

インモールドプレッシング工法におけるコア駆動方法が 厚肉射出成形品特性に及ぼす影響の検討*

茂木淳志** 菱田智大*** 村田泰彦†

Investigations on Influence of Core Block Driving Method in In-Mold Pressing Molding
on Characteristics of Thick Wall Injection Molded Products

Atsushi MOTEKI, Tomohiro HISHIDA and Yasuhiko MURATA

In polymer injection molding, injection compression molding is applied to actively control the melt pressure in the mold cavity during molding process. The authors have developed an in-mold pressing molding method based on thick wall injection molding to prevent voids inside molded products. In this paper, we investigated the influence of the core block driving method during in-mold pressing molding on the flow behavior of glass fiber reinforced polyamide 66, on the following; generation of voids inside molded products, glass fiber orientation, appearance and surface roughness of molded products, and tensile strength. The results show that the core back using core block is effective for improving the appearance and surface properties of molded products, and that the compressive force generated by the core block improves the strength of molded products.

Key words: injection molding, In-Mold Pressing molding, thick wall injection molded product, void

1. 緒 言

プラスチックは、軽さや、賦形性が良好で大量生産に向いていることから日用雑貨から家電、自動車などの様々な部品に広く利用されている。エンジニアリングプラスチックや炭素繊維強化プラスチックなどの登場により、これまで金属材料で作られていた歯車やカムなどの機構部品、航空機や自動車などの構造部品の素材として用途が拡大している。構造部品では、高い機械的強度が要求されるため、成形品の厚肉化がはかられている。上記プラスチック製品は、一般的に射出成形によって製造されることが多い。厚肉の射出成形品では、成形品の内部にボイドと呼ばれる空洞が発生しやすい。また、成形品の厚さに関わらず金型キャビティ内において一旦分流した溶融樹脂のフローフロントが会合する領域では、V字溝状のウェルドライン(以後、ウェルドと略記する)が生成される。ボイドやウェルドの生成部では、応力集中が引き起こされ、その結果、成形品の局所的な強度低下につながる^{1)~4)}。そのため、ボイドやウェルドは、厚肉構造部品の射出成形において深刻な問題となっている。

ボイド発生を抑止対策として、金型キャビティ内の樹脂に高い保持圧力を負荷して、樹脂の密度を高めることが上げられる。しかし、ゲートから遠く離れたキャビティ末端部では、樹脂の流動圧力損失により、ボイドの抑止が困難な状況が生じる。また、樹脂流動過程においてスキン層内に一旦生成されたウェルドのV字溝は、高い保持圧力の負荷だけでは抑止が困難な場合が多い⁵⁾。一方、高い保持圧力の負荷は、逆に、バリや残留応力・ひずみなどの成形不良の局所的な発生や、金型の破損を引き起こす原因となる⁶⁾。このように保持圧力に依存するだけでは、ボイドやウェルドの抑止が困難な場合が多い。そこで、キャビティ内樹脂の圧力を能動的に制御する成形加工法である射

出圧縮成形法⁷⁾が実用化されている。著者らは、特にボイドに注目して、ボイドを抑止するために、上記成形法を改良して厚肉射出成形に適用したインモールドプレッシング工法(以後、IMP工法と呼称する)を開発した⁸⁾。IMP工法は、サーボモータ駆動の油圧ポンプアクチュエータを用いて、金型内でコアブロックを駆動させて、キャビティ内において樹脂の圧縮を行うものである。著者らは、既報⁹⁾において、本方法が厚肉射出成形品におけるボイドの抑止に効果があることを実証した。IMP工法で用いられる金型(以後、IMP工法金型と呼称する)は、成形工程において樹脂の圧縮動作だけではなく、コアブロックを後退させる動作(コアバック成形法¹⁰⁾)や、さらに、両者を組み合わせた動作を行うことができる。本論文では、IMP工法金型におけるコアブロックの駆動方法が、厚肉射出成形におけるガラス繊維強化ポリアミド66の流動挙動および成形品内部のボイド発生状況とガラス繊維配向状況、また、成形品の外観と表面形状・性状、さらに、引張強度に及ぼす影響について検討を行った。

2. IMP工法金型の基本構造および成形方法

図1は、著者らが開発したIMP工法金型の基本構造を示している。本金型では、ACサーボモータ(SGMSH-30ACA21, 安川電機株)駆動による油圧ポンプアクチュエータ HySerpac(DHA-30W5Q620-FA, 第一電気株)と1対のくさびとで構成された装置が金型に内蔵されている。本装置は、アクチュエータの上下駆動を、くさび機構により90°方向を変えて可動ロッドの前進・後退駆動に変換する機構となっており、これにより、コアブロックを押し込んだり、引き下げたりすることができる。なお、可動ロッドの最大前進・後退ストロークは、10mmである。

