

特別寄稿 射出成形における可視化実験解析技術の発展*

Recent Development of Visualization Analysis Techniques in Injection Molding

横井 秀俊

Hidetoshi YOKOI

1. はじめに

加工技術の分野や加工対象の相違にかかわらず、すべてのモノづくりの基本には、「加工現象を正確に理解すること」が最も重要なテーマとして位置づけられる。正確な理解と定量的な把握が、単にモノづくり工学の体系的発展を推進するばかりでなく、予測技術としてのCAEのモデルを支え、良品を繰り返し生産する技術を支え、新しい加工技術開発を推し進める。ここでは、どのようにして正確な理解を行うかが課題となるが、その難易度は加工技術ごとに異なってくる。

筆者の専門分野である射出成形は、ペレット状の材料をホッパーに投入後、型開き時に成形品となって現れるまで、成形過程がすべて加熱シリンダと金型という分厚い鋼鉄の壁に封印され、現象の解明が最も困難な技術分野の一つであった。そのため、研究者にとっては未解明な成形現象の宝庫(?)ともなっていた。筆者は、この二つのブラックボックス内に明快な光を導き入れるために、過去20年近くにわたって可視化を軸にした実験解析研究に取り組んできた。

本稿では、可視化実験解析技術の発展の歴史を振り返り、併せて今後ますます重要な役割を担っている可視化技術の一端とその可能性をいくつか紹介する。ま

たこうした可視化技術が、新しい成形技術の出現に際してしばしば現象解明に深くかかわってきた経緯から、今後の射出成形の将来展望について、最後に私見を述べることにしたい。

2. 可視化技術の発展

金型内の可視化技術は、R.S.SpencerとG.D.Gilmoreによって1951年に開発されたPhoto Moldに始まる。¹⁾ Photo Moldでは、対向平行ガラス板の裏側に鏡を45°に配置し、一眼レフカメラのような構造で当時の最高記録速度、毎秒64コマにて充填過程を直接可視化することに成功している。こうした、いわゆるバックライト法による光透過方式に引き続き、キャビティの片側を、圧力センサを埋め込んだ金属ブロックに置き換えて、充填パターンの可視化と圧力計測とを同時に行う光反射方式が²⁾³⁾ またキャビティ側面にもガラス窓を設置した2方向同時可視化方式⁴⁾ が順次試みられてきた。さらには、レーザーライトシート法による光切断方式も著者らによって実施された⁵⁾。こうした技術開発の発展の歴史は別の解説に譲ることとして⁶⁾、ここでは筆者らが1986年に開発したプリズムガラスインサート金型 (Fig. 1参照)⁷⁾⁸⁾ を例に、筆者らが垣間見てきた可視

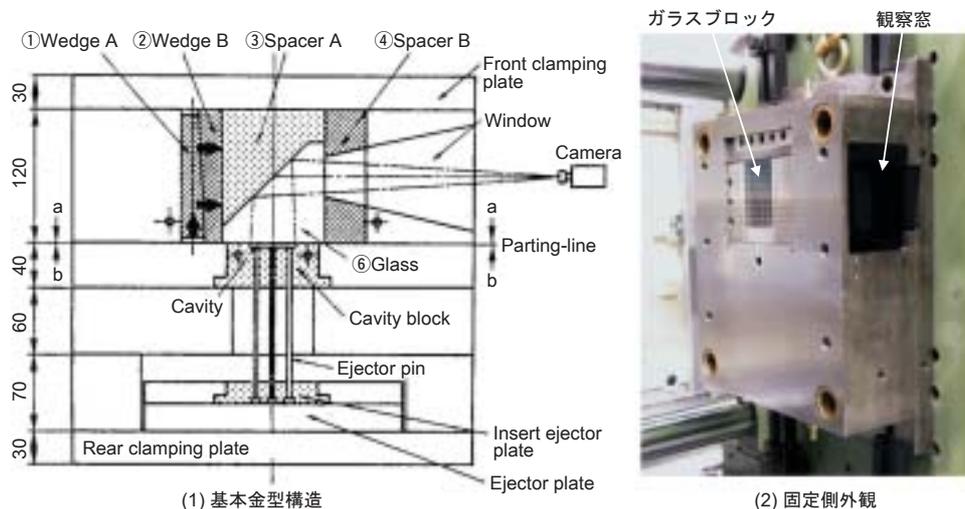


Fig. 1 ガラスインサート金型の基本構造と外観

* 2006年9月11日 原稿受理

化技術の発展過程と現在の技術水準を、以下に比較してみることにしよう。

射出成形現象の可視化をテーマに、延べ27社が参加した大型の産学連携プロジェクト（通称Vプロジェクト）が1989年にスタートした。その当時の技術を現在と比較すると、超高速ビデオの記録速度はフルフレームで毎秒200コマから100万コマまで5000倍に、また金型外からの撮影倍率は当初の数倍から長距離顕微鏡と拡大光学系との組合せで300倍まで30倍以上にと、時間・空間解像度ともに格段の向上を示している。これにより、10ms以下の超高速充填挙動も、現在では鮮明な可視化が可能となっている。

金型の耐圧強度は、残念ながら当時の50MPaから現在もおお80MPaが上限とされている。これにより当時はキャビティ厚さ1mm以上での可視化が標準とされていたが、現在では超高速充填過程の可視化でも0.5mm以上での適用に限定がなされている。しかしながら、光ファイバーセンサによる間接可視化法の開発（後述）により、金型内圧が100MPa以上でも計測が可能となり、0.05mmの超薄肉キャビティでも充填パターンの可視化計測が実施されている。すなわち、1mm以上での直接可視化を実施した当時と比べて、20分の1以下のキャビティ厚さへの適用が進められている。また可視化キャビティ範囲も、当初の25×65mmから、プリズム装填位置の可変構造により50

mm×180mmへと5.5倍に拡大されている。

以上のように、より高速に、より微細に、より薄肉に、より大面積にというニーズの中で、可視化金型の適用限界はこの17年間で大幅に拡張され、なお進化し続けている。開発当初から携わっている者としては、現在の技術水準はまさに隔世の感がある。加えて、金型内の移動目標物（フローフロントなど）を200mm/sの範囲で自動拡大追跡撮影するシステム⁹⁾、ゲート通過樹脂の一部に着磁・着色によりマーキングする方法¹⁰⁾¹¹⁾、板面部キャビティに加えてリブ、ボス内部をも横方向から同時可視化する3次元可視化方法¹²⁾もすでに技術的に確立された。以上のように、現在の可視化技術は、多様な成形技術の複雑な成形現象の解明に、何らかの形で適用できる技術水準まで、すでに到達していると確信している。Fig. 2, Fig. 3に金型内可視化画像を例示する。

