マイクロ成形加工の現状と研究動向

伊藤 浩 志*

1. はじめに

日本の科学技術分野は、ライフサイエンス、情報通信、環境、ナノテク・材料、エネルギー、製造、社会基盤などに大別され、研究のトレンドとして、ナノテク、バイオサイエンス、情報技術などが特に注目されている。プラスチック成形加工品は、これらの最先端技術を支える基幹部品であり、マイクロスケールの成形品やナノファイバーに代表されるマイクロ・ナノスケールの構造体を「つくりこむ」ニーズが高く、様々な研究開発が進められている。本学会誌においても、マイクロ・ナノスケールに関する解説特集が企画されており、本分野が注目されている^{1)~3)}。特に、マイクロスケールの射出成形に関しては、上述の特集号に、山極の成形機について⁴⁾、安原らの転写性に関する解説⁵⁾、大森らの金型作製と成形に関する解説⁶⁾が掲載されている。一方、世界に目を移すと、本分野の研究は1998年以降、急激に進んでおり、特にマイクロ射出成形は注目されるようになった^{7)~11)}。現在でも、数多くの研究者が広範囲に研究を行っている。

この背景にはご存知のように、M/NEMS (Micro/Nano Electro Mechanical Systems) に代表されるマイクロ/ナノシステムテクノロジーが存在し、システムの基盤材料としてもプラスチック材料は注目されている。M/NEMS技術が電子産業、情報産業、医療技術部材 (DDS, TAS, バイオチップなど) に適用され、需要は2009年までに年率20%程度で成長し、市場規模は250億ドル (30兆円規模) に達すると予想されている¹²⁾。これを実現するには、製品設計、材料選択、次に成形・製造技術、その方式の改善、そしてユニットコストの低下が重要となる。M/NEMS技術は未曾有の可能性を秘めている。

具体的な研究テーマとして、マイクロスケールの射出加工を可能とする最適材料特性、マイクロ射出成形機の改良、金型デザイン、LIGAによる金型加工と応用、新加工法や成形品の表面転写性、プロセスモニタリングなどが挙げられ、これらの研究が盛んである。しかし、本研究に視点を置いている研究者では、マイクロ/ナノスケールの構造・物性の解析はあまり行われておらず、成形品の外観をSEM

やAFMなどで評価しているのが現状である。

そこで筆者らは、マイクロ/サブマイクロ成形品の成形加工特性-高次構造-物性の相関を明らかにする目的で、マイクロ/サブマイクロスケールの成形加工に関する研究を行ってきた^{13)~20)}。また、新たなマイクロ射出成形機の開発も行った。本稿ではこれらマイクロ射出成形の研究動向、マイクロ射出成形での構造形成や物性発現について、最近の研究報告を中心に紹介する。

2. マイクロ成形品の定義と歴史

一般にマイクロ成形は、射出成形品の種類によって、大きく3つに大別される²¹⁾。1つは成形品表面にマイクロ構造を有する成形品で、マイクロレンズアレイや光干渉素子などもこれに含まれる。2つ目はマイクロ精度での成形品であり、超薄肉成形品、光学機器のバックライトや導光板などもこの領域に当たる。3つ目は、真に微小・微細な成形品であり、ミリグラムもしくはマイクログラムでの成形品などで、ギア、機械部品、レンズやそのハウジングなども該当する。

特に、マイクロスケールの表面構造体を有する成形品としては、光ディスクも一つのマイクロ成形品と定義される。光ディスクの歴史は古く、1972年のPhilips-MCA社による光ビデオディスクがはじめとされている。その後、20年以上の歴史を経たコンパクトディスク (CD)、15年以上の歴史を有するMOやDVDなどと続き、非常に歴史がある加工技術である。従って、この表面転写性や成形加工性に関する議論が多く行われてきた^{22)~28)}。特に、吉井らの報告は、光ディスク成形における成形不良に関するもので、転写不足や離型欠陥など非常に知見に富むものである²³⁾。また、材料特性と転写性の関係について、特に熔融樹脂の粘度、成形中で生じた冷却樹脂の弾性率変化、スキン・せん断層の変形による転写機構などの議論もなされている^{5), 26)~28)}。しかし、ご存知のようにプラスチックの成形加工は、成形条件によって、樹脂の粘度特性も変化し、冷却挙動も異なり、さらにはスキン・せん断・コア層などの高次構造分布についても大幅に変化する。これらの結果について、より詳細に系統的に議論する必要がある。また、構造形成機構を解明することが、表面転写性を議論する上でも重要であると認知されている。

