射出成形

山 部 昌*

1. はじめに

射出成形に関するここ10年間の技術の進歩について執筆にあたり、この期間の社会・経済状況を簡単に振り返ってみる。まず社会的に大きな出来事は、リーマンショックにともなう株価の暴落、東日本大震災を経験し、プラスチック業界も大きく左右された激動の10年間であったが、ここ5年間は株価も上昇し、経済も安定してきているように思える。プラスチック業界も、2008年のリーマンショック以降は、安定的な推移を示している。例えば経済産業省プラスチック製品統計年報によると、リーマンショックで落ち込んだ射出成形機の出荷台数は、現在ではその当時の2倍となっていることからそれをうかがえる¹⁾。その中で、本稿では射出成形の10年の歩みを、射出成形機技術、成形加工技術、CAE技術、金型技術の観点から振り返ってみることにする。

まず射出成形機技術としてのトピックスは、製品の付加価値をさらに高めるべく成形機自体の改良や、複合化・大型化が進んだといえる。また成形品の表面性向上のための微細転写技術、さらなる軽量化のための射出発泡成形技術などによる自動車部品等への応用があげられる。さらにCAE技術に関しては、2次元解析から3次元解析へと移行し、射出成形はもちろんの事、様々な成形技術への事前予測技術として、活用されるようになってきた。また大型化とコスト低減、表面品質向上のための金型加熱・冷却システムの高速化がますます進んできたと感じている。ここでは、筆者の狭い見識ではあるが、それぞれの観点から具体的な事例を紹介する。

2. 射出成形機の進歩

2.1 マルチマテリアルに対応した成形機の開発

軽量化に対するニーズにこたえるべく、FRPやCFRPなどの強化繊維プラスチックの開発が盛んであるが、構造上の必要からマルチマテリアルとすることが最も効果的と考えられる²⁾。このことにより、多色・異材質成形が有効である。このために射出ユニットを複数有する成形機の開発とその製品化がすすめられている。特に軽量化と強

度・剛性を両立する方策として、ハイブリッド成形があげられる。これにはいろいろな方法が考えられるが、圧縮成形により部品を賦形した後に、同一金型にて射出成形を行い、リブなどを一体で成形する方法である。図1にその事例を示す³⁾。予備加熱された連続繊維のプリプレグを金型内にセットし、その後圧縮成形を行うと同時に射出成形を行う。また、この工法は、射出成形単独では得られない機械的特性を、プリプレグシートとの組み合わせにより、圧縮成形だけでは得られない複雑形状部品を成形する方法である。

2.2 強化繊維の破損抑制と分散性向上を狙ったスクリュウの開発

射出成形による繊維強化品は古くから適用されてきたが、スクリュウ内での繊維の破損や高含有率の場合における分散性は大きな問題である。実際長繊維ペレットを用いた成形品での繊維長分布は、短繊維ペレットと大きな差異はなく、この解決が急がれている。

井上らは⁴⁾、射出成形におけるスクリュウ形状の違いによるFRTPの繊維長と分散性を論じ、可塑化工程における残存繊維長と繊維分散性は技術的には対立の関係にあるが、熔融と分散を個別に行うスクリュウデザインとすることで、両特性が同時に向上する傾向にあると結論づけている。具体的には、樹脂がスクリュウのダルメージ部に到達する前までに完全熔融していれば、ダルメージ部で発生するせん断力が低減し、繊維折損を抑制することができると考えた。それを検証するために粒子法によりせん断応力(図2)を求め、実際にその部分のせん断力が低下することを確認し、さらに3種類のスクリュウによる繊維折損を実験結果と比較して(図3)、その有効性を述べている。その成果により、「超高混練スクリュウ」と「V&Dスクリュウ」を開発し、上市している⁵⁾。

3. 成形加工技術の進歩

3.1 表面加飾技術

射出成形品の表面品質改善はここ10年といわず、長年改良が続けられてきており、その進歩は大きい。ここでは特に精密射出成形による微細転写を取り上げて紹介する⁶⁾。一般的に進められてきた技術は、金型表面を急速に加熱して、また急速に冷却することで、通常の冷却では得られない製品表面の高次構造形成による転写性向上があげられる。その方法の一つとして、電磁誘導加熱を行う方法がある(その詳細は後述する)。図4に、ABSにおけるサ