図2に本装置が取り付けられた金型の外観を示す。

本論文では、本金型を用いて、図3に示す4つの成形プロセスを実施した。(1)は、 t_0 で射出を開始した後、 t_2 から t_4 にかけて保圧を行う通常の射出成形プロセス(以後、通常成形と呼称す

* 原稿受付 令和2年2月26日

掲載決定 令和2年5月22日

** PLAMO(株) (埼玉県本庄市仁手279)

*** PLAMO(株)

† 正 会 員 日本工業大学 (埼玉県南埼玉郡宮代町学園台4-1)

る)である。(2)は、射出工程完了前の t_1 から t_3 にかけてアクチュエータにより可動ロッドを後退させてコアブロックを引き下げ(コアバック)ながら保圧を行うコアバック成形法である。(3)は、著者らが本論文ではじめて提案する方法で、(2)のコアバック成形を行った後、 t_5 から t_6 にかけて可動ロッドを前進させてコアブロックを一定荷重で押し込むインモールドムービングコア工法(以後、IMM 工法と呼称する)である。(4)は、コアブロックの引き下げを行わないで、 t_5 から t_6 にかけての押し込みだけを行う IMP 工法である。なお、押し込み開始タイミング t_5 は、樹脂の圧縮によってキャビティからランナ内へと樹脂が逆流しない時間、すなわち、ゲートシール時間よりも長い時間を設定した。

3. 実験方法

図 4 は、キャビティの形状を示している。本論文では、ダンベル試験片形状とした。本金型では、キャビティの下面全域が、コアブロックによる押し込みと引き下げの対象範囲となってい

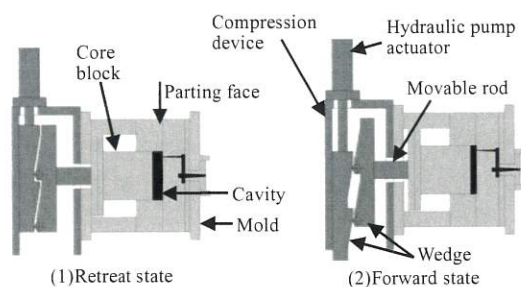


Fig.1 Structure of In-Mold Pressing method

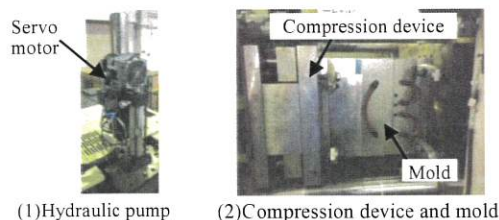


Fig.2 In-Mold Pressing device

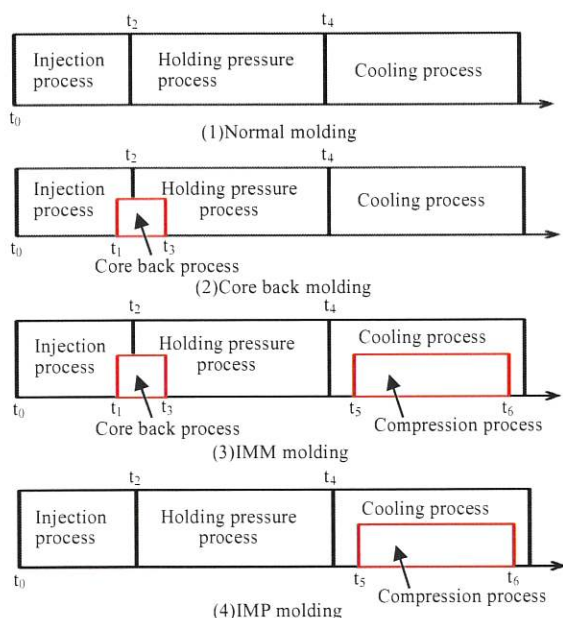


Fig.3 Time chart in each molding process

る。ゲートは、直径 1.0mm のピンポイントゲートで、コアブロックに対向するキャビティ面側に設けられている。本金型では、フローフロント会合部ができる 2 点ゲートについて検討を行った。図 4 に示すキャビティ面側に水晶圧電式樹脂圧力センサ Type6157BA(日本キスラー株)を設置して樹脂圧力を計測した。