3. 今後ますます重要となる可視化技術の事例

3.1 光ファイバーセンサ方式による流動パターンの可視化計測技術¹³⁾⁻¹⁵⁾

上述したように、ガラスインサート金型ではガラスブロックの耐圧強度に限界があり、0.5mm厚以下のキャビティ充填過程でも観察が困難な材料が多くなっている。超高速条件下で充填される製品厚さは0.3mm以下がほとんどで、もはや直接可視化法ではCAEの検証



Fig. 2 金型キャビティ内の可視化画像例（その1）

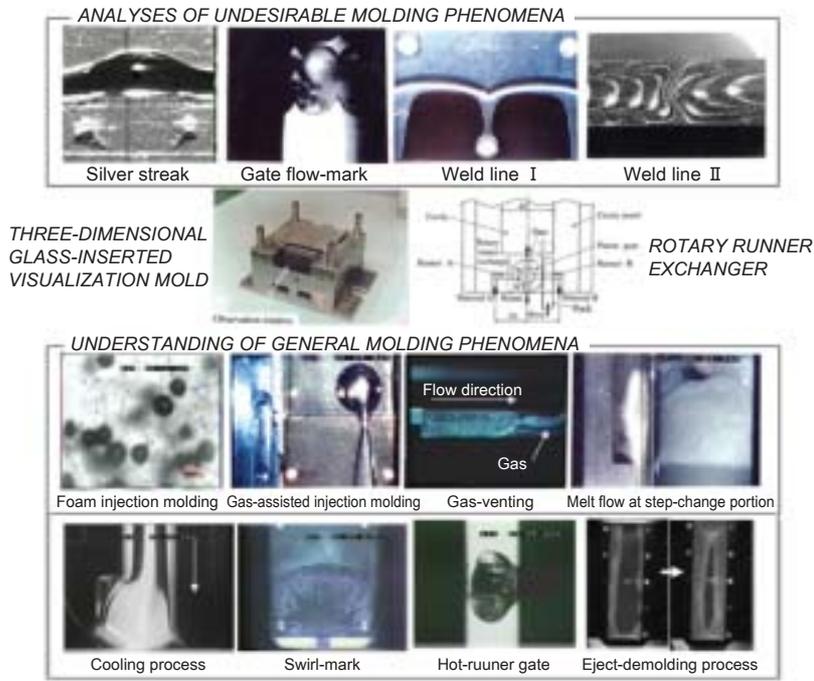


Fig. 3 金型キャビティ内の可視化画像例（その2）

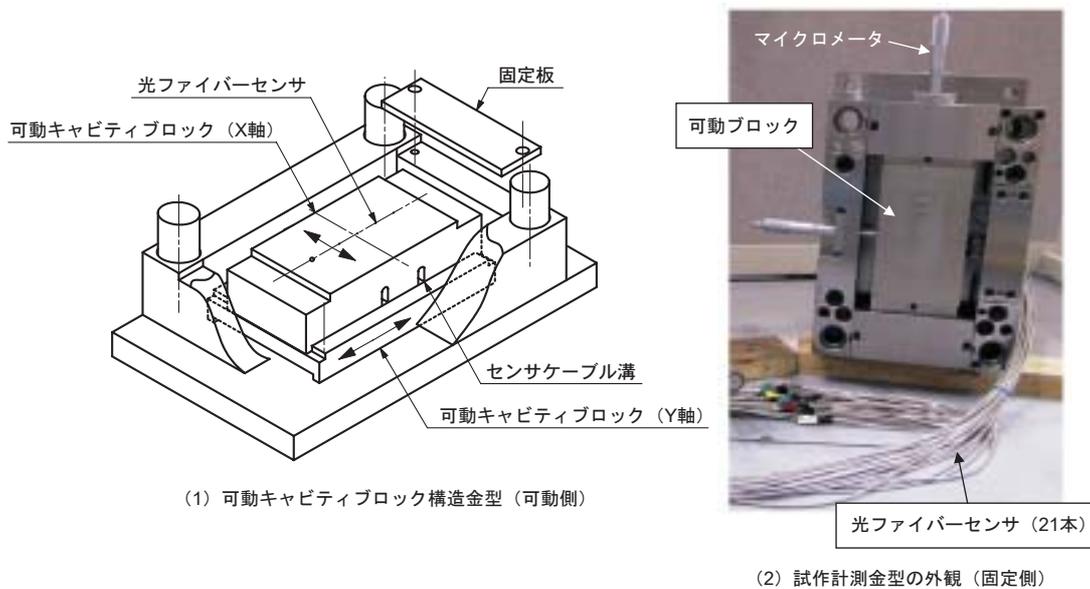


Fig. 4 x-y可動キャビティブロックと光ファイバーとによる充填パターン計測金型の基本構造

が困難な状況といえる。そこで、これに代わる計測手法として、可動キャビティブロックを型内に組み込み、同ブロックに高応答の光ファイバーセンサを多数組み込むことで、フローフロント通過タイミングを計測する手法を提案した (Fig. 4)。

試作計測金型の可動ブロックには、直径φ0.5mmの光ファイバーセンサを3行×7列、合計21点マトリック

ス状に配列し、同ブロックをショットごとに移動して、最大98点の各位置で計測した通過情報を重ね合わせることで、充填パターンを抽出する。大きなセンサ出力変化が得られるように、黒い着色樹脂の使用を推奨する。また、光ファイバーセンサの代わりに圧力センサを挿入した可動キャビティブロックを使用することで、圧力分布計測も可能となり、同一金型で充填パタ

