ガラスインサート金型によるショートショット時の フローフロント挙動解析

村田 泰彦*¹・横井 秀俊*¹・宇高 靖*²

Visual Analysis of Short-shot Front Behaviors by Glass-Inserted Mold

Yasuhiko MURATA*¹, Hidetoshi YOKOI*¹, Yasushi UTAHA*²

The melt flow patterns inside an injection mold have been approximated by utilizing the short shot method. However, whether the shape of a short shot front corresponds to that of the flow front shape during the filling process has not been investigated. It is necessary, therefore, to understand the factors which influence the behavior of the flow front during the short shot process.

In this paper, by using the "Glass-Inserted Mold" (which one of the coauthors and his research group have developed), we observed the behavior of the flow front during the short shot process, and analyzed several phenomena occurring near the flow front. In conclusion, we obtained the following results.

The flow front of the short shot is observed to move gradually during the cooling process after the end of injection. This movement is classified into the following three patterns:

(1) Advancement caused by pressure relaxation of the resin compressed in the sprue and runner.

(2) Regression caused by molding shrinkage of the resin during the cooling process.

(3) Advancement caused by the local transformation near the flow front of some crystalline polymer.

The advancement (1) accounts for more than 60% of the total, and this advancement depends on the residual pressure inside the runner and the method of screw control. The regression (2) depends on the molding shrinkages. The advancement (3) depends on the filling time inside the mold cavity and the cavity thickness. The advancement (3) of polypropylene reaches 0.1 to 0.2 times the cavity thickness, and that of polyacetal reaches 1.0 to 1.5 times the cavity thickness.

Key Words : Injection molding/Visual analysis/Glass-Inserted Mold/Short shot/Flow front

*¹ 東京大学生産技術研究所 第2部
東京都港区六本木 7-22-1 (〒106)
Institute of Industrial Science, University of Tokyo
7-22-1, Roppongi, Minato-ku, Tokyo 106 Japan
*² 住友重機械工業(株) プラスチック機械事業部 技術部
千葉市稲毛区長沼原町 731-1 (〒263)
Technical Department, Plastics Machinery Division,
Sumitomo Heavy Industries Ltd. 731-1 Naganuma-
hara-cho, Inage-ku, Chiba 263 Japan
1994. 2. 28 受理

1. 緒 言

射出成形における金型内樹脂充填パターンを知る手段として、従来からショートショット法が用いられてきた。同手法は、型内への射出樹脂量を段階的に変化させながら成形を行い、取り出されたそれぞれの成形品のフローフロント形状を充填時間経過に沿って重ね合わせるにより、充填過程を推察しようとするも

Fig. 1 Cavity shape (units : mm, x : Flow front position at the end of shot. P, Q : Pressure measurement point)

のである。同手法は、特別な計測用金型や装置を必要とせず、簡単に実施できるため、多段射出成形における射出率切替位置の検討、数値シミュレーション結果の検証手段などに広く用いられてきた^{1)~5)}。しかし、ショートショット成形品は型内充填の減速・停止過程ならびに冷却過程を経たもので、そのフローフロントが、充填過程のフローフロント形状を正しく映し出しているかについてはこれまでに検討がなされていなかった。とりわけ、冷却効果の大きい薄肉部を有するキャビティでは、両者の隔たりはいっそう大きくなると想像される。こうした検討をするためには、まずショートショット時のフローフロント挙動を支配する因子を正確に把握することが必要となる。

著者の一部は、①通常の金型構造を有し、②通常の成形機に取り付けて、③通常の成形条件下で、樹脂流動挙動のリアルタイム観察が可能なガラスインサート金型を提案・試作⁶⁾、既報においてガラス面キャビティの充填特性に及ぼす影響を調査した⁷⁾。

