パルプ射出成形 (PIM) の技術開発動向

横井 秀俊^{*1}・丸野 満義^{*2}

1. はじめに

“Al” Gore氏とともに、今年のノーベル平和賞を受賞した、地球温暖化の科学的根拠を審議する「気候変動に関する政府間パネル (IPCC)」の第1作業部会は、今年2月に承認した第4次評価報告書で、人間活動による温室効果ガス排出が要因となった可能性がかなり高いことを、はじめて公式に確認した。地球の温暖化は確実に進み、温度上昇は工業化以前より0.6℃以上に達している。今後2℃のPoint of No Return (地球温暖化の引き返すことのできない時点) を越えると、地球温暖化は急進し、グリーンランドの全面溶解 (21世紀中に数mの海面水位上昇の可能性を伴う) が始まるかもしれない^{1),2)}。事実として、わずか10ヶ月足らずの間に、トルコの国土面積に匹敵するグリーンランド氷床がすでに消失している。

こうした中で、「課題先進国」日本でも、京都議定書の発効に尽力する傍ら、省エネルギー化やリサイクル技術の開発を進めてきた。成形加工の分野でも、成形機の電動化などで、省エネで世界をリードして来たが、有効なりサイクル技術に加えて、さらなる低環境負荷の成形加工技術開発が今後ますます求められている。また、バイオエタノール製造との競合が一気に表面化して、原料の安定供給に不安要因を抱えるものの、ポリ乳酸 (PLA) をはじめとする植物原料由来のプラスチックに対し、石油系に代わる環境低負荷素材としての期待は高く、多様な分野への適用と検討が進められている³⁾。しかし、なおコスト高とともに耐熱性、耐衝撃性の低さ、柔軟性の不足などが指摘される。成形加工により、いかにして機械的特性を引き出すか。ナノコンポジット技術と発泡技術を組み合わせた耐熱性の高い素材開発も進められており⁴⁾、こうした材料改質技術と連携した成形加工技術の開発が、原料の安定供給の確保と相まって、環境低負荷の新素材を世に早く送り出すための最終的な鍵を握っている。

総合的な視点に立った環境対応型の成形加工技術“エコ成形加工”への指針と技術的な確立とが強く求められるな

(1) 可塑性・計量工程

(2) 射出工程

(3) 加熱・乾燥工程

図1 パルプ射出成形 (PIM) の成形工程

かで、本稿では、筆者らが近年取り組んできたパルプ射出成形の研究開発を取り上げ、技術の概要と開発動向を紹介したい。

2. パルプ射出成形 (PIM)

パルプ射出成形 (通称 PIM ; Pulp Injection Molding) は、パルプと澱粉を主成分とする材料を射出成形して、紙質の3次元立体構造物を得る新しい加工技術である。同技術は、1998年に大宝工業㈱により、“紙繊維を利用した製品の成形方法及び金型”として開発された⁵⁾。これまで世に広く知られていなかった PIM ではあるが、開発以来、約10年という長い技術改良の歴史が秘められている。はじめに、具体的な工程の概略と、近年の研究成果として明らかとなった PIM 成形品の特徴について順に紹介したい。

2.1 PIM の工程概略

図1に PIM の工程概略図を、図2に PIM 成形材料を示す。PIM 成形材料は、パルプと水溶性結合材である澱粉とを主成分とする原料に、水を加え混練して製造する。代表的な主原料は、パルプ 60 wt%と澱粉 30 wt%に、水溶性のポリビニールアルコール (PVA) 10 wt%を調整剤として加えたものである。これに水を加えて、最終的な水分比率が30～40 wt%になるように調整する。なお、PVA

^{*1} Yokoi, Hidetoshi
東京大学国際・産学共同研究センター
東京都目黒区駒場 4-6-1 (〒153-8505)