* Ito, Hiroshi

東京工業大学 大学院理工学研究科 有機・高分子物質専攻
東京都目黒区大岡山 2-12-1 (〒152-8552)
2006.9.4 受理

3. 最近のマイクロ成形加工に関する研究紹介

本年の Society Plastics Engineers (SPE) の年次大会, ANTEC 2006 および山形で開催された国際高分子加工学会(PPS)の年次大会, PPS-22 から注目される研究を紹介する. 特筆すべき事は, ANTEC においては, 米国のマイクロ・ナノ成形に携わる研究者および技術者が特別研究グループセッションを企画して, 15 件の研究発表がなされた(他セッションでのマイクロ・ナノ成形を含めると総計 27 件) こと, PPS においては初めて, 特別セッションが企画され, 「マイクロ成形・精密加工」が取り上げられたことが挙げられる. PPS-22 では約 23 件の講演がなされた.

P. Nagarajan らは生体模倣成形品を作製する目的で, 構造発色(タムシ色)を示す甲虫の表面を金蒸着し, その後ニッケル電鍍した金型を作製, その金型を用いてホットエンボスにより, マイクロ・ナノ構造を有する成形品の転写性を議論している²⁹⁾. 図 1 にはその転写の様子を示す. ABS 樹脂を用いて, 低圧のホットエンボス技術で加工を行っている. 甲虫表面から転写型を起こし, その金型をベ-

金蒸着された甲虫表面

Ni電鍍型の表面

ABS成形品

図 1 甲虫表面を利用した生体模倣転写成形²⁹⁾

図 2 マイクロギア成形品の回転摩擦試験による重量変化³⁰⁾

スに転写成形を行っているが, この回数が多くなることで, 明らかに表面再現性が低下する. しかし, 生体から直接的に模倣し, マイクロ・ナノ成形品を作製するという着眼点是非常に面白い.

C. K. Huang は, ポリプロピレン (PP) をベースにナノオーダの酸化亜鉛 (ZnO) を充填材とした複合材料を用いて, マイクロギアの加工を行っている³⁰⁾. 直径 1.5 mm, 重量 2.8 mg のギアにおける機械特性を, 回転摩擦試験による重量変化によって詳細に調べている (図 2). 少量の ZnO の添加 (1 wt%) によって, 摩擦による重量損失が減少するが, さらに添加率が多くなる (15 wt%) と重量減少が大きくなることが示唆された. 最適な充填材の添加率が存在することが分かった.

A. K. Angelov らは非晶性ポリオレフィンコポリマー (COC) を用いて回折格子の成形に関して, 基礎検討を行っている³¹⁾. 具体的には, 深さ 140 nm 程度, 幅 800 nm 程度の回折格子に対して転写性分布を SPM によって評価している.

P. D. Coates らは, 近年マイクロ成形に関して材料特性評価, 可視化計測, 成形品の構造評価などを精力的に進めている³²⁾. 材料の溶融特性評価に関しては成形機のノズル先端に圧力センサを取り付けた測定システムによる高ひずみ速度下でのレオロジーデータ計測や, シリンダー・パレルに設置し, 超音波センサによる音速および反射時間を測定した可塑化状態のモニタリングなどは興味深い. マイクロ成形では, 材料の溶融状態を把握すること, 可塑化のバラつきが成形性に大きく影響すること, 成形品寸法を安定化するには樹脂吐出量の精度, つまり計量精度が非常にシビアになる. このため, これらの特性を把握すること, 成形機械にも高い制御レベルが要求されている. 近年, マイクロ成形機としてブリプランジャ型の射出成形機が注目される所以である.