本論文では、上記試作可視化金型⁷⁾を用いて、ショートショット時のフローフロント挙動を観察し、フロント部に発生する諸現象の解析を試みた。以下にその概要を報告する。

2. 実験方法

試作ガラスインサート金型の基本構造は既報⁷⁾に詳しいので、ここでは省略する。使用キャビティは Fig. 1 の矩形状で、厚さを 1, 2, 3, 4 mm の 4 段階に変換構造としている。成形実験には、結晶性樹脂としてポリプロピレン (PP, 昭和電工製ショアロマー MK-511), ポリアセタール (POM, ポリプラスチック製ジュラコン M 270-02), 低密度ポリエチレン (LDPE, 三菱化成製ノバテック L-330), 非晶性樹脂として耐衝撃性ポリスチレン (HIPS, 昭和電工製エスブライト HH-501) を使用した。Table 1 に使用樹脂の物性値を、また Table 2 に各々の成形条件を示す。射出樹脂量は、スクリュ前進が停止する射出完了時において、フローフロントがゲートからそれぞれ $x=11 \pm 1$ mm, 30 ± 1 mm, 47 ± 1 mm の位置に到達するように調節した。その際、各キャビティ厚さ間でフロント挙動の比較を行う方法として、射出終了時のキャビティ内フロント位置 (前記した x の位置) とゲート通過後の時間が厚さによらずほぼ同一となるように、各々の射出率を可視化計測により求めることとした。

射出完了後におけるフローフロント形状は、①射出完了直後のスクリュ挙動と、②金型内樹脂挙動とに依存して変化すると推察される。本論文では、まず、①を検討するために、射出完了直後にスクリュの保持力をゼロとしたスクリュ制御 A, スクリュを射出完了位置でそのまま 20 s 間強制保持したスクリュを制御 B の 2 通りの条件にてフローフロントの観察を試みた。また、②を検討するために、充填位置 x , 樹脂がゲートを通過して x に到達するまでのキャビティ内充填時間 T_f , およびキャビティ厚さ t , 以上 3 因子を変化させてフローフロントの観察を試みた。なお、②の場合、スクリュ制御は A とし、射出開始からの樹脂のゲート到達時間を約 4.0 s 一定とした。

画像計測は、高速ビデオシステム (ナック製 HSV-400) により、200(frames/s) でフローフロント部を拡大して行い、得られた画像は画像解析装置 (ナック製 ID-8000) を用いて処理した。圧力計測は、Fig. 1 に

Table 1 Molding material descriptions

Material	PP	POM	HIPS	LDPE
Crystallization temperature T_c (°C)	120	149	—	87
Glass transition temperature T_g (°C)	—	—	94	—
Molding shrinkage (%)	1.35 ~1.5	1.5 ~1.6	0.36 ~0.4	1.2 ~3.2

Table 2 Molding conditions

Material	PP	POM	HIPS	LDPE
Resin temperature (°C)	190	190	240	210
Mold temperature (°C)	50	70	50	50
Cavity thickness (mm)	1/2/3/4			2

Fig. 2 Advancement of flow front (Flow front position at the end of shot : 47 mm, Cavity thickness : 2 mm, Screw control : A, T : Elapsed time after the end of shot, T_f : Filling time inside a cavity)

におけるランナー内Pおよびキャビティ内Qの2個所において、エジェクターピン下に挿入された水晶圧電式圧力センサー（日本キスラー製 Type 9221）により行った。成形機は、東洋機械金属製 Ti-80 G（型締力 80 トン、785 kN）を使用した。

3. ショートショット時の フローフロント型内挙動

3.1 樹脂の影響

Fig.2 は、充填位置 $x=47$ mm における射出完了時と完了後 8 s の各種樹脂のフローフロント形状比較である。射出が完了しているにもかかわらず、各樹脂共、フローフロントが前進し、PP, POM においては先端部にくびれ状の縞Cが発生した。特に POM ではその縞が複数生じている。

Fig.3 は、画像解析装置により得られたフローフロント変位の経時変化である。横軸は射出完了時からの経過時間を、縦軸は射出完了時からの x 方向のフローフロント変位量を示す。各樹脂共、射出完了後 0.5 s 以内に 2.4~4.2 mm の急激な変位量増加が認められる。その後、PP では、一時的に変位量が約 0.2 mm 減少した後、2 s 付近から再び緩やかに増加するが、POM では減少せず、そのまま緩やかに増加する。PP,

POM 共 9 s 以降では変位量の減少を示し、また、HIPS, LDPE では初期に変位量がピークに達した後、に緩やかに単調減少する。

Fig. 3 Various displacement patterns of flow front measured after the end of shot (Flow front position at the end of shot : 47 mm, Cavity thickness : 2 mm, Screw control : A, T_f : Filling time inside a cavity)

Fig. 4 Influence of filling time inside a cavity and flow front position at the end of shot on relationship between displacement and elapsed time after the end of shot (Resin : PP, Cavity thickness : 2 mm, Screw control : A, T_f : Filling time inside a cavity, () : Flow front position at the end of shot)