* Yamabe, Masashi
金沢工業大学 工学部 機械工学科
白山市八束穂3 1 石川ソフトリサーチパーク(〒924 0838)
2018 5 21 受理

図1 Hybrid Injection Molding System³⁾

図2 Mean shear stress evaluated by particle tracking method for V & Long-D screw⁴⁾

図3 Residual fiber length for V & Long-D screw⁴⁾

ブμ転写の様子を示す。射出速度 100 mm/s において、電磁誘導時間を 0 s から 6 s に変化させて、転写成形を行った結果の成形品表面の SEM 画像を示す⁷⁾。これらの結果から長い誘導時間では転写性が向上する様子が報告されている。また伊藤ら⁸⁾⁹⁾は AAO 膜 (アルミニウム陽極酸化皮膜) を用いて、微細転写成形をホットエンボスもしくは射出成形で行い、ナノ構造の微細転写を実現している。AAO ナノ多孔の直径を 200 nm から 50 nm まで変化させて、様々なサイズのナノ微細転写を行っている。図5に AAO 膜をスタンプに用いた射出成形品の表面 SEM 像を示す¹⁰⁾。50 nm 径のナノ微細構造が転写されている様子がうかがえる。さらに伊藤らは、AAO 膜下部にセラミック

図4 異なる誘導時間による ABS 表面観察写真 (SEM 像)⁷⁾

図5 AAO 膜を用いた射出成形品の表面 SEM 像¹⁰⁾

材を配置することで断熱効果を高めており、通常の鋼材金型よりも転写性が向上することも確認している。

3.2 射出成形による金属 樹脂接合技術

この 10 年、軽量化のニーズはさらに高まり、樹脂材料への置換えが進んではいるものの、樹脂材料単体での部品化には限界がある。このため、金属と樹脂とを組み合わせたマルチマテリアルによる軽量化が必須となる。金属 樹脂間の接合は、ボルト締結などの機械的な接合もあれば、接着のような接合方法もある。ここでは射出成形と同時に

接合が完了する方法について紹介する^{11)~13)}。すなわち前述の微細な転写技術の向上とともに、金属表面を凹凸に加工し、直接射出インサート成形する方法¹⁴⁾も有望と考えられる。瀬戸らはアルミプレートに表面加工したサンプルをインサートし、射出成形品を用いて引張試験を報告している¹⁵⁾。ここでは射出速度、金型温度、保圧力、樹脂温度の4つの標準条件を求め、3つの条件を固定して1つの条件を変化させた場合の引張強度に対する感度解析を行っている(図6)。各条件の幅はまちまちであるために、定量的な感度解析はできないが、標準条件に対して2倍の強度を有する条件があれば、半分以下の条件もあり、凹凸面への樹脂流動が強度に左右されていることを示唆している。このため、凹凸部への樹脂流動の詳細を解明するために、可視化ができる金型を持って、その流入挙動の観察を行っている(図7)。さらにガラス繊維を含有した場合の可視化も行い(図8)、繊維の長さの違いによる流入挙動の違いのメカニズムに関しても報告している。

3.3 射出発泡成形における不良現象の可視化

射出発泡成形は、樹脂と発泡剤を混合した熔融材料を金型内に射出し、金型内で樹脂が固化するまでの工程に微細な気泡を生成させる方法であり、その概念は古くからあるものの、その制御が複雑でなかなか製品化には至っていなかったが、この10年で自動車部品を中心として、さらなる軽量化のために、大いに進んだ技術であろう。しかしながら表面精度を重視する製品においては、表面品質を低下させる不具合に関しては、十分かつ定量的な改良方法が確立されていないのが現状である。このために金型内に流入する際の材料の流動・固化現象の可視化が待たれていた。射出成形金型内の可視化に関しては、以前より横井ら¹⁶⁾が精力的に推進しているが、ここでは射出発泡成形プロセスの可視化、特に射出発泡成形において頻繁に発生する不具合についての可視化事例を紹介する。瀬戸らは①スワールマーク発生メカニズムに関しては、図9(a)に示すように、フローフロントが観察位置を通過直後に流動方向に沿って白い筋状のスワールマークが確認でき、それがそのままス