成形加工には、油圧式射出成形機 FNX110(日精樹脂工業株、最大型締力 1100kN)を使用した。成形実験には、ガラス繊維強化ポリアミド 66(アミラン CM3006G30、東レ株)、ガラス繊維含有率 30wt%、繊維直径 $9 \sim 15 \mu\text{m}$ 、繊維長 $100 \sim 900 \mu\text{m}$ を使用した。表 1 に成形条件を示す。加熱シリンダ温度および金型温度、射出率、保持圧力、冷却時間、 t_1 から t_6 の時刻を表 1 の通りにそれぞれ設定して、図 3 に示した 4 つの成形プロセスにてそれぞれ成形を行った。(1)の通常成形では、キャビティ厚さを 12mm 一定に設定した。(2)のコアバック成形では、まず、初期のキャビティの厚さを 2mm に設定して樹脂の射出を開始し、 t_1 の時刻からキャビティ厚さが 12mm になるまで 117.5mm/s の速度でコアバックを行った。(3)の IMM 工法では、(2)と同様のコアバック成形を行った後、 t_5 から t_6 の間において 75kN の荷重で圧縮を行った。(4)の IMP 工法では、キャビティ厚さを 12mm 一定に設定して通常成形を行った後、(3)と同様に 75kN の荷重で圧縮を行った。なお、IMM 工法および IMP 工法ともに、圧縮動作は、位置制御ではなく荷重制御であるために成形品厚みの精密な制御が難しい。そのため、樹脂射出量を一定として成形して得られた各成形プロセスにおける成形品厚さは、通常成形品が 11.85mm、コアバック成形品が 11.85mm、IMM 工法成形品が 11.62mm、IMP 成形品が 11.63mm となり、成形品厚さに最大 2% の誤差が生じた。本論文では、4 つの成形プロセスが、樹脂流動挙動および成形品のフローフロント会合部付近におけるボイド発生状況とガラス繊維の配向状況、成形品の外観と表

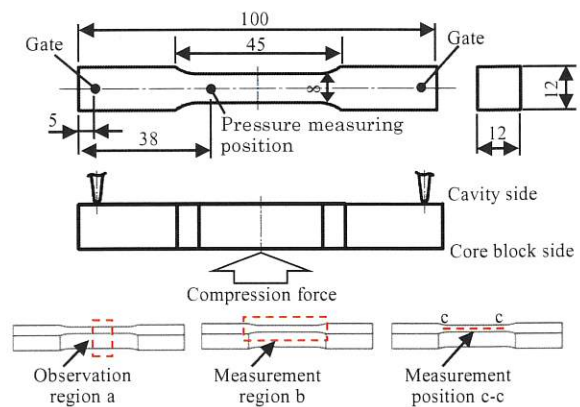


Fig.4 Cavity shape (unit: mm)

Table 1 Molding conditions

Heating cylinder temperature	°C	260-275-275-265-265*)
Mold temperature	°C	45
Injection rate	cm ³ /s	50.4
Holding pressure	MPa	80
Cooling time	s	60
Core back start time t_1	s	0.3
Injection period t_0 - t_2	s	0.5
Holding pressure period t_2 - t_4	s	14.5
Compression start time t_5	s	23
Compression period t_5 - t_6	s	42

*) Nozzle-Metering-Compression-Feed-Hopper zone

面形状・性状、引張強度に及ぼす影響について検討を行った。

成形品全体におけるボイドの観察には、X線コンピュータ断層撮影装置(NAOMI-CT、㈱アールエフ)を、ボイドとガラス繊維配向の拡大観察には、Dimensional X線CT(METROTOM800、カールツァイス㈱)をそれぞれ使用した。後者の観察領域は、図4に示す成形品厚さ方向断面のa部とした。また、成形品のb部の表面形状とc-cライン上の表面粗さ R_a を、非接触型3D測定器(VR-3200、㈱キーエンス)を用いて測定した。さらに、万能試験機(テンシロンRTF-1350、㈱エー・アンド・ディ)を使用して、引張試験を行った。なお、引張速度は10mm/minとした。

4. 実験結果および考察

4.1 樹脂流動挙動

図5は、ショートショット法を用いて、通常成形とコアバック成形におけるキャビティ内樹脂流動過程($t_0 \sim t_2$)の初期段階を観察した結果を示している。IMP工法とIMM工法の結果については、初期のキャビティ厚さがそれぞれ通常成形とコアバック成形と同一であるために、同様のキャビティ内流動挙動を呈したことから省略した。通常成形では、①のようにゲートから対向面のコアブロック側に向けてひも状のジェットイングが折れ重なった形跡が観察される。②③では通常の樹脂流動挙動に移行している。一方、コアバック成形は、ジェットイングが発生した形跡が観察されず、通常の樹脂流動挙動を呈している。

図6は、通常成形とIMM工法成形品のゲート設置位置の裏側、すなわち、コアブロック側の表面観察結果を示している。通常成形では、ジェットイングがコアブロック側のキャビティ面に接触して冷却固化した痕跡と推察される亀裂状の粗い面が現れている。一方、IMM工法成形品では、亀裂状の粗い面は観察されずに良好な面が得られている。なお、IMP工法成形品では通常成形品ほどではないものの、亀裂状の粗い面が観察され、一方、コアバック成形品では、IMM工法成形品と同様に良好な面が得られることを確認している。開口断面積が狭いピンポイントゲートから極端に広いキャビティ空間に樹脂が流入する際には、樹脂がひも状で飛び出し、キャビティ壁面に接触して停止することなくジェットイングを形成する。通常成形とIMP工法成形品では、キャビティが12mmと厚いためにジェットイングが発生したものと推察される。また、IMP工法成形品では、圧縮を加えても、一旦冷却固化したジェットイング痕が完全に消失しない。一方、コアバックとIMM工法成形品では、初期のキ