以下では、0.5 s 以内の急激な変位量増加（前進）領域を Stage I, それに引き続く減少（後退）領域を Stage II, さらに PP, POM に認められる緩やかな前

Fig. 6 Displacement, screw speed, and pressure profiles of PP as a function of elapsed time after the end of shot (Flow front position at the end of shot : 47 mm, Cavity thickness : 2 mm, Filling time inside a cavity : 1.92 s)

Fig. 5 Influence of cavity thickness on relationship between displacement and elapsed time after the end of shot (Resin : PP, Flow front position at the end of shot : 47 mm, Screw control : A, T_f : Filling time inside a cavity)

進領域を Stage III, 最終段階の後退領域を Stage IV と分類して呼称することとした。ただし、POM のように I と III が明確に区別できない例では、画像上でくびれの生成が観察される時刻を以て III の変位開始点とした。また、5 章に後述するように、N は II と同一の機構によって後退し、II の延長領域と考えられるため、以下では II に含めて議論することとした。

3.2 射出率・キャビティ内充填量の影響

Fig. 4 は、充填時間 T_f と充填位置 x の変化に伴う PP のフロント変位の経時変化を示している。射出率が高く T_f が短いほど、また、 x が大きくなるほど、変位量が増加傾向を示す。この傾向は、他の樹脂についても同様に確認されている。

3.3 キャビティ厚さの影響

Fig. 5 は、充填時間 T_f をほぼ一定とし、厚さ t を変化させて求めた PP のフロント変位の経時変化を表している。Stage III を伴わない $t=1$ mm を除けば、いずれの t でも、 t の増大にしたがって Stage I の最大値は減少し、Stage III の前進量は増加している。

以上より、①樹脂種類、充填時間、充填位置、厚さにかかわらず射出完了後にフローフロントが変位すること、②その挙動として PP は I → II → III → II (または N), POM は I → III → II (N), HIPS, LDPE は I → II (N) と固有のパターンを示すことが明らかとなった。以後、各 Stage 毎に詳細な検討を行うこととする。

4. Stage I の検討

4.1 前進量・圧力特性に及ぼすスクリュー制御の影響

射出完了後のスクリュー挙動がフロント変位に及ぼす影響について検討する。Figs. 6, 7 は、PP, LDPE の

Fig. 7 Displacement, screw speed, and pressure profiles of LDPE as a function of elapsed time after the end of shot (Flow front position at the end of shot : 47 mm, Cavity thickness : 2 mm, Filling time inside a cavity : 1.61 s)

フローフロント変位量およびスクリュ速度、ランナー内圧力 (Fig. 1 の P) の時間変化を表している。両図の (2) の比較より、スクリュ制御 B では、 $T=0$ s に速度がゼロとなり、スクリュがその場で停止する。これに対し、制御 A では、速度が一度負になり、ゼロに収束する過程でスクリュが後退しており、この点が両者の大きな差異として見出せる。Stage I の PP, LDPE それぞれの前進量ピーク値は、制御 A では 4.2 mm と 2.4 mm、制御 B では 21.8 mm と 16.8 mm となり、制御 B が 10 mm 以上大きな値を示す。P の圧力は、前進量の増加に伴い減少する。また、制御 A では、制御 B よりも圧力が速く下降する。さらに、図では表示されていないが、Q の圧力計測では P の 1/10 以下と小さい値を示すことが確認されている。なお、以上の傾向は POM, HIPS においても同様に確認された。

4.2 前進量とランナー内圧力の関係

Fig. 8 は、Stage I の前進量とランナー内 P のピーク圧力との関係を示している。ここでは、充填時間 T_f を調節することによりピーク圧力を変化させる方法を用いている。樹脂の違いによる影響を示した (a) の結果では、ピーク圧力が増加するに伴い、いずれの樹脂もほぼ直線的に前進量が増加する。しかし、PP の前進量は他と比べて小さく示されている。いっぽう、HIPS を例に厚さ t の影響を示した (b) では、

Fig. 8 Influence of resin and cavity thickness on relationship between displacement in Stage I and maximum pressure at position P (Flow front position at the end of shot : 47 mm, Screw control : A)

同じピーク圧力に対しては、 t が小さいほど前進量が大きくなる傾向が示されている。また、いずれの厚さでも、ほぼ原点を通過して放射状に広がる増加傾向が確認された。

4.3 Stage I の前進機構

以上の結果、Stage I では、① スクリュ後退を伴う制御 A より伴わない制御 B において、② ピーク圧力が大きく、③ キャビティ厚さが小さいほど、その前進量は大きくなることが明らかとなった。