図6 Measurement result of joining strength under each condition¹⁵⁾

ワールマークとなることを明らかにしている¹⁷⁾。この要因として、図9(b)に示すように、フローフロントの先端部で生成された気泡が、ファウンテンフローにより気泡が表面に流動し破裂することであると考えている。

②アバタの発生メカニズムに関してはスワールマークと同様にフローフロント部で成長した気泡がファウンテンフローによって表面に流動し破裂した後に引き伸ばされたものと考えている。さらにフローフロント通過直後(図10(a))とコアバック後の画像(図10(b))を比較すると、スワールマークの先端部にアバタが発生していることを確認しており、アバタとスワールマークの発生は、いずれも関連性があり、フローフロントにおける気泡の成長と破裂を抑制することが肝要と結論づけている。

3.4 繊維配向度定量化技術

ガラス繊維や炭素繊維を強化繊維とする複合材料は古くから種々の製品に適用されてきた。しかし従来は一方積層の長繊維シートがメインであったが、同時にペレットに強化繊維を含有させた繊維強化射出成形品も機械的特性向上のニーズより多用されてきている。それに伴い、強化繊維の配向制御による新たな構造発現を行うべく、強化繊維の配向状態や破断状態を定量化する技術^{18),19)}が大いに進んだと考える。従来は連続する2次元平面のSEM写真から画像処理により、その繊維配向を定量化する試みがまずなされたが、その作業の煩雑さに比べて、得られる結果の精度は乏しく、十分ではなかった。近年マイクロフォーカスX線CT装置(以下X線CT)を用いた方法が注目されて

図7 Schematic diagram of visualization mold block and observation method¹⁵⁾

図8 SEM photograph of cross section in joint part¹⁵⁾

いる^{20)~22)}。鈴木ら²³⁾は得られた X 線 CT 画像から、強化繊維だけを抽出する手法を開発し、その手法を応用して図 11に示すような円柱フィッティングにより 1本1本の強化繊維の長さと 3 次元座標での配向方向をテンソルの概念を用いて表現している。例えば¹⁷⁾図 12 に示す射出成形板の中央部付近と端部での厚さ方向の CT 画像から、3 次元配向度分布を定量的にもとめている。図 13 はその結果を示すが、場所により厚さ方向の配向度分布が異なることを明

らかにしている。またガラス繊維の含有率が、厚み方向の配向度分布に大きく影響を与えることも明らかにしている。

4 . CAE 技術の進歩

4.1 射出成形 CAE 解析の進歩

射出成形 CAE 技術は、1980 年代から金型設計、特にゲート設計、流動パターンの予測から定着し、その後はその解析の精度向上などが主な関心事となってきたが、ここ 10 年に限ってみると、2.5 次元モデルから、3 次元モデルへの移行が進んだことは挙げられるが、解析技術そのものに関する進展は過去に比べ減少してきているのではないかと考えている。その意味で、射出成形 CAE 技術も円熟期となり、解析技術の適用が通常業務に組み込まれたと考えるべきかもしれない。

(a) 平面方向からの観察画像

(b) 板厚方向から観察画像

図 9 スワールマーク発生時の可視化観察画像¹⁷⁾

(a) フローフロント通過直後の画像

(b) コアバック直後の画像

図 10 アバタ発生時の可視化観察画像

図 11 画像処理による繊維抽出プロセス²³⁾

図 12 成形品各部の繊維配向観察結果¹⁷⁾

(a) 3次元配向角の定義

(b) Centerの配向度分布

(c) Flow endの配向度分布

図 13 成形品各部の繊維配向度分布¹⁷⁾

4.2 固液混相モデルの適用による数値モデルの構築

岡田らは²⁴⁾、解析モデルが2次元から3次元へと移行する中で、可視化実験による固液境界面の挙動を観察し、固化層の成長速度を考慮に入れた独自の解析モデルの開発を行い(図14, 図15)、固化層の成長が樹脂流動に強く影響する薄肉射出成形品の解析技術の向上に取り組んだ。その報告の中で、まずはモデル化をおこない、その妥当性の確認・評価には、可視化実験から得られた板厚方向における樹脂流入成分の速度分布およびその結果をもとに算出したせん断速度分布を用いている。この数値モデルは、