^{*2} Maruno, Mitsuyoshi
大宝工業㈱ PIM グループ
守口市大日町 1-3-7 (〒570-0003)
2007.10.22 受理

を加えなくても PIM 成形は可能である。

この PIM 成形材料を、熱可塑性樹脂と同様に、射出成形機にて金型内に充填し形状を付与する。その際、熱可塑性樹脂では充填後に冷却して形状を固定する。一方 PIM では、シリンダ内で 100℃ 未満に設定・保持された成形材料を、100℃ 以上（一般には 150～180℃）の金型内に射出する。PIM 成形材料には、主に素材の結合と流動性付与のために水分が加えられている。この水分を、型内充填後のキャビティ内で加熱・蒸発させ、また糊化した澱粉を乾燥させて形状を固定する。金型から成形材料への伝熱促進と形状の付与には型を閉じる必要がある。逆に水蒸気の排出促進には型を開く必要がある。この相矛盾する要件を両立させるために、ここでは金型を少し開閉させる操作を繰り返すこととした。いわば、キャビティ形状のアイロン掛けにより、糊付けしたパルプ繊維集合体を乾燥させる成形工程といえる。

PIM 射出成形機と金型の外観を図 3 に例示する。一見すると、これらは汎用のプラスチック射出成形機と金型とほとんど同じである。しかし、シリンダ冷却ファンと型開閉機能の付与など、専用機としての改造がなされており、また金型には多くのヒータが内蔵されている。

2.1 PIM 成形品の特徴

PIM 成形品の一般的な特長は、①低い比重（0.8～0.9）、②薄肉成形（0.2 mm～0.5 mm）が容易、③汎用樹脂並み

の高い寸法精度、④高い耐熱性（約 200℃）と遅燃性（例えば [FMVSS 302 自動車内装材料の燃焼性準拠試験] での燃焼速度；39 mm/s）、⑤一般ゴミとしての処分が可能、⑥高い生分解性能（約 6 ヶ月で土中完全分解）、⑦製品原料として易リサイクル性、⑧ガス減菌が可能、⑨無害（食品容器にも使用可）、などが挙げられる。

一方、紙素材であることから派生する欠点として、①水や多湿に弱く、湿気（あるいは乾燥）によって変形し易いこと、②パルプ繊維の配向や偏在により機械的特性のバラつきや表面性状のうねりが出やすいこと、などが明らかになっている。

近年では、燃えるゴミとして廃棄がし易く、水への可溶性、再生利用も簡単など、環境対応技術としての評価がなされ、急速に注目され始めている。図 4 はこうした PIM の成形品例（試作品を含む）である。すでに、廃棄時に分別の手間をなくすためのファイルの留め具、薬用アンプルケース、環境配慮と特有の質感を生かした CD ケースなど、環境イメージを重視する用途に徐々に適用が進められている。0.2 mm の薄肉成形も可能とするなど非常に高い成形加工性能があり、それに加えてラップの切刃にも使用できる硬度、PS よりも大きい引張強度と曲げ剛性、レーザープリンタ等による描画特性など、面白い特長が生かされつつある。

表 1 に汎用樹脂とポリ乳酸⁹⁾、PIM 成形品のそれぞれに

図 2 PIM 成形材料の製造工程

図 4 PIM 材料の LCA データ比較
(原料からペレットまで製造時の CO₂ 発生量)

(1) PIM専用射出成形機
(NEX220-50EPI；日精樹脂工業)

(2) パーフロー実験金型
(幅：10mm、厚さ：1mm)

図 3 パルプ射出成形機と金型の外観

ついて、機械的諸特性の比較を例示する。またLCA（ライフサイクルアセスメント）の手法により、樹脂、ポリ乳酸と同様に、原材料分を含めたPIM成形材料製造時のCO₂発生量を算出して図4に比較した。ここでは、日本製紙連合会等が公開しているパルプ等の素材データと、PIM成形材料の押出・造粒時の使用電力量に基づき算出している。これらの結果から、PIMのCO₂発生量はPPの35%、ポリ乳酸の39%と比べて少なく、環境負荷が非常に小さい材料であることを改めて確認することができる。