これらの結果は、Stage I の前進機構モデルとして、以下の仮説が正しいことを示唆するものである。すなわち Stage I は、流動過程においてゲート部上流のスプルー、ランナー内で圧縮された樹脂が、射出完了後にも引き続き圧力の低キャビティ内へと流入した結果と考えられる。この際、キャビティ内では流動圧による樹脂の弾性圧縮量がもともと小さいために、キャビティ内樹脂の弾性回復に伴う体積膨張分は、前進にほとんど寄与しないものとみなされる。

以上の前進機構モデルに基づき、上記①～③の結果は次のように説明することができる。

Fig. 9 Relationship between displacement in Stage III and filling time inside a cavity (Flow front position at the end of shot : 47 mm, Screw control : A)

①は、スクリュ後退により瞬時に加熱筒のリザーバ内部およびノズル部の樹脂圧力が低下し、スプルー、ランナー内の圧力開放によるキャビティ内への樹脂流入が遮断された結果と推察される。②は、ランナー、スプルー部の樹脂が大きく圧縮されてピーク圧が上昇するほど、射出完了後にキャビティ内圧との残留差圧が大きくなり、キャビティ内への樹脂流入量が増加し

た結果と推察される。③については、Fig.8 (b) が、スプルーからノズル側への逆流の可能性を含むスクリュ制御Aでの結果であるため、厳密には定量的な議論ができないと考えられる。しかし、単位圧力当たりの樹脂流入量（フロント前進量×キャビティ厚さ×幅）がほぼ一定となっている結果より、厚さの減少に反比例して前進量が増加したものと考えられる。なお、PPが他の樹脂に比べて前進量が小さくなった結果（Fig. 8 (a) 参照）の原因解明については、スクリュ制御Bの状態、樹脂粘度、熱物性などを考慮した詳細な検討が必要と言える。

5. Stage II (IV) の検討

Figs.6, 7 の EF は Stage II に対応する。その平均後退速度（単位時間当たりの平均フロント後退量）は、PP ではスクリュ制御A, Bで各々 0.20 mm/s, 0.23 mm/s, また LDPE ではいずれも約 0.08 mm/s となり、制御A, B間にほとんど差がみられない。また、Stage II の後退の大部分は、スクリュが一度後退・停止後に起こり、その際、Pの圧力はゼロとなっている。これらは、IIの後退が、スクリュ後退に伴う樹脂の逆流現象に起因していないことを示唆している。また、HIPS よりも LDPE の後退量が大きくなっている。これは、Table 1 のように HIPS よりも LDPE の成形収縮率が大きいことと対応しており、これより Stage II の後退は成形品の冷却収縮に起因すると推察される。この冷却収縮は、樹脂種類を問わず成形品の固化が完了するまで続くものと考えられ、Fig.3において観察された Stage IV のゆっくりした後退領域は、

Fig. 10 Cross sectional flow fronts of PP, POM, HIPS, LDPE (Cavity thickness : 2 mm)

Stage II の延長領域とみなすことができる。

6. Stage III の検討

6.1 前進量とキャビティ内充填時間の関係

Fig. 9 は、厚さ t を変化させて求めた、PP、POM の Stage III の前進量と充填時間 T_f との関係を示している。両樹脂共、 t の増加に伴い前進量が増加し、前進量とキャビティ厚さの比は、PP で 0.1~0.2、POM で 1.0~1.5 とほぼ一定の値を示している。また、PP では T_f が長くなるほど前進量が減少するのに対し、POM では T_f と無関係に一定となる傾向を示した。

6.2 フローフロント部の断面観察

各種樹脂による成形品フロント部の板厚方向断面写真を Fig. 10 に示す。Stage III の存在しない HIPS、LDPE では丸い先端形状を呈するが、III の存在する PP、POM では先端部にくびれ状の板厚減少が観察される。PP はくびれが 1 個所で、ゲートからくびれ部に向かうほど板厚が減少するスローブ形状を示す。また、Stage III での前進量が大きい POM は、くびれが複数重なって発生している。さらに、Fig. 2 で見られた縞 C の位置がくびれ D の生成開始位置と一致していることが確認された。以上の結果は、Stage III の前進機構がくびれ生成と密接に関係することを物語っている。