ャビティ厚さが2mmと薄いために、樹脂がキャビティ両壁面に即座に接触しジェットイングが発生せず通常の樹脂流動挙動を呈する。その結果、良好な面が得られたものと推察される。

以上のように、樹脂流動過程においてキャビティを薄くした状態で射出を開始し、その後コアバックを行うコアバック成形とIMM工法成形品においては、ジェットイングが発生せず、その結果、良好な外観が得られることが明らかとなった。

4.2 ボイド発生状況

各成形プロセスによって得られた成形品内におけるボイド発生状況を、X線コンピュータ断層撮影装置を用いて撮影した。

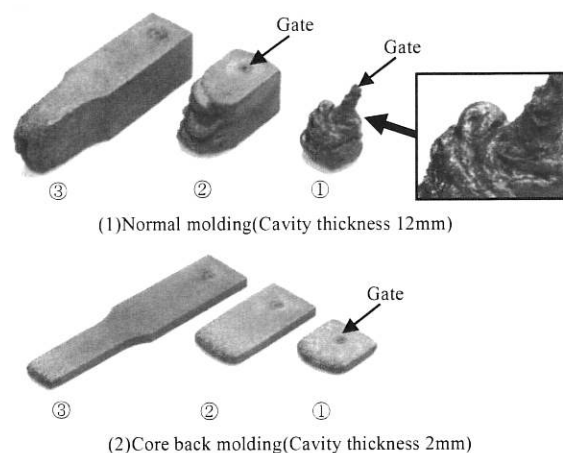


Fig.5 Observation results of short shot molded products

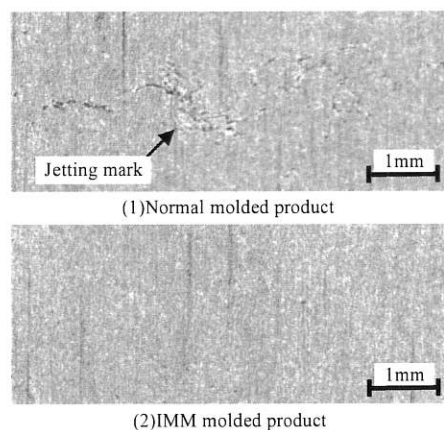


Fig.6 Observation results of molded product surfaces in the core block side

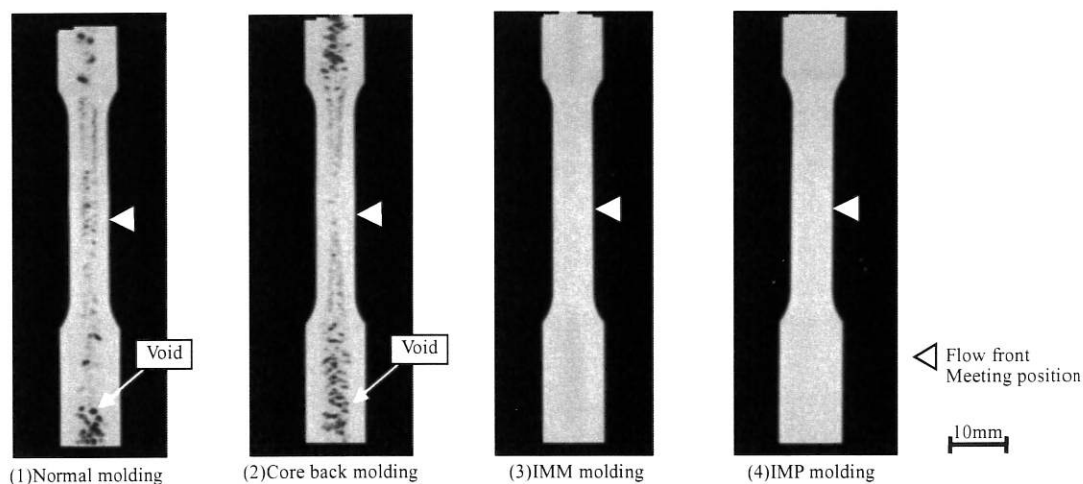


Fig.7 Observation results of voids generated inside molded products by x-ray CT scanner (NAOMI-CT)