Coates らが計測した高ひずみ速度下でのせん断粘度データは興味深く, 高いひずみ速度 10^7 (1/s) においても溶融樹脂粘度はシェアシンニング性を示しており, 高ひずみ速度域においても通常のレオロジーデータのシェアシンニング挙動から予想できる. また, 薄肉成形過程でのオンライ

ン光弾性像の観察や樹脂流動の可視化なども非常に興味深いものである。ゲート付近では光学異方性が高くなる、つまり応力値が高くなる様子が可視化されている。さらに、マイクロ成形における金型内での超音波計測を行い、超音波の振幅と速度計測によって、熔融樹脂のセンサ部への到達の様子、型内での固化の様子、成形品の収縮の様子なども観察している。これら計測技術や解析手法の発展、さらには計測技術の複合化によって、マイクロ成形加工における流動挙動や構造形成機構が解明されることを期待する。

J. Zhao らは、バイオチップをターゲットに、マイクロ流路を有する基盤部材の製造に関して報告している³³⁾。特に金型作製や成形技術を紹介している。製造技術としてはシリコンで金型を作製して射出成形を行う技術であり、特に新規な加工技術は提案していない、つまり通常の成形技術でも十分加工が出来ることを示唆している。ただし、バイオチップの研究については、同国の大学医学部と共同で製品化している点など、その解析手法や実用例は興味深いものであった。バイオチップに関する報告は、日本においても多く報告されているが、如何に低コストで製造できるか、さらに検出システムまでも考慮したトータルな技術革新が必要であり、ハードルは高いが今後益々注目される技術であることには間違いがない。

S. C. Nian らは、1 片 5 mm 角で厚さ 100 μm および 250 μm の薄肉成形品を 8 個取りする射出成形プロセスに関して、ショートショットによる実験と市販の 3 次元流動解析ソフトを用いて数値解析を行っている³⁴⁾。特に 100 μm 厚の薄肉成形品と 250 μm 厚の成形品では充填挙動が異なり、100 μm 厚ではゲートから遠くの位置のキャビティがゲート付近のキャビティよりも早く充填完了する現象などが観察された(図 3)。ゲート付近では、いわゆる Hesitation effect (躊躇効果)が発生したためと考えている。これらの現象を理解するため、3 次元 CAE 解析を行った。金型温度を上昇させて充填挙動を解析した場合、金型温度が上昇することで充填バランスが改善されて均一化する様子を示した。一方、射出速度を増加させた場合であるが、充填のバランスは均一化に向かうが、その効果は型温度の制御に比べて小さいことを解析している。これらの充填挙動はゲートサイズやランナーサイズによっても変化するため、系統的な実験研究と数値解析が今後必要であろう。

マイクロ・ナノ成形においては、射出成形、射出圧縮成形、ホットエンボス、ナノインプリント技術など、プロセスの最適化と差別化が進むと考えられている。高アスペクトの成形品を作製する手段としては、UV や光硬化によるインプリント技術およびホットエンボス技術などが優れていることは既知であろう。

L. J. Lee らは、ポリマー型を用いて樹脂を精密転写する、ソフトエンボス技術を提案している³⁵⁾。図 4 に、彼らのソフトエンボス(ナノインプリント)技術を示す。本プロセスをまとめると以下のとおりである。微孔を有するセラミックウェハにポリマーの溶液(ポリビニルピロリジン、PVP)をスピンコートして薄膜を作製する。未乾燥状態の薄膜に事前に作製したポリジメチルシロキサン(PDMS)ベースのマイクロ・ナノ構造型を用いてプレス加工を行う。ポリマー溶液を半乾燥の状態にして PDMS 型を取り除き、

図 3 多数個取り薄肉成形品の充填挙動³⁴⁾
(キャビティ厚 100 μm ; PS 樹脂, 射出速度 80 mm/s, 金型温度 80 $^{\circ}\text{C}$)

図 4 ソフトエンボス技術³⁵⁾

図 5 マイクロ成形品 (a) PMMA 10 μm 幅のマイクロチャネル, (b) PLGA 20 μm 径のマイクロアレイ (アスペクト比 5)³⁵⁾

その後、ポリマー溶液を真空乾燥して十分固化させる。微孔を有するセラミックウェハを用いる要因として、乾燥プロセスなどで真空状態を材料に均一に与える点が挙げられる。次に、この PVP が犠牲型となり、これを用いて poly (lactic-co-glycolic acid) (乳酸/グリコール酸共重合体, PLGA) やポリメチルメタクリレート (PMMA) などを熱プレスして構造体を作製することになる (図 5)。この方法は非常に単純な方法でありクリーンルームも要さず、直径 100 nm~20 μm 程度でアスペクト比が 5 を超えるチップアレイが作製できることを報告した。極微細および高アスペクト比を有する成形品の加工技術としても非常に興味深い内容であった。