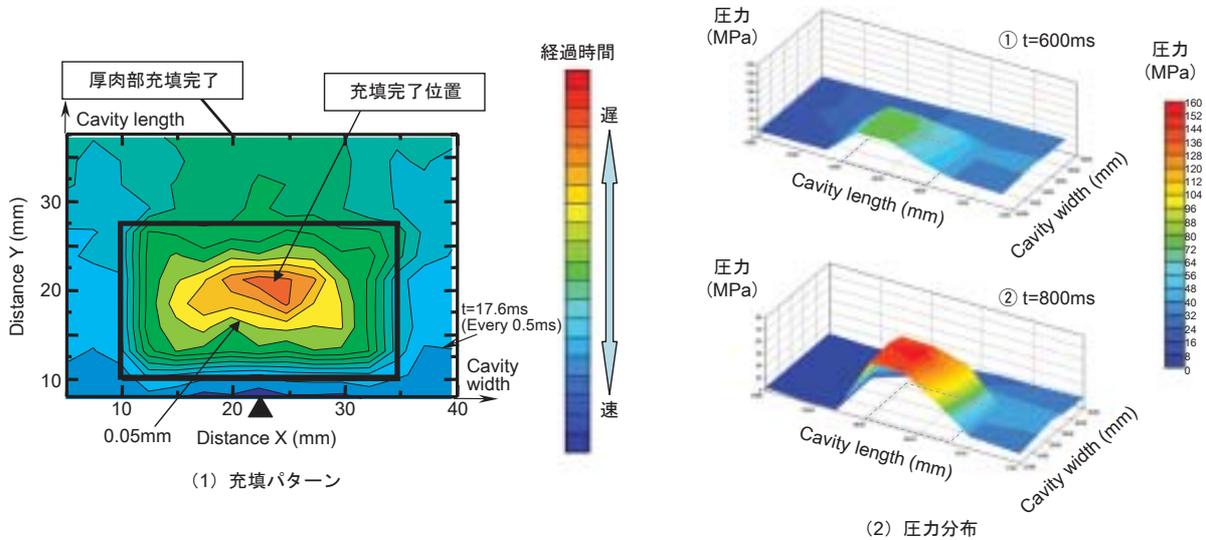


Fig. 5 0.05mm/0.5mm部分薄肉キャビティでの充填パターンおよび0.2mm/0.5mmの偏肉キャビティでの圧力分布の計測例

ンおよび圧力分布の二つの計測ができることも本手法の特徴である。

Fig. 5は、肉厚0.5mmの矩形キャビティの中央部（ゲートから10mm離れた位置）に肉厚0.05mmの超薄肉部がある部分薄肉キャビティにて計測した充填パターンおよび偏肉キャビティでの保圧・冷却過程の圧力分布である。以上の型内充填パターンと圧力分布変化の計測データは、アニメーションの手法によって再構成され、あたかもCAE解析結果の可視化のように表示することが可能である。本手法は、重ね併せの手間は多いものの適用範囲が非常に広く、ガラスインサート法によるガラス面の影響もないため、汎用の実験解析手法として今後ますます重要性が増大すると予想される。

3.2 ランナー切替え装置¹⁾

ゲート通過樹脂にマーキングすることを目的に、2色成形機と組み合わせて、ゲート直前で二つのランナーを瞬時に何回も切替えられるランナー切替え装置を開発した。Fig. 6に同装置の概略を示す。この切替え装置はラックとピニオンギアとにより構成され、Fig. 7のようにランナー部を双方向に繰り返し90度回転させることにより、樹脂AとBとを交互に切替えることができる。もし樹脂AとBとが同一条件下で流動すると、回転ランナー部にはすべての力が軸対称的に働き、コマに作用する側方力が打ち消し合う。そのため、流動途中においても容易にコマを回転させることが可能となる。

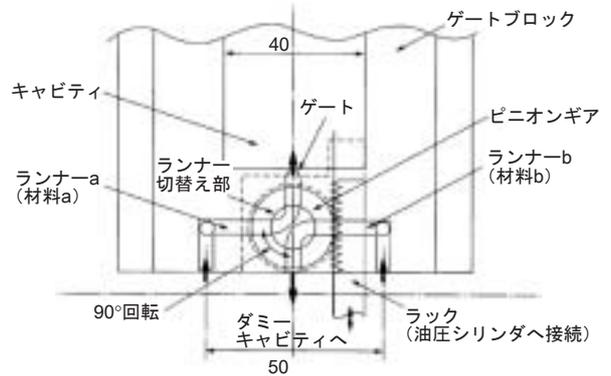


Fig. 6 ランナー切替え装置の基本構造

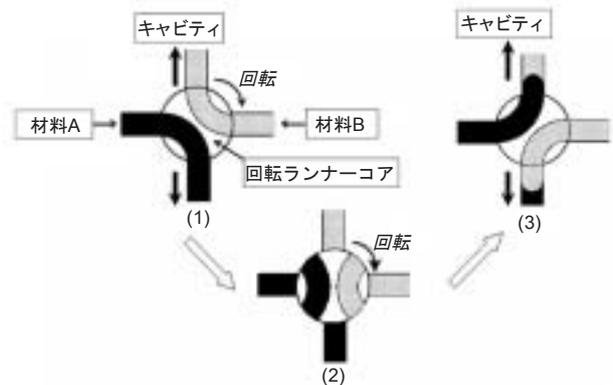


Fig. 7 ランナー切替え操作による樹脂切替え過程のモデル図

同切替え装置は、分割面方向、キャビティ厚さ方向のそれぞれの可視化金型と組み合わせて用いられ、充

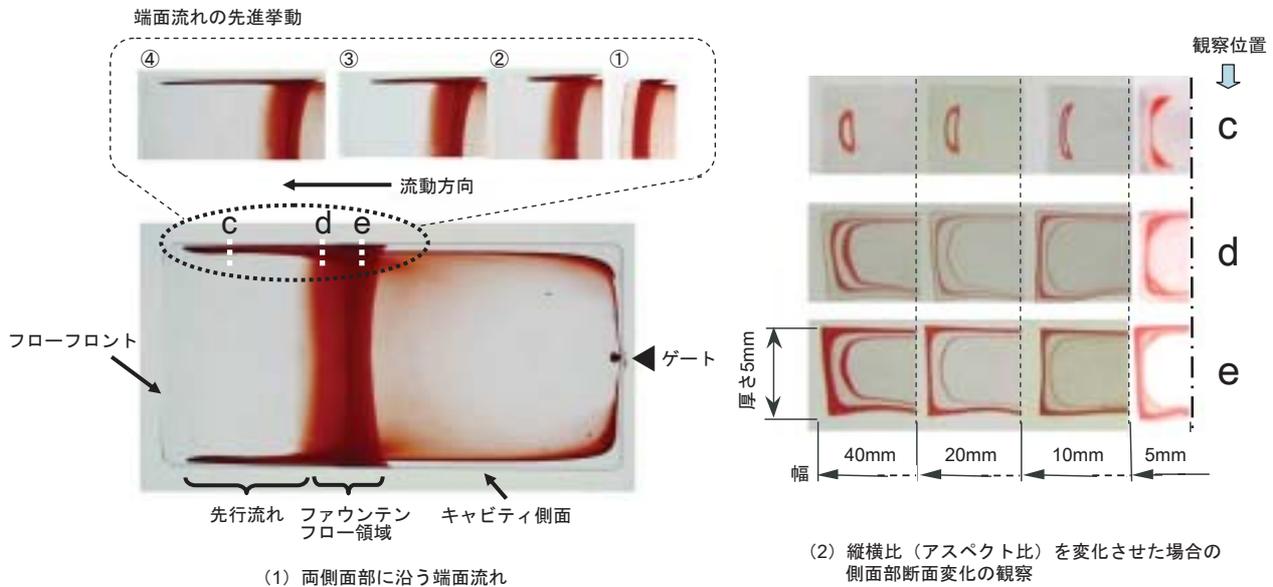


Fig. 8 キャビティ側面部に沿う端面流れの観察 (PS)