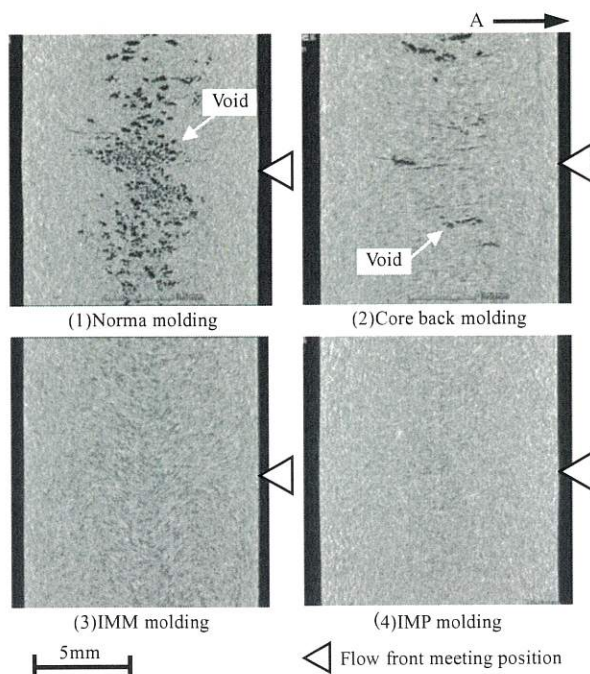


Fig.8 Observation results of voids generated inside molded products by x-ray CT scanner (METROTOM800, Region a)

画像の中から、成形品の厚み方向中心の断面を抽出して図 7 に示す。フローフロント会合面を矢印で示した。(1)(2)の通常成形とコアバック成形品では、成形品全体にわたってボイドが発生しており、特に成形品幅の広い部分において、大きなボイドが多数発生している。一方、(3)(4)の IMM 工法と IMP 工法成形品では、ボイドの発生が観察されない。

Dimensional X 線 CT によって、図 4 のフローフロント会合部付近における厚み方向断面 a 部を詳細に観察した結果を図 8 に示す。通常成形品では、多数のボイドが発生している。コアバック成形品では、通常成形品と比べて数が少ないものの、フローフロント会合面に対して平行方向、すなわち、成形品の厚み方向に向かって細長いボイドが発生している。これは、コアバック時に、矢印 A で示すコアブロックの引き下げ方向に向かって樹脂が流れ、それに伴いボイドが上記樹脂流動方向に引き伸ばされながら成長したためと推察される。一方、IMM 工法と IMP 工法成形品では、ボイドの発生が全く観察されない。

以上のように、通常成形とコアバック成形品では、ボイドが発生するものの、IMM 工法と IMP 工法成形品では、ボイドが発生しないことが明らかとなった。

4.3 金型内樹脂圧力

樹脂圧力センサにより、図 4 のキャビティ位置で計測された樹脂圧力プロファイルを図 9 に示す。流動末端部のフローフロント会合部付近に圧力センサが設置されているために、すべての成形プロセスにおいて、キャビティ内への樹脂充填が完了し、保圧過程に入ると樹脂圧力が急激に上昇しピークを迎えている。(1)の通常成形では、保圧工程に入るとすぐに圧力が低下を始めて 13 秒後に 0MPa に低下している。これは、ゲートの断面積が小さいためにゲートシールが早いことが主な原因と推察される。(2)のコアバック成形では、厚さ 2mm のキャビティ内への樹脂充填完了時に t_1 でコアバックが開始されるために樹脂圧力が一旦急激に低下し、 t_3 のコアバック完了に伴い保持圧力により再上昇した後、再び低下している。(3)の IMM 工法では、コ

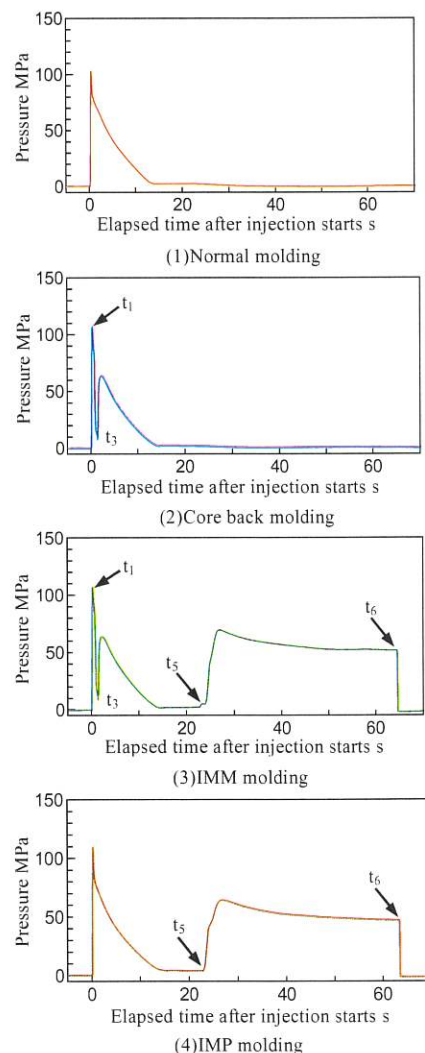


Fig.9 Measurement results of melt pressure inside cavity

アバック成形と同様の圧力プロファイルを呈した後、 t_5 の 23 秒からコアブロックの押し込みにより樹脂圧力が上昇し、圧縮終了 t_6 の 65 秒まで若干の低下を伴いながらも高い圧力が保持される。(4)の IMP 工法では、コアバックによる圧力低下がない以外は、IMM 工法と同様のプロファイルを呈している。