Fig. 11 Displacement and pressure profiles at P and Q as a function of elapsed time after the end of shot (Flow front position at the end of shot: 30 mm, Cavity thickness: 2 mm, Screw control: A)

6.3 フローフロント部における圧力特性

Fig. 11 は、充填位置を $x=30$ mm に設定して求めたフローフロント前進量およびランナー、キャビティ内圧力 P 、 Q の時間変動を示している。PP の場合、 P の圧力がほぼゼロになった G の後に、約 5 s 間にわたる Stage III の前進が認められる。また、その前進の過程では、 Q のプロファイルの中で H をピークとする圧力のわずかな上昇が認められる。POM の場合においても、同様の傾向が確認された。いっぽう、LDPE では、Stage III の前進もキャビティ内圧力の高まりもみられなかった。この傾向は、HIPS においても確認された。

6.4 Stage III の前進機構

Stage III の前進量は、①一部の結晶性樹脂 PP、POM において、②充填時間が短く、③キャビティ厚さが大きいほど、④冷却過程の長い時間の範囲で、⑤フローフロント部の局所的な現象によってゆっくりと増加する。それに伴って、⑥フローフロント近傍には板厚方向のくびれが生成すること、⑦キャビティ内圧力がわずかに上昇することが明らかとなった。以上より、Stage III の前進機構を Fig. 12 を用いて説明する。

- ① 射出直後、コア層からフロント部にかけての c-f は高温の熔融状態にあり、特にフロント部 f の表面は金型と接触しない自由境界面により構成されるために冷却が遅れ、最後まで熔融状態を保ち続ける。
- ② 冷却過程において、表層 a-d 側に対し、内層の b-e 側はゆっくりと冷却され、特に結晶性樹脂では b-e 側に結晶化促進に起因した大きな体積収縮を伴う。その結果、表層に曲げ応力が発生し、成形品表面を凸面とする方向に力が作用する。Fig. 11 で、PP のキャビティ内圧力が H のようにわずかに上昇しているのは、上記の生成域がちょうど圧力検出部に位置するためと考えられる。
- ③ a-d 面に沿うスキン層は、こうした力により凸状にそろうとする結果、固化領域とフロント部熔融領域との遷移領域の g において、固化領域が d から e 方向に陥没してくぼみを生成させる。それ

Fig. 12 Advancing mechanism of the flow front for a crystalline polymer

に伴ってeからf方向に溶融樹脂が押し出される。

- ④ 押し出されたフロント部fの溶融樹脂はキャビティ面に接し、場合によっては上記②～③と同様のプロセスを繰り返して幾重ものくびれを生成する。

充填時間が短い場合、樹脂はスプルー、ランナー内でのせん断発熱などにより高温となり、キャビティ壁面近傍での温度勾配が大きくなる。中心側の樹脂温度が高い場合には冷却過程での結晶化が促進され、より大きな体積収縮を引き起こす。これによりフロント部のスキン層が板厚中心方向へと大きくそって陥没し、低粘度樹脂が容易に押し出される。

POMは、Table 1に示すように結晶化温度 T_c が高く早い段階で硬いスキン層を形成する。また、収縮率が大きいので射出完了直後からそりが発生し、まだ高温の中央部樹脂を急激に前方に押し出す。LDPEは、 T_c が低いために、そりを引き起こすに必要な厚さの高剛性のスキン層形成が遅れ、成形品全体が緩やかに固化、収縮する。その結果、くびれが生成されにくくなったものと考察される。PPは、POMとLDPEとの中間の性質を示し、POMよりも T_c が低いので、そりの開始がやや遅れる。また、非晶性樹脂のHIPSは収縮率が小さく、そりを惹起しない。さらに、キャビティ厚さの増加に伴い前進量が増加したのは、厚さの増加分だけ樹脂の冷却が緩やかとなり、そりによって押し出される樹脂量が多くなったことが原因と考えられる。

7. 各 Stage の重量効果

POMでStage IとⅢとが区別できなかったのは、POMの T_c が高いためにIの途中でスキン層がそり始め、IとⅢの前進が同時進行したことに起因する。したがって、Stage Ⅲの前進量には、Iのそれが重量されているものと推察される。充填時間 T_f が長い場合には充填過程も含めて厚いスキン層が形成され、スキン層のそりはIの速い段階で発生する。逆に T_f が短い場合では、遅い段階で発生することとなる。すなわち、Ⅲの中にIの前進量の占める割合は、前者の場合に大きくなり、後者の場合には小さくなる。これが、Fig. 9において T_f にかかわらず前進量が一定となった原因と考えられる。さらにPP、POMでは、Stage Ⅲの前進の間にⅡの後退が同時に進行していることも推察される。