充填過程の内層部（コア層）の流れが動的に可視化されている。同手法は、単に動的な可視化解析にとどまらず、動的観察をした成形サンプルを取り出し任意切断面を観察することで、内部流れの層状着色パターンを観察できる。両者を対比して解析することで高度な実験解析が可能となることから、“究極の可視化実験解析技術”として期待されるものである。Fig. 8は、キャビティ側面部に形成される端面流れを観察したもので、初期にキャビティ内に流入した着色樹脂が両側面部に沿って角状に流動する興味深い3次元流動現象を観察することができる。

3.3 拡大・自動追跡撮影装置⁹⁾

拡大倍率を上げると可視化視野範囲は狭められ、現象の全体像を把握することが困難となる。すなわち、可視化倍率の上昇は、必然的に観察対象を追跡する技術開発の必要性を高めることとなる。追跡撮影にはいろいろな方式があるが、カメラを単軸移動ロボットに載せて追跡撮影する方式が、高速追従には不向きながらも、現在最も一般的な方法となっている。カメラ移動モードも当初のティーチングプレイバック方式から、ラインセンサのインプロセス計測等を用いて対象物（例えばフローフロント先端部）の位置を計測し、カメラ位置補正のためにフィードバック制御を行うことにより、画像の視野内に対象物を常時捉える自動追跡システム（Fig. 9）を構築することができる。これにより、現状では金型内移動速度として最大200mm/sまで拡大して自動追跡撮影が実現されている。

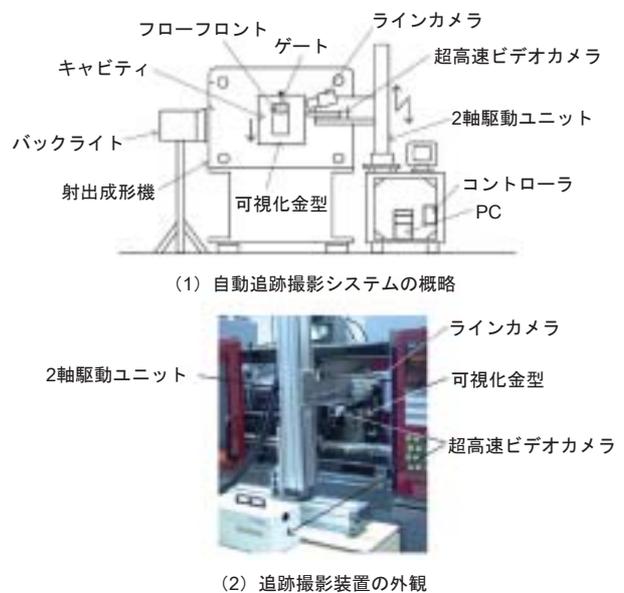


Fig. 9 移動テーブル方式による拡大自動追跡撮影装置の概略

同様に、流動過程におけるフローフロント表面の変化の様子を、端面を開放させたオープンエンド・キャビティを用いて、流動過程を通して観察することが可能となっている。この場合には、側面方向からラインセンサによりフロント位置計測を行い、フロントとカメラとの距離を焦点距離に常に保持するようにカメラを手前に移動させながら観察することを行っている（Fig. 10参照）。

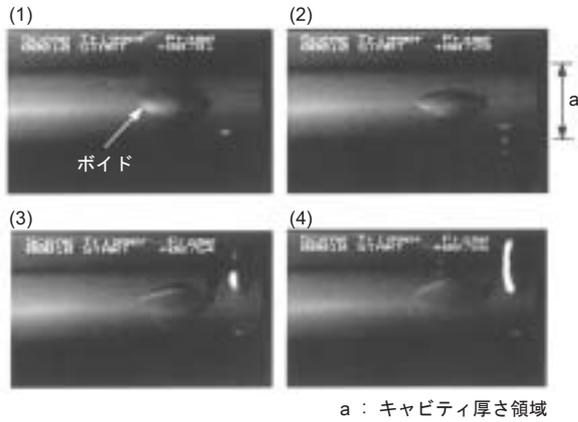


Fig. 10 フローフロント部でのシルバーストリーク生成過程の観察

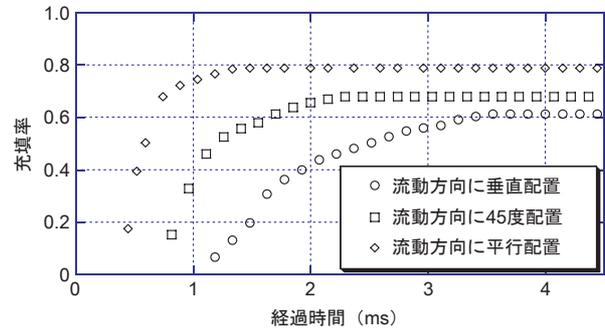


Fig. 12 微細プリズム溝への充填挙動の計測 (ピッチ100 μ mプリズムパターン, キャビティ厚さ: 1.0mm, 射出率: 50cm³/s)