4. パルプ射出成形技術の研究開発動向

パルプ射出成形は、開発以来の地道な技術的改良によって、成形技術としてほぼ確立を見たものの、広く一般へ実用化されるまでには至らなかった。その背景には、PIM

とプラスチック射出成形技術とは形態上ほぼ同じ工程から成り立ちながら、PIMの成形材料・成形品特性は本質的に異なり、各工程での成形現象がほとんど解明されていなかった事情が挙げられる。実は、水分を蒸発させるに要する型内乾燥時間は想像以上に長く、成形サイクルならびに成形に要するコストを大幅に押し上げていた。成形現象が複雑に絡み合い、その多くが未解明の中では、単に“成形時間を短縮する”といっても、成形材料、金型構造、成形機とスクリュ形状、成形条件など、何をどうすればいいかの明確な方針が定まらず、文字通り手探りの対策とならざるを得なかった。

そこで2005年度より、成形現象の解明、最適な成形材料と成形条件、金型技術の確立、さらには成形サイクルの大幅な短縮を課題として、東京大学、大宝工業(株)、日精樹脂工業(株)の3者による共同研究プロジェクトが「民間等との共同研究」制度に基づき実施されている。ここでは、PIM成形材料の流動特性⁷⁾およびPIM成形品の諸特性の評価^{8)~10)}、成形時間の短縮化^{11)~13)}、可塑化過程と射出過程の検討¹⁴⁾について、最新成果の概略を紹介する。

4.1 PIM成形材料の流動特性評価

パルプ射出成形における流動特性を明らかにするため、熱電対の多点計測によるバーフロー流動性評価金型を新たに開発し、流動特性に与える金型温度および水分率の影響などについて検討を行った。PIMでの流動性を左右する成形条件として、材料・ゲート形状の違いよりも金型温度および材料に含まれる水分が大きく寄与していること、厚さ1mm、幅10mmのバーフローキャビティでは、最大800mmもの流動長が実現できることが明らかになった

表1 汎用プラスチックとの機械的諸特性の比較

	PIM 材料		汎用樹脂		ポリ乳酸
	新品材料	新聞・古紙	PS	PP	
比重	0.85	0.78	1.05	0.9	1.25
引張強度 (MPa)	29.0	19.0	28.0	19.0	69.0
伸び (%)	8.5	4.8	40	80	4.0
曲げ強度 (MPa)	24.5	35.0	47.0	33.0	100.0
曲げ弾性率 (MPa)	2900	3600	2500	1200	3800
衝撃強さ (kg・J/m ²)	11.5	5.6	6.0	6.6	2.1

(1) レリーフ付きのCDケース

(2) 複雑なリブ付き紙管カバー

(3) 0.5mm薄肉コップとアンプルケース

(4) 微細なクリップと止め具

図5 パルプ射出成形品の例

図6 パーフロー金型によるパルプ射出成形の流動特性評価(幅: 10 mm, 厚さ: 1 mm)

図7 PIM 成形品の表面および断面の観察

(図6)⁷⁾.

こうした大きな流動長は、型内冷却により流動抵抗が増大する熱可塑性プラスチックでは実現困難なレベルといえる。PIM 成形材料の流動過程では、材料内の水分を材料表面から噴出・蒸発させながら充填が行われる。この気層の介在によって、流動材料と金型表面との摩擦抵抗が著しく低下するため、大半の材料がプラグフロー状に滑り流動し、大きな流動長を可能にしたものと推察される。

4.2 PIM 成形品の諸特性評価

PIM 成形品の特性調査を目的として、バックライト観察ならびに成形品断面観察を行った。成形品の内部には、センターゲートから半径方向に向かう拡大流方向と直交するように、粗密な組織が層状に生成している。また、断面観察により、粗密パターンが空隙の生成に対応することが確認された(図7)⁸⁾。こうした空隙は、成形品内部での高い水蒸気圧の生成と型開閉動作とに関連して形成され、ゲート形状、縮小流領域の有無による材料流動の変化によっても、その大きさや形態が規定される(図8)¹⁰⁾。また、空隙形状と生成状況は、寸法精度、収縮率に大きく関係することも具体的に明らかになった。