(a) 境界条件

- ・ Non-Slip 境界を適用する
- ・ 移動境界条件：温度が低下した流動停止領域の速度をゼロとする

(b) 計算方法

・ 圧力・速度：Darcy 則を仮定して、流動コンダクタンスの概念を適用し、計算の自由度の大幅な低減を図る。これらを用いたCAE解析結果が、可視化実験結果および速度ゼロ領域進展メカニズムの仮説と良好な一致を示すことを報告している。またその後、薄肉実形状への適用が報告され²⁵⁾、従来では流動パターンが予測困難だった製品(図16)に対しても、実験との比較が述べられ、このモデル(固液混相モデル)は、

(1) 成形現象の高い再現性

(2) 解析規模の低減

(3) 計算時間の大幅な減少

が報告されている。

4.3 RTM 成形へのCAE技術の適用

RTM 技術は、今後大型一体部品の成形には不可欠な成形方法であり、樹脂材料の高速硬化(固化)技術や、高压

図14 Pattern diagrams related to heat input and output of amount of heat at the initial phase²⁴⁾

図15 Pattern diagrams related to heat input and output of amount of heat after growth solidification thickness²⁴⁾

図16 In Mold B, filling patterns between CAE and experiments are compared and position of flow front distance are measured²⁵⁾

樹脂注入機の開発など、近年大いに注目され、開発されている^{26)~29)}。空洞の射出成形金型のキャビティ部分に樹脂が流動する通常の射出成形現象とは異なり、金型内に事前に強化繊維がインサートされており、その空間を樹脂が充填するので、挙動としては大変複雑となる。技術的には、強化繊維への樹脂の含浸速度(含浸率)をどのようなモデルで数式化するか、あるいは実験検証するかである。特に強化繊維が積層材である場合は、まずは積層材の平面方向へと樹脂は含浸し、次に厚み方向に含浸していくものと考えられる。この流動の異方性をいかに正確に予測するかが、今後のカギとなるのではないだろうか。すでに汎用ソフトとして市販されているものもあるが、今後の技術開発が待たれるところと考える。

4.4 その他のCAEに関する研究動向

射出成形CAEに関するもの以外のものとして、発泡成形や発泡による気泡サイズ、気泡密度、発泡密度などがあげられる^{30)~32)}。また金型内の樹脂圧力、流速、温度の測定結果をもとに、樹脂流入プロセスにおける各種物理量の相関メカニズムの解明や固化層成長の発現メカニズムの報告も多い。さらには射出成形CAE解析と汎用構造解析との連成により、成形プロセスを考慮した材料物性(応力歪み曲線、異方性強度)を評価するCAE解析技術の研究も進展している^{33),34)}。

5. 金型技術の進歩

成形サイクルの短縮や、表面品質の向上のために、Heat & Cool が注目されてきた。特に自動車部品への適用を考えると、大型化に対応しなければならず、いかに均一に高速昇温ができるかが鍵となっている。ここでは代表的な二つの加熱方法について紹介する。

5.1 電磁誘導技術による急速加熱成形³⁵⁾

図17に示す電磁誘導加熱システムは金型の表面層を急速に加熱、正確なサイクルタイムで繰り返し加熱冷却を可能とするシステムである。金型内部に設置されたフレキシブルな誘導ケーブル(インダクタ)に交流電流を流すこと