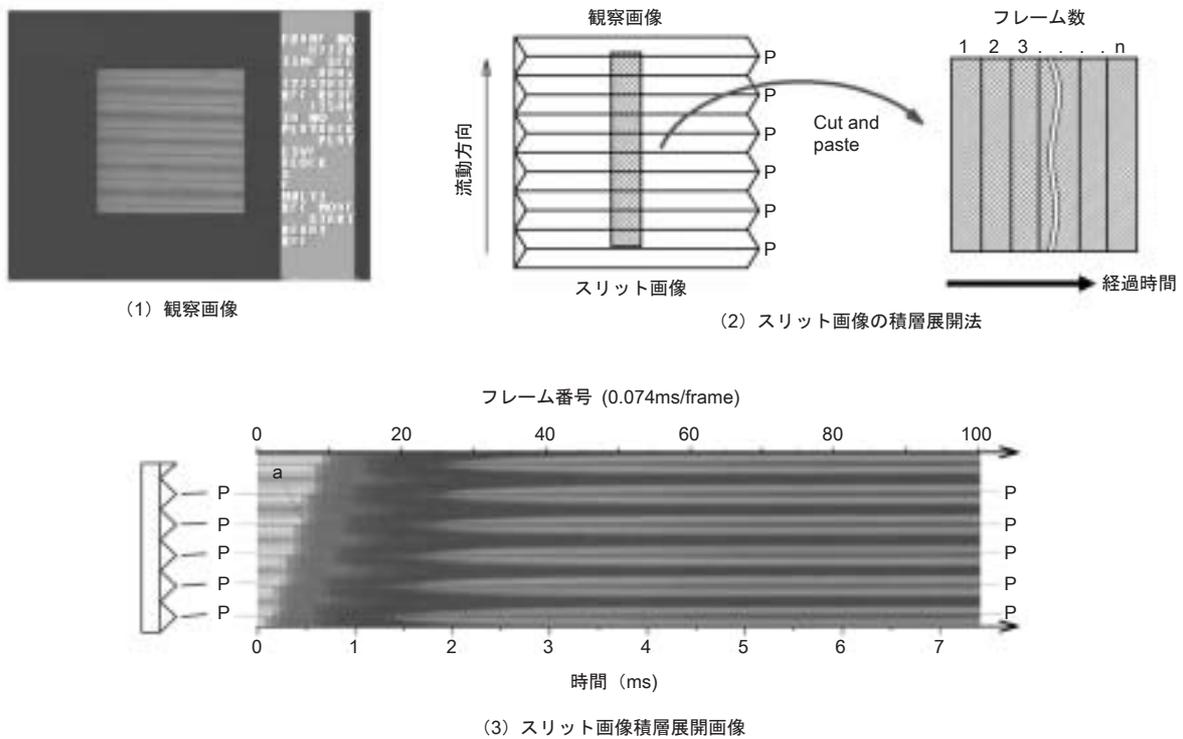


Fig. 11 微細プリズム溝への充填挙動の可視化とスリット画像積層展開による画像処理画像の例 (ピッチ100 μ mプリズムパターン, キャビティ厚さ1mm)

3.4 微細パターンへの充填過程の可視化解析¹⁶⁾

転写過程の解明には、樹脂がどのように微細パターンの細部へと充填するかを観察することが最も有効である。そのため、可視化技術の確立が期待されながら、極めて高倍率かつ高解像度、数10msの短時間内の可視化が要求され、これまで実現が困難であった。そこで、ガラスインサート金型と長距離顕微鏡、超高速ビデオカメラにより、50~100 μ mピッチのプリズムパターンでの溝内部への充填過程を、鮮明に記録する

ことに初めて成功した。

Fig. 11は、各時間の観察画像から切出したスリット状画像を、横軸の時間軸方向に順次積層合成した画像(後述3.6節参照)で、溝内部への充填過程の時間変化を表している。同図のPはスタンプの頂部で、帯状の明視領域はスタンプ面と樹脂との接触領域に対応する。時間経過とともに全体が明視領域へと遷移し、溝内部への樹脂の充填が進行する様子が観察された。またFig. 12は、こうして求めた各溝レイアウト

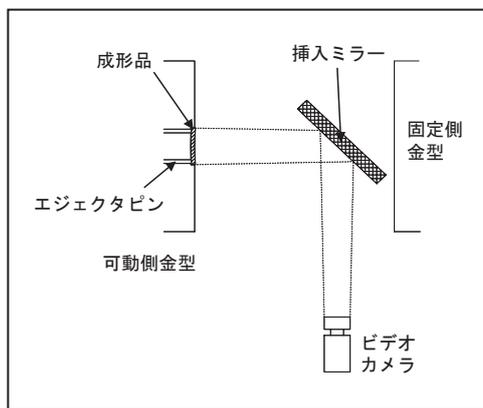
についての溝内部への充填率時間変化である。同図は、フローフロント通過後僅か1~3msで、溝への充填がほぼ完了し、さらに縦溝ほど瞬時に溝深くまで充填することを明瞭に物語っている。

現在、微細パターンへの充填挙動をCAEによりシミュレーションする要望が高まりを示している。それに伴って、単にプリズムパターンにとどまらずライン&スペースや円柱、その他の微細3次元パターンへの充填挙動を直接可視化するニーズも高まっており、さらなる高倍率での3次元可視化技術の確立が強く望まれている。

3.5 離型過程の可視化解析技術¹⁷⁾¹⁸⁾

微細パターンの高転写率成形ほど離型がより困難になる。超転写技術の追求とともに、無理のない離型方案を追求することは、両輪の重要な研究課題である。しかしながら、微細パターンの離型現象については定量的な評価方法が確立されていなかった。

成形品と転写面との離型過程には、射出後の樹脂収縮等による離型（型内離型）、型開き時に瞬間に強制分離される際の離型（型開き離型）、成形品をキャビティから突き出す際の離型（突き出し離型）の三つがあり、それぞれが重なり合いつつ離型が進行すると考えられる。まず型内離型解析では、ガラスインサート金型による直接可視化が有効である。保圧冷却過程のプリズムパターン転写面に一定方向から光を投射すると、反射光の光量変化により型内離型パターンの時間変化が抽出できる。¹⁷⁾ この方法により縦溝と横溝レイアウトでは離型パターンに顕著な違いが生成することが確認された。

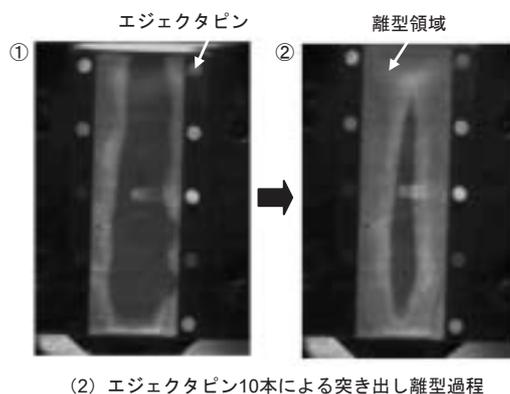


(1) 突き出し離型の可視化方法

一方、突き出し離型解析では、型開き後に成形機上部から分割面と45度傾斜したミラーを挿入し成形品を観察することで、型内離型と同様にして、Fig. 13のように突き出し時の反射光量の変化により離型領域を抽出することができる。¹⁸⁾ Fig. 14は、突き出し位置をゲート側と末端側に変化させて、いずれもエジェクタピン2本で突き出しを行い、成形品の転写率分布と離型パターンとを相互比較したものである。この図は、離型パターンの相違が最終的な転写率分布に影響を及ぼすことを初めて示唆した非常に重要な計測事例である。離型メカニズムの解明と、離型方案の検討をする上で、離型過程の可視化技術の果たす役割は、今後ますます大きくなるものと予想される。