J. M. Park らは、ホットエンボスにおける樹脂の充填過程を、ニュートン流体および粘弾性を考慮した構成方程式を用いて有限要素法によって解析している³⁶⁾。ここでは形状を単純化して、2 次元断面での充填挙動を解析している

図6 ホットエンボスにおける充填挙動 ((a) キャビティモデル, (b) 充填解析結果; ニュートン流体と粘弾性の比較)³⁶⁾

(図6). 粘弾性モデルとしては Oldryod-B モデルを用いて, ニュートン流体との解析の比較を行った結果, 充填挙動が若干異なることが分かる. まだ等温状態での解析結果であり, 実現象とは隔たりがあるが今後注目される内容である. 特にキャビティ内に存在している空気や押し込まれる樹脂と空気との界面の影響などは重要な解析パラメータである. 実験結果との比較を通して今後の検討に期待したい.

4. マイクロ射出成形支援システムの開発

成形加工という「ものづくり」においては, 大量生産による低コスト化が重要な因子を占める. 非常に高付加価値で高機能性を有する材料も, 高コストでは使用される機会が減り, 最終的にメーカーは代替品への模索が始まる. このため, 成形加工という「ものづくり」では, 大量生産が可能な機械システム, 加工法なども考慮に入れた研究開発が必要である. マイクロ/ナノスケールの成形加工には, 熱盤を利用したホットエンボス法, UV や熱硬化を利用したナノインプリント法, 熔融樹脂を冷えた金型に瞬時に流し込む射出成形法や射出圧縮成形法などが代表される. これらの加工法に共通することは, マイクロ/ナノスケールの金型を利用するという点であり, マイクロ/ナノ成形加工というのは, 転写および形状のマスターとなる金型の作製技術に大きく依存する. 大量生産を考えた場合, 射出成形法や射出圧縮成形法は非常に有利であるが, そのプロセス上, 成形品の高次構造の形成機構が複雑で成形品内部にも大きな構造分布を示すことになる.

筆者らは, 新規マイクロ射出成形機を開発するとともに, 熔融材料特性を短時間に評価可能とする新規材料特性・成形試験機を開発した. この結果, 少量サンプルでの材料特性, 成形性, 成形構造・物性の解析などを総合的に評価可能となり, 新規材料開発の時間短縮が期待される. インテリジェントマイクロポリマー成形支援システム (IMPP system) の外観写真と概略を図7に示す. 超小型電気式射出成形機とマルチパスタタイプのレオメータおよび高圧膨張計からなる複合型材料試験機である^{13), 14)}. マルチパスタタイプのレオメータは独立した2本のピストンからなり, ピストンを上下に同期させて移動することで, マイクロスケールのスリット (400・m 厚) における流動圧力損失を3点の圧力センサで計測することで, セン断応力を算出する. スリット内の流量からひずみ速度を計算し, 最終的にせん断粘度を求めることが可能である. 一方, 高圧膨張計はレオメータ同様に, 独立した2本のピストンからなり,

図7 インテリジェントマイクロポリマー成形支援システムの外観¹³⁾

温度および圧力を変化した際のピストンの変位を測定し, その変位量から比容積-圧力-温度の関係, つまり PVT 特性を求めることが可能である. 熔融粘度および PVT 測定は, トータルで約 10 g のサンプルを必要とし, 超小型射出成形機よりホットランナーを通して, 材料試験機に送り込まれる. 樹脂の材料試験機への移送後, 直ちに粘度測定が開始し, 粘度測定後に PVT 測定へと移行する.

材料特性を評価する一方, 40 g 程度のサンプルを用いて, 超小型射出成形機を用いて成形実験を行った¹⁴⁾. 金型温度や成形温度を変化させて, 様々な材料の成形性について検討するとともに, 得られた成形品の残留ひずみ, 複屈折, 広角 X 線回折測定および引張試験を行い, 分子配向, 結晶構造および力学的性質についても検討を行った. 具体的には成形品流動長の長さの確認, 偏光顕微鏡を使用して