図 17 電磁誘導金型加熱システム構成³⁵⁾

で誘導電流がケーブル周辺の金型に流れ、集中して渦電流が誘導されることで表面に熱抵抗が生じ、この時、成形面から均一な深さの場所に適正に誘導ケーブルを設置することで、金型表面部の薄い部分にのみ加熱させることができる。一般的に誘導ケーブルには銅線を用い、金型の加熱したい面全体を一筆書きで配置される。この時表面が曲面であっても誘導ケーブルを金型内に配置することができれば、面全体を均一な熱量で加熱することができ、水や油による一直線の加熱経路に比べ、その熱のばらつきは非常に小さい。また加熱速度は $20\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ と非常に速いが、エネルギー消費はヒータ加熱に比べ $1/5$ と少ないとされている。

5.2 通電抵抗加熱金型による急速加熱技術³⁶⁾

通電抵抗加熱システムは、金型に直接高周波電源を接続して通電することで発熱をさせる方法である。図 18 に示すこのシステムでは、前述のシステムに比べて誘導加熱用コイルや複雑な金型構造は必要でなく、シンプルな技術となっている。高周波電流には表皮効果と呼ばれる性質があり、電流が金属などの導体を流れる時に、表面の電流密度が高く、内部にはほとんど電流が流れない。金型は一般に大きな鋼材のブロックで電気抵抗が小さいため、 50 Hz や 60 Hz の商用電源を金型に通電してもほとんど発熱するこ

とはない。しかし 50 kHz 程度の高周波電流を用いることで、金型にメッキ等の特殊な処理をせずに効率的な加熱を実現することができている。また、金型内部に大きな空洞を作って大量の冷却水を流し込むことで、急速冷却も可能となる。したがって、冷却管が不要となり、大型部品であってもシンプルな金型構造が実現できる。

6. ま と め

地球環境保護のため、軽量化の重要性が認識されてすでに 20 年以上は経過しているが、いまだに多くの課題が山積していると感じる。特に射出成形技術にフォーカスしてみると、材料技術、成形技術（成形機を含む）、金型技術、CAE 技術（計測技術を含む）の連携と融合に不十分などところがあるのではないかと考える。新興国の追い上げも急な昨今、我が国が確固たる「ものづくり大国」であり続けるためには、何が必要なのかを過去を振り返りながら、考える時期に来ているのではないだろうか。活発な技術交流の場の提供や、産官学の連携など、いままで言われ続けてきたことではあるが、今一度本学会がその主導を取ることが肝要ではないだろうか。現在経済産業省近畿経済産業局等が中心となって、射出成形に関する IoT の技術ネットワークが進められている³⁷⁾。金型内の樹脂の情報や成形品の品質などのビッグデータを処理して、射出成形に関する技術の連携と融合が進めばと願っている。

最後に、ここ 10 年の射出成形技術を総覧するということを依頼され、多方面の開発事例に目を通したものの、その情報量は膨大で、それをピックアップして総論を述べることは不可能ということに、いまさらながら気づいた次第である。それほどこの業界の進歩は大きく、また深いものであった。このためこの膨大な情報の整理よりは、筆者自身が経験して感じたこの 10 年を独断と偏見でもって、書かせていただいた。そのために情報に偏りがあり、また誤解も多く含まれているかもしれないことをお詫びしたい。

