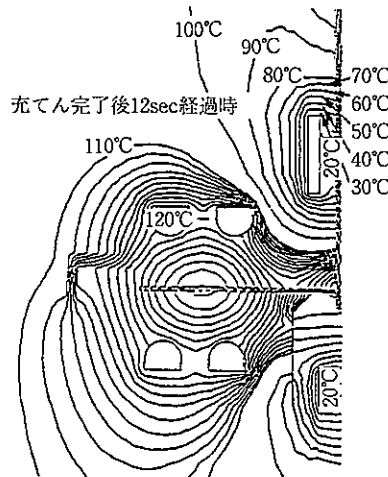


図11 離型時の金型内温度分布

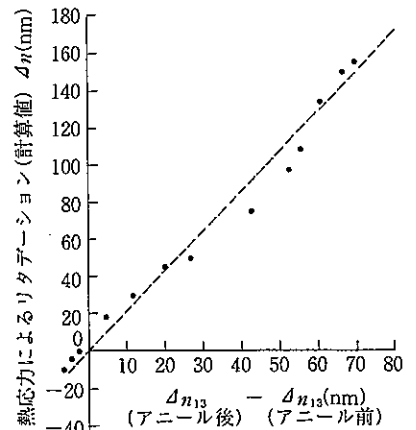


図12 熱応力から計算されるリタデーションと実測値の比較

算し、実際と比較した結果を報告した<sup>10)</sup>。充てん過程では Hele-Shaw 流れを用いた解析により計算し、保圧・冷却過程では Spencer-Gilmore 方程式を用いて圧縮性流体として解析した。その計算例が図8であり、矩形成形品において、圧力の解析結果と実験結果は良い一致を示している。

また、Wang らのグループは長年研究した内容を紹介し、保圧過程の解析においては粘度のパラメーターとして圧力を加え、WLF 式の7定数を用いて、図9の形状の金型内の圧力変化を計算し、同図下の結果を得ている<sup>11)</sup>。これらの技術は、成形品の品質を予測する上で大きな役割を果たすものと期待される。

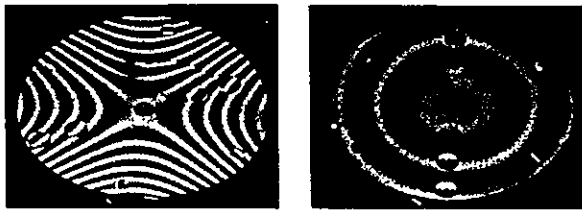
#### (4) 成形品の収縮、ソリ、残留応力、複屈折率の解析

近年、成形品の寸法精度、品質の均一性などに対する要求が高まってきており、精密成形分野では冷却過程での温度分布、収缩量やポリマーの配向度を予測する技術が重要になってきている。こういった内容に関して、今回の発表の中から4例を紹介したい。

高木らは、ビデオカメラ用プラスチックレンズの精密成形で、冷却解析を駆使して金型設計をしている<sup>12)</sup>。成形時に要求されるキャビティ内の温度分布は1°C以内にする必要がある、そのために金型内に断熱板やエアギャップを設け、キャビティの温度分布を均一化している。図10(a)は従来の金型で、

(b)は改良金型の温度分布を示しており、改良金型ではキャビティ付近の温度の均一化の様子が分かる。また、成形プロセスでは射出—急速加熱—冷却—再加熱—離型の過程により、残留応力の低減、成形過程の温度均一化を図っている。

金井らは、光ディスク基板の射出成形時に生じる熱応力を三次元非定常熱解析により計算している<sup>13)</sup>。図11は、離型時の金型内温度分布を等温線で示した結果であり、冷却水やチラーの温度・位置、空気層がディスク基板の温度分布を支配しているのが分かる。この温度分布から熱応力を計算し、熱応力に起因する複屈折を予測した値とディスク基板のアニール前後の複屈折



(a) 変形 ( $t_1=1.2$  sec) (b) ソリ ( $t_1=5.0$  sec)

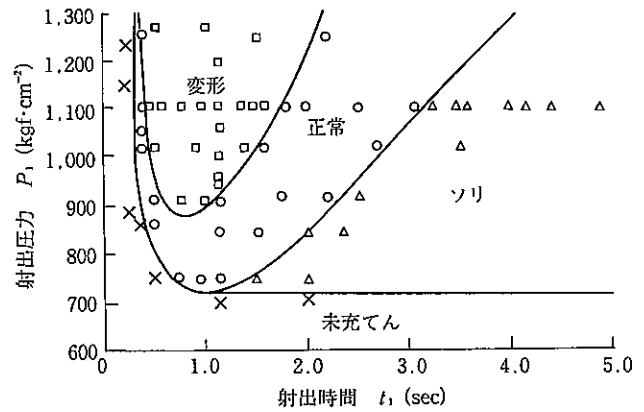
図17 ディスク形状の変形状態 (モアレ図)