以上のように、IMM 工法と IMP 工法では、通常成形とコアバック成形の場合よりも、キャビティ内において高い樹脂圧力が長い時間に渡って保持されることが実証された。キャビティ内における樹脂圧力の低下によって成形品内に発生したボイドは、コアブロックの押し込みによる樹脂圧力の再上昇によって周囲の樹脂の中に拡散する、あるいは、微細化するものと推察される。このように、圧縮により、長時間にわたってキャビティ内樹脂に圧力が負荷されることが、ボイド発生抑制効果をもたらしたものと推察される。

4.4 ガラス繊維配向状況

図 8 の画像を調整して、ガラス繊維を強調して表示した結果を図 10 に示す。白く見えるのがガラス繊維である。(1)の通常成形品では、フローフロント会合部の厚み方向中央部において会合面に対して垂直方向、すなわち、成形品の厚み方向に繊維が配向している。一方、成形品表面付近においては、表面に対して平行方向に繊維が配向している。(2)のコアバック成形品では、厚み方向中央部において、通常成形よりも成形品の厚み方向に

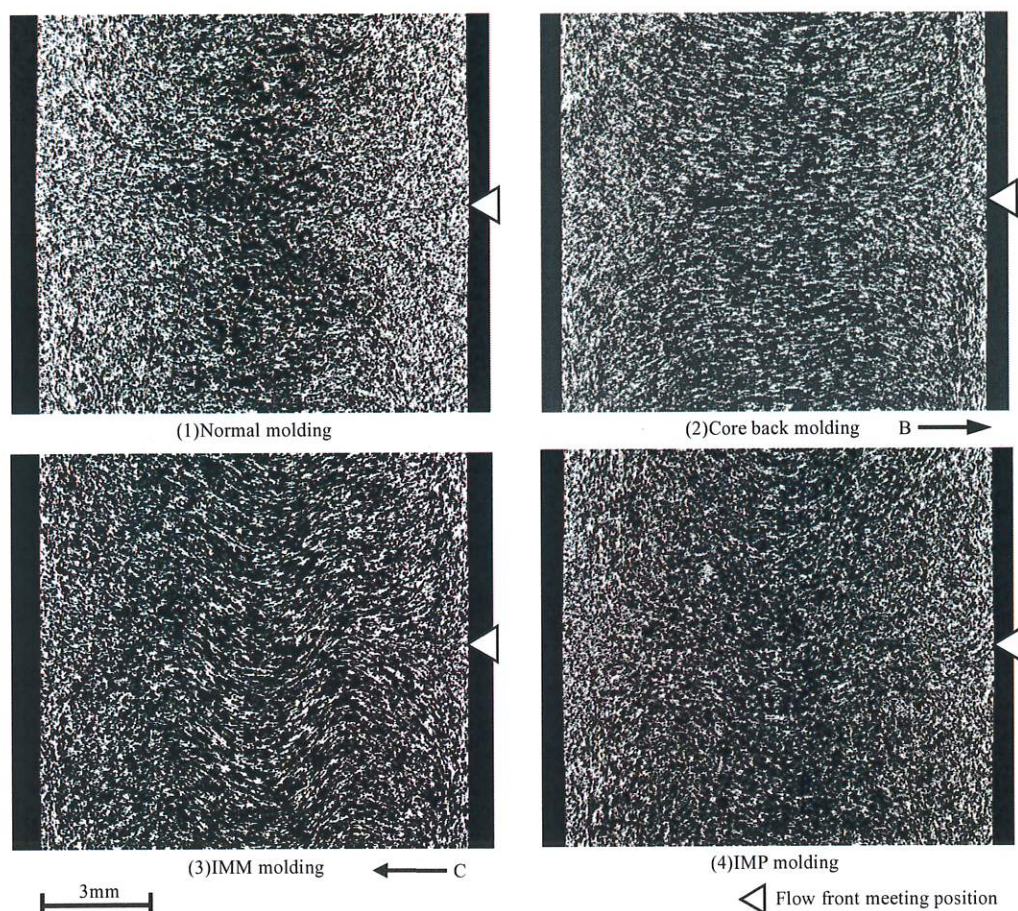


Fig.10 Observation results of glass fibers by x-ray CT scanner (METROTOM800)

繊維が強く配向している。これは、コアバックを行うことで、矢印 B で示すコアブロックの引き下げ方向に向かって樹脂が流れ、それに伴い繊維が引き下げ方向、すなわち、成形品厚み方向に強く配向するためと推察される。(3)の IMM 工法成形品では、厚み方向中央部において、厚み方向に沿って繊維が M 字状に蛇行するように配向している。これは、(2)のようにコアバック過程において成形品の厚み方向に一旦配向した繊維が、矢印 C 方向に圧縮を受けて若干回転したためと推察される。(4)の IMP 工法成形品では、IMM 工法ほど顕著な繊維の蛇行が見られない。これは IMP 工法ではコアバックを行わないために、圧縮直前において IMM 工法ほど厚み方向に繊維が強く配向せず、圧縮を受けても繊維が大きく蛇行しなかったためと推察される。