図 18 TAM 成形システムのブロック図³⁶⁾

本稿を執筆するにあたり，井上玲氏，亀田隆夫氏，岡田有司氏，村田泰彦氏に貴重な情報をご提供いただきました．ここに深く感謝いたします．

参 考 文 献

- 1) 経済産業省 プラスチック製品統計年報より
- 2) 井上玲：型技術，33(2)，23(2018)
- 3) 下楠園壮，井上玲，田中達也，石川健：「FRTP プリブレグシートを用いたハイブリッド射出成形システムの開発」第7回自動車用途コンポジットシンポジウム講演論文集，11(2015)
- 4) 井上玲，田中達也，荒尾与史彦，野元将義，下楠園壮：成形加工，26(6)，276(2014)
- 5) 井上玲：化学と工業，89(4)，106(2015)
- 6) 根本昭彦，伊藤浩志：型技術，33(1)，23(2017)
- 7) Menotti, S., Hansen, H. N., Bissacco, G., Calaon, M., Tang, P. T. and Ravn, C.: *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 74, 90(2014)
- 8) Ito, H., Hariu, A., Takahagi, S., Takayama, T. and Kyotani, T.: *Proceeding of the Asian Workshop on Polymer Processing 2010 in Vietnam*, 14(2010)
- 9) Ito, H., Hariu, A., Takahagi, S., Takayama, T. and Kyotani, T.: *Proceedings of the Polymer Processing Society 28th Annual Meeting*, PPS-28, KN-04-01(2012)
- 10) Ito, H., Hariu, A., Takahagi, S., Takayama, T. and Kyotani, T.: *ANTEC 2011 Tech. Paper*, 209(2011)
- 11) 高木辰彰：成形加工，18(1)，6(2006)
- 12) 片山聖二，川人洋介，大倉淳，丹下章男，久保田修司：溶接学会全国大会講演概要第78集，11(2006)
- 13) 川人洋介，丹羽悠介，西本浩司，片山聖司：溶接学会論文集，30(2)，14(2012)
- 14) 近藤秀水：プラスチック，63(5)，10(2009)
- 15) 瀬戸雅宏，朝見芳弘，板倉雅彦，田中宏明，山部昌：成形加工，28(10)，42(2016)
- 16) 例えば，横井秀俊，稲垣幸秀，中西博之：成形加工 90，143(1990)
- 17) 瀬戸雅宏，山部昌：成形加工，29(6)，183(2017)
- 18) 例えば，Michii, T., Seto, M., Yamabe, M., Aoki, G. and Ohtuka, H.: *Int. Polymer Processing*, 23(5)，419(2008)
- 19) 瀬戸雅宏，内田和也，田中宏明，山部昌：成形加工，28(7)，303(2016)
- 20) 例えば，飯田あずさ，近藤光一郎，岡本和明：成形加工，25(5)，22(2013)
- 21) 中野亮，塩田忠弘，開本亮，滝克彦，高塩創，千容星：成形加工，20(4)，23(2008)
- 22) 多比良恵，横井秀俊，滝克彦：成形加工 12，12(2012)
- 23) 鈴木亨，杉田寿夫，瀬戸雅宏，柿島浩徳，田中宏明，山部昌：成形加工，28(6)，23(2016)
- 24) 岡田有司，中野亮，瀬戸雅宏，山部昌：成形加工，24(2)，98(2012)
- 25) 岡田有司，中野亮，瀬戸雅宏，山部昌：成形加工，24(9)，55(2012)
- 26) 一ノ瀬規世：成形加工 14，31(2014)
- 27) 岩田彬，片岡篤史，井上卓也，中越弘明：成形加工 14，313(2014)
- 28) 山口将吾，山川耕志郎，五十嵐隼：成形加工'15，61(2015)
- 29) 青野芳大，Marquette, P., Dereims, A., 小川孝行，小林正俊：成形加工 17，36(2017)
- 30) 菊池泰志，中野亮，岡田有司，佐藤善之，猪股宏，Richard Lee Smith, Jr., 滝篤繁樹，木原伸一，春木将司，大竹勝人：成形加工 09，91(2009)
- 31) Shiu, T. -Y., Chang, Y. -J., Huang, C. -T., Hsu, C. -H. and Chang, R. -Y.: 成形加工 12，91(2012)
- 32) Shiu, T. -Y., Huang, C. -T., Chang, R. -Y., Hwang, S. -S. and Wang, S.: 成形加工 13，249(2013)
- 33) 小沢拓，一ノ瀬規世：成形加工シンポジア 12，379(2012)
- 34) 菊池泰志，大谷正人，中野亮，石田翔馬，増田範通，横井秀俊：成形加工 16，161(2016)
- 35) 神谷毅：型技術，28(2)，26(2013)
- 36) 吉田透：型技術，29(6)，1(2014)
- 37) 例えば，経済産業省近畿経済産業局
http://www.kansai.meti.go.jp/3-5_sangyo/busozai/busozai-IoT.html