スチックの温度分布に関する発表が2件あり、スクリュ設計がいかに重要であるかが認識されるとともに、この分野の研究の進展が望まれた。天野らの研究結果の一例として、表1と図14にスクリュの仕様と加熱筒内の溶融プラスチックの温度分布を示す。加熱筒内の温度分布が大きいことと、スクリュ仕様やプラスチックの種類による差の大きいことが論じられた<sup>16)</sup>。

Schmidtらは加熱筒内に図15に示すようなサーモカップルを設置し、また、顔料を用いることにより、樹脂の温度分布の均一性や分散性を検討している<sup>17)</sup>。スロットやピンをスクリュに設けることにより、ソリッドベッドのブレイクアップやポリマー同志の均一化が改善されることを確認している。また、射出条件により、温度の均一性や時間に対する温度の変動が大きく異なることを図16は示している。

加藤らは、ディスク形状の成形品において、成形条件とソリの関係を実験により整理している<sup>18)</sup>。図17は射出時間の異なるディスク成形品の変形状態をモアレ図により示したものである。図18は射出時間、射出圧力に対して成形品の変形状態を図示したものであり、成形品の変形はキャビティ内の不均一な圧力分布により発生する残留応力に起因すると説明している。

以上に紹介した論文のほかにも多数の優れた研究成果が発表された。詳細は、PPS-5のAbstractsを参照されたい。



ディスク厚み  $t$  : 1 mm  
樹脂温度  $T_p$  : 250 °C  
金型温度  $T_b$  : 18 °C

図18 射出成形のディスク変形の種類

### 参考文献

- 1) G.B. Jeffery, "The Motion of Ellipsoidal Particles Immersed in a Viscous Fluid," *Proc. Roy. Soc., A-102*, 161 (1923).
- 2) F. Folgar *et al.*, "Orientation Behavior of Fibers in Concentrated Suspensions," *J.Reinf. Plast. Compos.*, 3, 98 (1984).
- 3) C.L. Tucker (Editor: T.G. Gutowski), *The Manufacturing Science of Composites-Volume IV*, p.95(ASME, 1988).
- 4) C.L. Tucker, "Fiber Orientation Predictions for Simple Injection Moldings," p.30, PPS-5 Abstracts (1989).
- 5) M. Ogisita *et al.*, "Numerical Prediction of Fiber Orientation in Injection Molding," p.36, PPS-5 Abstracts (1989).
- 6) T. Matsuoka *et al.*, "Fiber Orientation Analysis in Injection Molding," p.37, PPS-5 Abstracts (1989).
- 7) T. Matsuoka *et al.*, "Simulation of Injection Mold Cooling by Boundary Element Method," p.258, PPS-5 Abstracts (1989).
- 8) Y. Fujita *et al.*, "Cooling Analysis in Injection Molding," p.257, PPS-5 Abstracts (1989).
- 9) D. Huillier *et al.*, "Injection Moulding: An Overview of the Different Post-filling Stage Simulation Attempts and Critical Suggestions," p.40, PPS-5 Abstracts (1989).
- 10) K. Tada, "Computer simulation of PVT Behavior and Stress Relaxation in Injection Molding" p.42, PPS-5 Abstracts (1989).
- 11) V.W. Wang *et al.*, "Simulation of Injection Molding Process," p.31, PPS-5 Abstracts (1989).
- 12) M. Takagi *et al.*, "Precise Aspherical Plastic Lens Molding for Home-use Electronic Appliances," p.48, PPS-5 Abstracts (1989).
- 13) T. Kanai *et al.*, "Thermal Analysis of PC Optical Memory Disk Substrate," p.43, PPS-5 Abstracts (1989).
- 14) Y. Kayano *et al.*, "Analysis and Verification of Warping and Local Shrinkage in Injection Molding Products," p.47, PPS-5 Abstracts (1989).
- 15) M.R. Kamal *et al.*, "Computer Simulation of the Post-filling Phases in Thermoplastics Injection Molding," p.41, PPS-5 Abstracts (1989).
- 16) O. Amano *et al.*, "Temperature Measurements of Polymer Melts in the Heating Barrel during Injection," p.49, PPS-5 Abstracts (1989).
- 17) L.R. Schmidt *et al.*, "Plasticating and Mixing Performance of Injection Molding Screws," p.50, PPS-5 Abstracts (1989).
- 18) K. Kato *et al.*, "Distortion of Circular Polymer Disk in Injection Moulding Processing," p.46, PPS-5 Abstracts (1989).