8. 結 言

以下に、本論文で得られた結果を列記する。

- ① ショートショットのフローフロントは、射出完

了後の型内冷却過程において変位し、

- (i) スプルー、ランナー内で圧縮された樹脂の圧力開放による前進、

- (ii) 樹脂の冷却収縮による後退、

- (iii) 一部の結晶性樹脂に見られるフロント部の局所変形による前進

が連続、あるいは重量された形態をとる。

- ② 圧力開放による前進(i)は、全前進量の60%以上を占める。この(i)は特にランナー内残留圧力と強い相関を示し、キャビティ内充填時間が短く、キャビティ厚さが減少するほど増加する。

- ③ 同(i)は、射出制御方法に大きく左右され、スクリュを射出完了位置で保持した場合には、保持しない場合に比べ、10 mm以上の前進量が加算されることが示される。

- ④ 一部の結晶性樹脂(PP、POM)で見られるフローフロント部の局所変形(iii)は、冷却過程におけるスキン層とスキン層に隣接する内層部との冷却時間差により、表面を凸状にそらせる力が発生するために引き起こされ、これによりフローフロントのコア部溶融樹脂を前方に押し出した結果、くびれが生成する。

- ⑤ 同(iii)の前進は、キャビティ内充填時間が短く、キャビティ厚さが大きくなるほど顕著となり、前進量はPP、POMの場合、それぞれキャビティ厚さの0.1~0.2倍、1.0~1.5倍とほぼ一定値を示す。

- ⑥ 樹脂の冷却収縮による後退(ii)は、(i)の流動停止間隙から顕在化し、それ以後の冷却過程を通して成形収縮率に対応する収縮後退が起こる結果、特にPP、POMの(iii)に重量した場合には、多様な変位挙動形態となって観察され。

最後に、以上の結果からショートショット法を使用するうえでの注意点を以下に記す。

前進(i)は、樹脂の残留圧力開放に起因する。したがって、樹脂の冷却効果が大きく、固化によりフロント部に圧力が充分伝達されない薄肉部を有するキャビティでは、薄肉部と厚肉部との間に前進量差が生じ、ショートショット形状が充填過程のフロント形状とかなり異なるものと予測される。これは、特に冷却が促進される低速の射出条件において顕著になるものと推測され、ショートショット法の適用には注意を要する。

また、後退(ii)は、収縮方向を拘束するピン、リブ、ボスなどのキャビティ条件に大きく依存するため、使用キャビティに応じて個別に検討することが必要となる。

さらに、前進(iii)は局所変形であり、前進量はキャ

ビティ厚さの約 1.5 倍以下と小さいため、キャビティ面積が大きい場合にはあまり問題とはならない。ただし、影響の大きい面積が小さい場合でも、上記値により補正が可能であろう。

謝 辞

金型温調器を貸与下さいました松井製作所ならびに樹脂を御提供下さいました昭和電工、ポリプラスチックにお礼を申し上げます。

本研究の一部は、東京大学生産技術研究所の平成元年度民間等との共同研究（V '89 プロジェクト）により遂行されたものであることを記し、謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) Krueger, W. L. and Tadmor, Z.: *Polym., Eng., Sci.*, **20**, 426 (1980)
- 2) Hieber, C. A., Socha, L. S., Shen, S. F., Wang, K. K. and Isayev, A. I.: *Polym., Eng., Sci.*, **23**, 20 (1983)
- 3) 後藤輝正, 飯塚邦彦, 宮本雅之, 久保 登, 逢坂正義, 佐原謙一, 馬渡恭三郎, 西岡郁夫: シャープ技報, **34**, 63 (1986)
- 4) 松岡孝明, 高島淳一, 井上良徳, 高橋秀郎: 高分子論文集, **48**, 137 (1991)
- 5) Lautenbach, S., Wang, K. K., Chiang, H. H. and Jong, W. R.: *SPE ANTEC '91*, 372 (1991)
- 6) 横井秀俊, 林 高樹, 平岡弘之: 生産研究, **39**, 306 (1987)
- 7) 横井秀俊, 村田泰彦, 坂本一郎: 成形加工, **6**, 349 (1994)