3.6 スリット画像積層展開による画像処理法¹⁹⁾

本稿では、これまで金型内の動的可視化技術を中心に解説してきたが、もう一つの重要なブラックボックスとして加熱シリンダがある。その可視化技術の詳細は別の解説²⁰⁾に譲るが、参考として可視化領域と観察事例を一覧してFig. 15に表示する。本節で述べるスリット画像積層展開法は、もともとは可視化シリンダ窓部が狭く細長いことに対応し、そうした欠点を補いつつ時系列的な変化を一覧する画像処理技術として開発されたものである。具体的にはFig. 16のように観察窓画像内の中心部分をスリット状に順次切出し、時系列的に画面の下から上に（あるいは上から下に）積み上げ合成するもので、積み上げ方向は時間軸を意味する。これにより、観察窓内の経時的な変化を展開図状に一目して表示することができる。可視化窓からの観察画像の記録とともに、同一円周状の2箇所に設置



(2) エジェクタピン10本による突き出し離型過程

Fig. 13 微細プリズムパターン転写成形における突き出し離型過程の可視化画像例

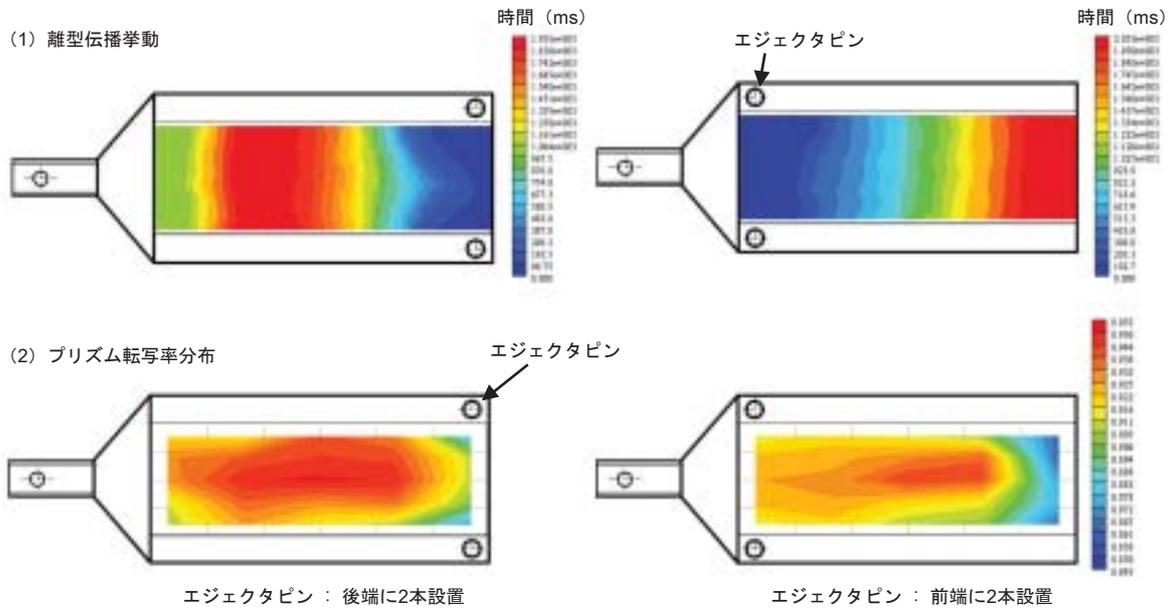


Fig. 14 突出し離型領域の伝播挙動と転写率分布と比較（エジェクタピン2本による突き出し離型）

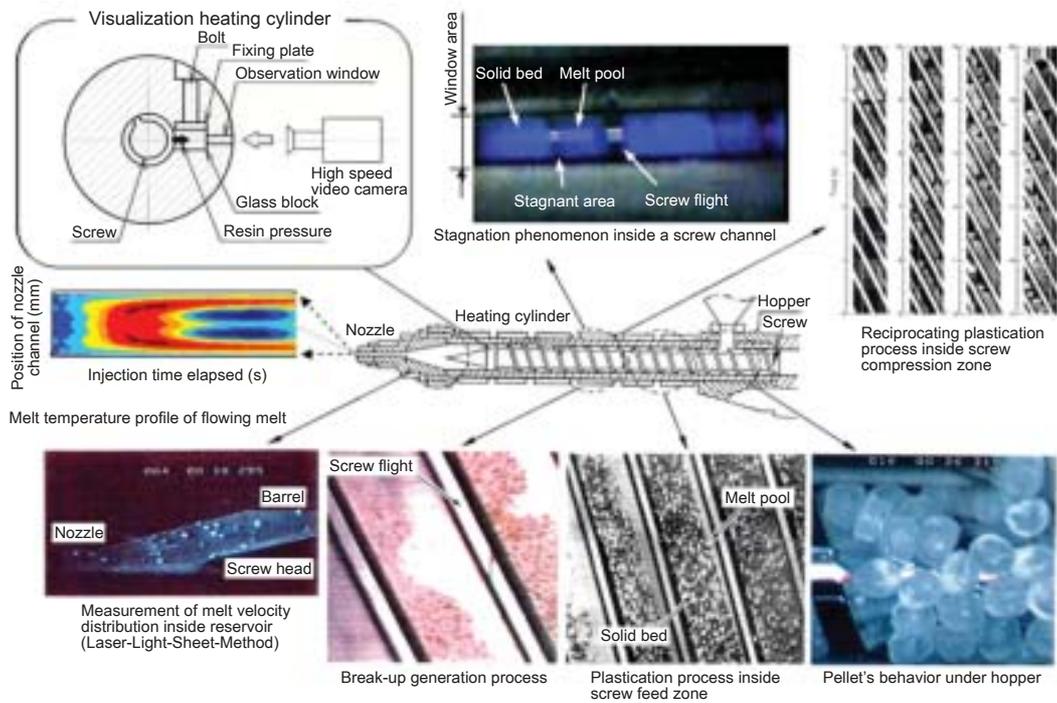


Fig. 15 加熱シリンダ各部の可視化画像例

したセンサにより温度、圧力を同時計測し、位相ずれを補正して積層展開画像と重ね合わせることで、解析対象領域の温度・圧力を総合した複眼による解析が可能となる (Fig. 17)。