以上のように、コアバックを行うと、成形品厚み方向に繊維がより配向しやすくなること、そして、IMM 工法成形品では、コアバックによって厚み方向に一旦配向した繊維が、圧縮により蛇行状態になることが明らかになった。

4.5 成形品の表面形状・性状

図 4 に示したフローフロント会合部付近 b 部における表面形状の測定結果を図 11 に示す。すべての成形プロセスにおいてウェルドの V 字溝は生成されていない。(1)(2)の通常成形とコアバック成形品では、橙色が分布する会合部付近を頂点として、会合部から両側部にかけて傾斜状を呈している。コアバック成形品の方が、通常成形品よりも傾斜が緩やかで、比較的平坦な面となっている。図 10(1)(2)に示されるように、会合部付近では、成形品の厚み方向に繊維が配向しており、成形品の冷却時においてこれらの繊維が補強効果を発現し、厚み方向の収縮を抑制

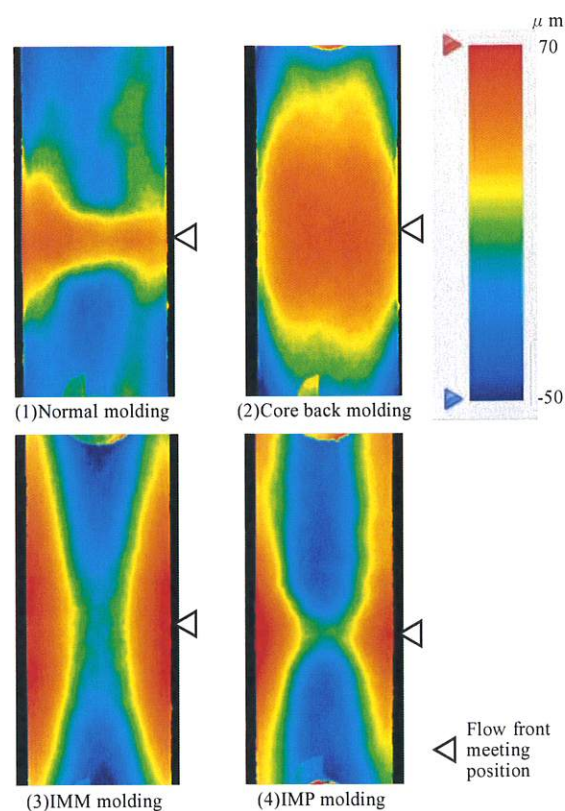


Fig.11 Measurement results of surface shape of molded products

する。一方、会合部の両側部では、表面に対して平行方向に繊維が配向しているために、厚み方向の収縮が大きくなる。また、コアバック成形品では、通常成形品に比べて、厚み方向に配向する繊維が会合部から両側部にかけて広く分布するために、収縮の小さい領域が両側部にかけて拡大する。このように、会合部付近とその両側部における繊維配向に起因する収縮状況の異方性が、上記表面形状発現の原因と推察される。(3)(4)のIMM工法とIMP工法成形品では、通常成形とコアバック成形で見られた会合部から両側部にかけての傾斜に加えて、直交する成形品幅方向の両端部から中央部にかけての傾斜が重畳された鞍形の表面形状となっている。既報⁹⁾にて、IMP工法では、圧縮によって成形品内部に生じた残留応力が離型後に開放され、成形品幅方向の両端部において膨れが発生することが確認されている。これより、IMM工法とIMP工法成形品の表面形状は、通常成形とコアバック成形品の繊維配向に起因する表面形状の上に膨れが重畳されて発現したものと推察される。このようにウェルドのV字溝は生成されないものの、コアブロックの駆動方法に応じて成形品の表面形状が変化することが明らかとなった。

図4のc-cライン上の表面粗さRaを測定した。その結果、通常成形品では $0.473\mu\text{m}$ 、コアバック成形品では $0.395\mu\text{m}$ 、IMM工法成形品では $0.345\mu\text{m}$ 、IMP工法成形品では $0.408\mu\text{m}$ となり、また、成形品表面への繊維の露出が激しくなるほどRaが増加することが確認された。コアバックを行うコアバック成形とIMM工法の成形品のRaが、行わない通常成形とIMP工法成形品よりも小さくなり、特に、IMM工法成形品のRaが最も小さく良好な面性状が得られた。コアバック成形とIMM工法の流動過程における2mmの薄いキャビティ内では、通常成形とIMP工法の12mmの厚いキャビティ内に比べて樹脂の流動圧力が高いことを圧力計測により確認している。これよりコアバック成形とIMM工法成形品では、キャビティ壁面に成形品表面の樹脂が十分に押し付けられ繊維の露出が抑えられた状態で冷却固化し、最も良好な面性状が得られたものと推察される。