空隙の生成パターンは、パルプ繊維の配向方向と直接関係している。パルプ繊維の配向は吸湿に伴う面内伸縮率を左右し、繊維配向方向とその直交方向とでは、伸縮率に1.7~2.5倍もの大きな開きが確認された。環境湿度によるPIM 成形品の反り生成は、こうした繊維配向の異方性と

図8 ゲートタイプの違いによる曲げ試験片内部の空洞分布の比較(厚さ中心での断面観察写真, キャビティ寸法; 10×100×3 (mm))

図9 PIM 成形品の引張破断強度に及ぼすパルプ繊維長の影響

空隙分布形態の非対称性によって、主にもたらされている。

PIM 成形品の引張強度は、PP とほぼ同等の高い強度を示すが、破断伸びは0.05~0.13と小さい。また平均繊維長が大きいと引張強度は上昇し、逆に曲げ強度は低下傾向を示すことも明らかにされた(図9)⁹⁾。環境湿度を変化させると、湿度の上昇に伴って強度・弾性率ともに大きな低下を示すが、逆に伸びは増加している(図10)⁸⁾。

PIM 成形材料では、一般にPVAと澱粉の比率が強度に直接関わっている。PVA 組成比率は、引張試験では20 wt%, 曲げ試験では30 wt%程度で最も良好な結果が得られている。一方、材料充填直前に金型を開くことで内部空隙を減少させることができ、これによって機械的向上が可能となる¹⁰⁾。同時に、表面性状の著しい改善もはかられている。

また吸水接触角試験では、PIM 成形品は撥水加工処理の紙とほぼ同等の耐水性を示すことが確認された⁸⁾。

4.3 PIM 成形サイクルの短縮化

PIM 成形サイクルの時間短縮を課題に、金型温度、型開閉動作、水分率の影響を系統的に調べた。水分率を極限まで減少させるに従って、また金型温度を高くするに従って、成形品の乾燥に要する型開閉回数は大幅に減少することが明らかにされた(図11, 図12)¹¹⁾。

最近では大型成形品を想定したキャビティを用い、材料

図 10 PIM 成形品の引張強度特性における環境湿度の影響

図 11 材料水分率による型内乾燥速度の違い

図 12 成形直後と 48 時間後の成形品重量差と金型温度・開閉回数との関係

図 13 スクリュ射出速度とノズルからの射出材料温度との関係

のペレット化および金型の熱効率の向上によるハイスサイクル化の可能性も検討している。材料のペレット化は、可塑性計量時間をほぼ半減させるとともに、成形の安定性にも極めて有効であることが示された¹²⁾。さらに油温調方式を導入し、均温加熱と熱供給量の増加を試みた¹³⁾。これらの取り組みを総合して、従来約 60 s を要していた 300×300×1 (mm) の大型成形品の成形サイクルを、現在では約 32 s にまで大幅に短縮させて連続成形ができることが、実証的に明らかにされている。

4.4 可塑化過程と射出過程の検討

可塑化および射出条件により流動材料内の温度がどのように変化するかを評価するため、山極らの方法¹⁵⁾に基づいて、ノズル中心と同軸に針状の熱電対を突き出した温度計測ユニットを新たに試作した。各条件での温度計測実験では、スクリュ回転速度の影響は僅かながら、射出速度の上昇に伴って材料温度は著しい上昇を示した (図 13)¹⁴⁾。また小さいノズル径で、より高い温度が計測された。こうし

た温度上昇は、縮小流領域での高せん断変形により、主にパルプ繊維間での摩擦熱がもたらしたものと推察された。

スクリュ圧縮比を変化させた計量安定性の評価実験では、従来の圧縮比 2.3 では、計量ストロークを長くすると計量不安定を生成すること、圧縮比を 1.5 と小さくすると計量の安定化が図られることを確認した。以上の結果は、樹脂に比べて PIM 材料の体積圧縮率が小さく、圧縮部で材料詰まりを生成するためと考察された。これより PIM 成形には、圧縮比の小さなスクリュが適することが明らかにされた。