スリット画像積層展開法は、単に可塑化過程の経時変化の表示法にとどまらず、前掲のFig. 11でもす

に例示したように、一般に記録画像中の注目する一部の状態変化を、時間軸により展開表示する汎用の画像解析手法としてもその有効性が確認されており、可視化解析には欠かせない画像処理法に位置づけられている。また画像情報でなく、例えば温度分布経時変化のような場合にも有効である。一例として、ノズル内に

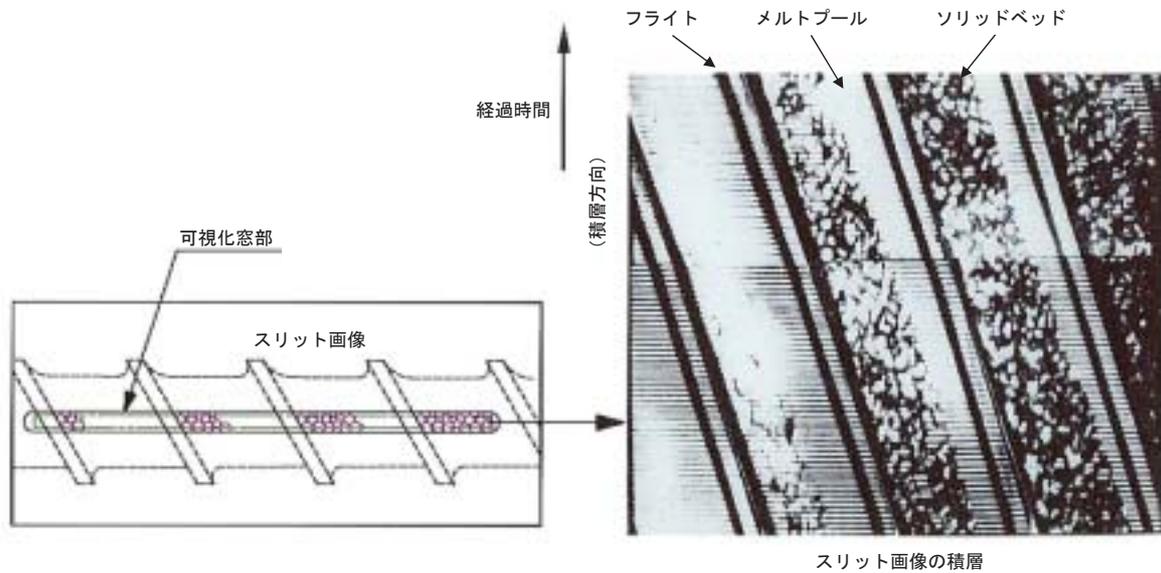


Fig. 16 スリット画像積層展開による可塑化過程の画像解析例

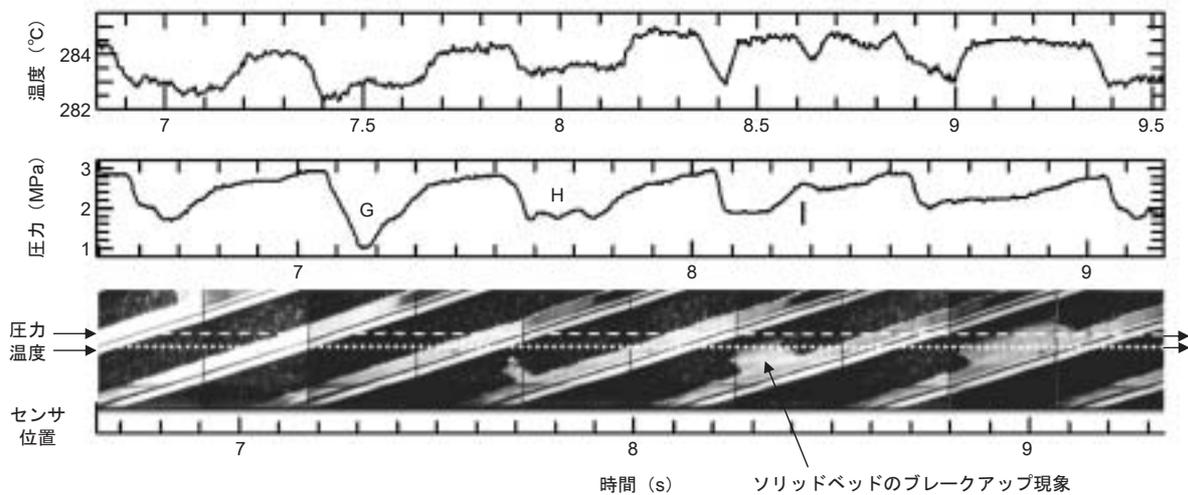


Fig. 17 スリット画像積層展開画像と温度、圧力計測結果との相関解析 (PA66, 急圧縮スクリュウ, 供給部)

装填したジルコニアセラミックス薄板製の集積熱電対センサにより、0.6mm間隔で多点計測された射出樹脂温度分布は、類似の画像処理技術により、横軸を射出後の経過時間、縦軸をノズル中央からの距離として、Fig. 15の左側中央図のように温度の濃淡により表示される。²¹⁾ 流路断面に現れる同心円状の温度分布と、射出前半での温度上昇、後半部での低下現象などが明瞭に示されている。

4. これからの射出成形技術の動向について

これからの射出成形はどのようになるか？それは多様な価値観に溢れ不安定要因の多い世の中であって、

余りにも予測困難なテーマである。ここでは、個別技術の紹介やそれぞれの評価には触れないものの、筆者が常日頃から、可視化を中心とした研究を通して、これからの射出成形技術について考えてきたことを最後に紹介し、本稿を終えることとしたい。

エコ成形加工：原油価格は史上空前の高騰に見舞われ、今後下がる要素は余り見つからない。プラスチック材料についても今後の大幅な値上げは不可避であろう。すでに、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、石油系に代わる環境低負荷素材としての期待がますます高まり、多様な分野への適用と検討が進められているが、なおコスト高とともに

に耐熱性、衝撃性の低さ、柔軟性の不足などが指摘される。いかにして成形加工により機械的特性を引き出すか。材料改質技術と符合した成形加工技術の開発が、これら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。そのため、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”への指針と技術確立とが、強く求められる時代となっている。