4.6 成形品強度

図12は、各成形プロセスによって得られた成形品の引張強度を示している。通常成形とコアバック成形品に比べて、IMM工法とIMP工法成形品の方が、引張強度が高くなっている。また、いずれの成形プロセスにおいてもフローフロント会合部で破断するケースが多いことを確認している。フローフロント会合部で破断するケースが多いのは、図10に示したように、同部において引張荷重の作用方向に対して垂直な方向に配向する繊維が多いこと起因している。このような繊維配向状況においてもIMM工法とIMP工法成形品の引張強度が高くなったのは、圧縮を行うことで、図7に示されるように応力集中を引き起こすボイドが抑止されること、樹脂の密度が増加することが主な原因と推察

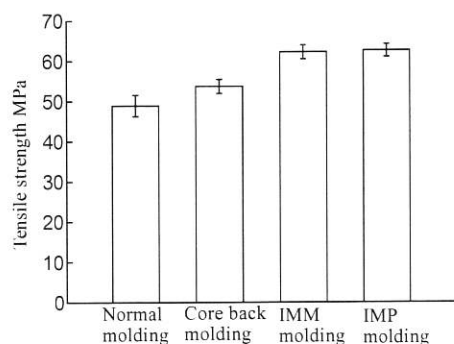


Fig.12 Measurement results of tensile strength

される。また、圧縮により繊維が蛇行する、すなわち、引張荷重の作用方向に繊維が若干配向を変えることも、多少の引張強度の向上をもたらした原因の一つと推察される。

5. 結 言

本論文では、IMP工法金型を用いて、コアブロックの駆動方法が、厚肉射出成形品の各種特性に及ぼす影響について検討を行った。得られた結果を以下に列記する。

- (1) コアバックを行わない通常成形とIMP工法成形品では、ジェットティングが発生し、表面に外観不良が生成される。一方、コアバックを行うコアバック成形とIMM工法成形品では、キャビティ厚みが薄い状態で樹脂がキャビティ内に流入するためにジェットティングが発生せず、良好な外観が得られる。
- (2) 圧縮を行わない通常成形とコアバック成形品では、多数のボイドが発生する。一方、圧縮を行うIMM工法とIMP工法成形品では、キャビティ内において高い樹脂圧力が長時間にわたって保持されるために、ボイドの発生が抑止される。
- (3) コアバックを行うことで、コアブロックの引き下げ方向に向かって樹脂が流動するため、それに伴い成形品厚み方向に繊維がより配向しやすくなる。また、IMM工法成形品では、コアバックによって厚み方向に一旦配向した繊維が、圧縮により蛇行状態へと変化する。
- (4) ウェルドのV字溝は生成されないものの、コアブロックの駆動方法に応じて成形品の表面形状が変化する。また、コアバックを行わない通常成形とIMP工法成形品では、表面粗さRaが大きい。一方、コアバックを行うコアバック成形とIMM工法成形品では、Raが小さい良好な面性状が得られる。
- (5) 圧縮を行わない通常成形とコアバック成形よりも、圧縮を行うIMM工法とIMP工法の方が、ボイドが抑止され、また、樹脂の密度が増加し、さらに、繊維が引張荷重の作用方向に若干配向を変えるために引張強度が高くなる。

以上のように、コア駆動方法が、厚肉射出成形品の樹脂流動挙動およびボイド発生、ガラス繊維配向、外観や表面形状・性状、引張強度に及ぼす影響を明らかにした。特に、コアバックが成形品の外観や表面性状に、圧縮が引張強度に良い効果をもたらすことを明らかにした。本論文で得られた知見は、IMP工法やIMM工法の改良に留まらず、新たな成形プロセスの提案や金型設計に利用できるものと考えられ、今後、厚肉射出成形品の品質向上に役立てられることを期待する。

謝 辞

おわりに、射出成形機の改造にご協力いただいた日精樹脂工業株式会社に謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 廣恵章利, 本吉正信: プラスチック成形加工入門, 日刊工業新聞社 (1995) 243.
- 2) プラスチック成形加工学会編 テキストシリーズ プラスチック成形加工学I, シグマ出版 (1996) 148.
- 3) 横井秀俊, 折野厚志: 成形加工'99 (1999) 91.
- 4) 折野厚志, 横井秀俊: 成形加工 2000 (2000) 93.
- 5) 村田泰彦, 真板 健, 竹内 匠, 忽滑谷晃博, 横井秀俊: 2005 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集 (2005) 965.
- 6) 射出成形事典, 産業調査会 (2002) 352.
- 7) 伊澤慎一, 中村伸之, 数面博義, 焼本勝利: 成形加工, **10**, 4 (1998) 263.
- 8) 茂木淳志, 村田泰彦: 成形加工 2010 (2010) 121.
- 9) A.Motegi, T.Hishida, and Y.Murata: International Journal of Automation Technology, **12**, 6 (2018) 930.
- 10) 小松道男, 大嶋正裕: 成形加工, **22**, 2 (2010) 87.