5. おわりに

パルプ射出成形は、すでに基礎研究段階から応用技術の開発段階へと新たなステージに切り替わりつつある。その一方で基礎研究も、成形現象を極めるための可視化実験解析へと新たなステージを迎えつつある。プラスチック代替を目指す低環境負荷の成形加工技術開発の枠組みを越えて、

紙素材ならではの長をを活かした新しいエコ成形加工の可能性探索が、現在、(財)生産技術研究奨励会「PIM コンソーシアム」の中で積極的進められている。柔らかいPIM成形品、硬く高強度なPIM成形品、防水特性や印刷特性を高めたPIM成形品、新しい梱包材などの開発が進められ、PIMはますます魅力的なエコ成形加工になりつつある。

日本で生まれた新しい成形加工技術のPIMが、近い将来世界中に広がり、地球温暖化の抑止に些少とも貢献できることを期待するばかりである。本稿が、エコ成形加工の研究者、技術者に少しでも役立てられれば著者の幸いである。

参 考 文 献

- 1) 山本良一, Think the Earth Project 編: 気候変動 + 2℃, (2006), ダイヤモンド社
- 2) サステナビリティの科学的基礎に関する調査プロジェクト編: サステナビリティの科学的基礎に関する調査 2006, (2006)
- 3) 河西純一: 成形加工, **17**, 656 (2005)
- 4) <http://www.unitika.co.jp/news/news-data/high-polymer-0041.html> (ユニチカ株式会社ホームページ)
- 5) 例えば US Patent NO. 6254814
- 6) Vink, E.T., Rabago, K.R., Glassner, D.A. and Gruber, P.R.: *Polymer Degradation and Stability*, **80**, 403 (2003)
- 7) 横井秀俊, 丸野満義, 松坂圭祐, 宮下治樹, 増田範通: 成形加工シンポジア '05, 139 (2005)
- 8) 松坂圭祐, 丸野満義, 宮下治樹, 増田範通, 横井秀俊: 成形加工シンポジア '05, 143 (2005)
- 9) 松坂圭祐, 成岡弘康, 丸野満義, 宮下治樹, 増田範通, 横井秀俊: 成形加工 '06, 151 (2006)
- 10) 松坂圭祐, 成岡弘康, 丸野満義, 宮下治樹, 増田範通, 横井秀俊: 成形加工シンポジア '06, 97 (2006)
- 11) 丸野満義, 松坂圭祐, 増田範通, 宮下治樹, 横井秀俊: 成形加工シンポジア '05, 147 (2006)
- 12) 丸野満義, 松坂圭祐, 宮下治樹, 増田範通, 横井秀俊: 成形加工 '06, 149 (2006)
- 13) 丸野満義, 松坂圭祐, 宮下治樹, 増田範通, 横井秀俊: 成形加工シンポジア '06, 95 (2006)
- 14) 丸野満義, 松坂圭祐, 宮下治樹, 増田範通, 横井秀俊: 成形加工 '07, 197 (2007)
- 15) 山極佳年, 龍野道宏, 小林恒司, 寺島貴: 成形加工シンポジア '98, 269 (1998)

賛助会員の皆様へ 「製品・技術紹介」へご投稿下さい

「成形加工」誌には、「製品・技術紹介」のコーナーを設けています。

「製品・技術紹介」はプラスチック成形加工学会の賛助会員が自社の製品・技術を広く会員にアピールするための記事で、詳細は以下のとおりです。

1. 賛助会員企業の開発した装置・機械・材料等, 各種製品と技術を資料・図表・写真等により紹介するもの。
2. 賛助会員企業に属する個人 (または複数名) の記名入り記事とし, 長さは刷上がり 1 頁とする (図表を含み 2300 字程度, 原稿 1 頁当たり 26 字×27 行=702 文字で作成)。
3. **掲載料は無料** (ただしカラー印刷の場合は実費負担)。

この「製品・技術紹介」への投稿を, 是非ご検討下さい。

「製品・技術紹介」は, 投稿順 (抜閲後) に随時掲載しております。記事のスタイル, 内容等につきましてはすでに掲載されている幾つかの記事をご参照下さい。

「成形加工」編集委員長 大嶋正裕