ハイパー成形加工：わが国に残るモノづくり技術とは何か。それは、製造分野を問わず、高機能・高付加価値の加工技術であることは疑う余地がない。21世紀に入り、国の存亡を左右する重要な科学技術分野として、ライフサイエンス、情報通信、環境、ナノテクノロジー・材料が重点4分野とされ、最先端の射出成形技術開発もこれらを軸にした高機能・高付加価値の射出成形技術“ハイパー成形加工”として展開する。ハイパー成形加工は、わが国の成形加工の本流をなすもので、バイオ・IT・ナノテクがさらに融合一体化する中で、市場ニーズを個別に受けながら、超精密な微細転写成形技術、超精密成形・金型技術、成形材料等の粋を集めた極限の成形加工が今後も個々に実現されていく。ただし、最先端分野ほど対応する市場が未成熟で、ナノテクフィーバーとは裏腹に、多様な成形技術が拮抗する混沌とした技術の踊り場が随分と長く形成されており、次の飛躍的な発展を見据えた基礎技術レベルの地道な底上げ努力が、今後なお必要であろう。

デジタル成形加工：製品設計から金型設計・製作、CAEを駆使したバーチャル成形加工まで、デジタルエンジニアリングは究極の合理化技術である。資源生産性向上の一方策と広くとらえると、資源浪費を抑制して地球環境への負荷を低減させようとする環境に配慮した生産システムの構築を目指すものである。その意味では、広義のエコ成形加工の一形態で、日本に残すべき短納期・低コスト・高精度の成形加工技術を支えるシステム技術として、今後ますます発展が期待される。ただし、デジタル成形加工は、確立された成形工程をデジタル化するのみで、新しい成形加工技術は生み出さない。またノウハウも含めたデジタル化は、世界中にいと簡単にノウハウの粋の技術移転を可能とする、両刃の剣でもある。

イノベティブ成形加工：何と云っても、成形加工技術の王道は、新規加工技術の開発で、筆者の最も好む分野でもある。いつどの分野でどんな手法の開発が行われるかは、予測不能だが、それまでの加工法が一

瞬にして消失する衝撃的な変化が常に起り得るエキサイティングなアプローチである。古い技術が常に新しい技術に取って代わられることは、成形加工技術に限らず、技術改革の宿命である。そうしたイノベティブな人材を温めて、人間の叡智の集めた珠玉の結晶“イノベティブ成形加工”を持続的に生み出し、これらが未来の射出成形技術をリードし続けることを期待したい。

＜参考文献＞

- 1) Spencer, R.S., and Gilmore, G.D., J. Colloid, Sci., 6 (1951), p.118.
- 2) Kamal, M.R., and Kenig, S., Polym. Eng. Sci., 12 (1972), p.302.
- 3) 高橋秀郎, 松岡孝明, 高分子学会レオロジー研究会講演要旨集 (1978), p.14.
- 4) Menges, G. and Leibfried, D., Plastverarbeiten, 21 (1970), p.951.
- 5) 横井秀俊, 稲垣幸秀, 中西博之, “レーザによる金型内樹脂挙動の可視化”, 成形加工'90 (1990), p.143.
- 6) たとえば“7.3 可視化計測”, 射出成形事典 (産業調査会, 2002), p.494.
- 7) 横井秀俊, 林 高樹, 平岡弘之, “射出成形における型内樹脂挙動の直接観察”, 生産研究, 39 (1987), p.306.
- 8) 横井秀俊, 村田泰彦, 坂本一郎, “ガラスインサート金型におけるガラスキャビティ面の充填特性評価”, 成形加工, 6 (1994), p.349.
- 9) Yokoi, H., Masuda, N., and Michihata, H., “Visualization analysis of flow front behavior during filling process of injection mold cavity by two-axis tracking system”, J. of Materials Processing Technology (2002), 130-131 (2002), p.328.
- 10) 横井秀俊, 鎌田重人, “ゲート着磁法による型内3次元流動分布計測”, 生産研究, 40 (1988), p.532.
- 11) 金藤芳典, 横井秀俊, “ランナー切替え装置による樹脂流動挙動解析 I - キャビティ側壁部の端面流れ -”, 成形加工シンポジウム'04 (2004), p.41.
- 12) 横井秀俊, 櫛田茂美, 松坂 茂, 松田 元, “大型3次元可視化金型による金型内樹脂流動挙動の実験解析”, 生産研究, 49 (1997), p.434.
- 13) 横井秀俊, 渡辺 順, 増田範通, “光ファイバーセンサによる超高速射出成形の型内充填パターン計測 I”, 成形加工シンポジウム'01 (2001), p.29.

- 14) 増田範通, 横井秀俊, “光ファイバー方式による超薄肉・部分薄肉キャビティの充填パターン計測”, 成形加工 '05 (2005), p.345.
- 15) 増田範通, 須藤克典, 横井秀俊, “超高速射出成形における薄肉部偏肉キャビティの圧力分布挙動計測”, 成形加工シンポジア '04 (2004), p.241.
- 16) 横井秀俊, 韓 雪, “微細転写パターンへの樹脂充填過程の可視化解析”, 成形加工シンポジア '04 (2004), p.339.
- 17) 横井秀俊, 奈良岡悟, 韓 雪, “微細転写成形における離型プロセスの可視化解析 I”, 成形加工 '04 (2004), p.243.
- 18) 奈良岡悟, 横井秀俊, “微細転写成形における離型プロセスの可視化解析Ⅲ—突き出し時の離型伝播挙動と転写率との相関—”, 成形加工 '05 (2005), p.377.
- 19) 横井秀俊, 龍野道宏, “可視化加熱シリンダによる計量可塑性過程の画像解析—第1報 可視化定量解析手法—”, 成形加工, 11, [11] (1999), p.922.
- 20) 横井秀俊, “射出成形機における可視化実験解析—連載②”, 電気加工学会誌, 34 (2000), p.6.
- 21) 横井秀俊, 金 佑圭, “集積熱電対セラミックセンサによる射出成形機ノズル内の流動樹脂温度分布計測 I—樹脂種類および粘度の影響—”, 成形加工, 11 (1999), p.477.



<著 者>



横井 秀俊
(よこい ひでとし)
東京大学国際・産学共同研究
センター長 教授

1978年 3月 東京大学工学部精密機械工学科卒業
1983年 3月 東京大学大学院工学系研究科第一種博士
課程修了, 工学博士
1983年 4月 東京大学生産技術研究所第二部講師
1985年 1月 同助教授
1997年 7月 同教授
1998年 7月 東京大学国際・産学共同研究センター
教授
2005年 4月 同センター長 現在に至る

専門分野：プラスチック成形加工学（射出成形，押出成形，可視化，インプロセス計測）