分子配向の程度の把握、成形品をマイクロスケールのダンベル形状に加工して、力学特性の評価を系統的に短時間で評価した。

さらに最近、マイクロスケールの樹脂流動の可視化および分子配向の状態をオンラインで評価できるシステムも構築した¹⁵⁾ (図 8)。具体的には、マイクロ金型に石英窓を設置した可視化金型と偏光レーザー計測システムをマイクロ射出成形機に適用した。ここでは、レーザー光が溶融樹脂を通過したことによる透過光強度と位相差を測定して、流動過程での光学異方性を「その場観察」できる。複屈折形成の時間変化を調べた結果、射出速度が高いほど複屈折上昇が大きく、到達値も高いことが示唆された。その後、応力の緩和に伴い複屈折も減少していくことが確認された。また、本システムでは光弾性像の 2 次元観察も可能である。

5. マイクロ成形品の高次構造形成

前述のとおり、マイクロ成形品の定義は、①マイクロスケールの表面構造体を有する成形品、②成形品重量がサブミリもしくはマイクログラムの超微小成形品、③サブミリからマイクロメートルレベルの厚さでマイクロ・ナノスケールの精度を有する精密薄肉成形品である。そこで筆者らは、超薄肉成形品、微小成形品、マイクロ・サブマイクロ表面構造体を有する微細表面成形品を作製し、その加工性、成形品の各種構造と物性を系統的に評価した。以下、得られた知見について簡単に紹介する。

図 8 樹脂流動可視化およびオンライン分子配向評価システムの外観¹⁵⁾

5.1 超薄肉射出成形品の構造形成に関する基礎的検討

マイクロ成形支援システムを用いて、溶融特性を評価するとともに超薄肉射出成形を行った。これまで、結晶性材料として、PP, POM, LCP, PA など、非晶性材料として、PC, PMMA, COP, COCなどを評価した。また、CNTやCNFなどの強化材を有する複合材料についても幅広く検討した。本実験で使用した成形品の形状は平板で全長 60 mm, 幅 5.5 mm であり、中心部 (長さ 40 mm) では、その厚さが 0.1, 0.3, 0.5, 1.0 mm と可変する金型を使用した。金型温度および射出温度は適宜変化させ、成形性および構造への影響について調べている^{14), 16)}。得られた成形品について複屈折、広角 X 線回折 (WAXD) や DSC 測定を行い、分子配向および結晶構造について検討した。さらに、断面を 30 μm 厚の薄片に切削して、薄肉射出成形品の断面構造について詳細に調べた。また、ダンベル試験片を切出して引張試験を行い、力学的性質についても検討した。その結果、薄肉成形品ではゲート付近での分子配向が高く、結晶性サンプルでは結晶化度も高いことが分かった。また、断面観察から成形品内部にはスキン・せん断配向・コア層構造を示し、薄肉化によってスキン・せん断配向層の厚化およびせん断層の分子配向が高い値を示すことが示唆された (図 9)。

5.2 超微小成形品の高次構造・表面物性評価

ここでは、微小成形品の構造形成を明らかにすると同時に、新規微小デバイスの創製を意識した超微細微小成形を行い、得られた成形品の構造と物性を詳細に調べた。特に成形厚みの異なる直径 1 mm のマイクロ成形品を作製して、成形条件が構造・物性に及ぼす影響について検討を行った¹⁷⁾ (図 10)。PP, PC, POM などの成形品を作製した結果、成形品厚 0.1 mm という超薄肉および微小金型においても樹脂は十分に充填することができ、超薄肉微小マイクロディスクの作製が可能であった。0.3 mm 厚の PC ディスクは重量 0.273 mg, 標準偏差 0.029 mg となり、重量バラつきも小さく、非常に高精度に成形が可能であった。成形品の高次構造はゲート近傍で光学異方性が高く、ディスクの半径方向に沿って異方性が減少すること、さらに、ディスクの端、つまり流動末端では半径方向と直交方向、つまり円周の法線方向に分子が配向して異方性を示すこと

図 9 PP 薄肉成形品の断面写真 (射出速度 110 mm/s, 射出温度 220°C, 金型温度 40°C, 保圧 55 MPa, 成形品板厚 $t=0.1$ mm)¹⁴⁾

が示唆された。さらに、ディスク内部の高次構造は、スキン・せん断配向・コア層の構造分布を示すこと、特に薄肉成形品の場合、これらの構造分布が顕著に見られる事が分かった。

5.3 マイクロ・サブマイクロ表面構造体を有する成形品の成形性・構造・物性の評価

近年、微細表面構造を有するマイクロ流路デバイスや光素子等の研究開発は盛んに行われている。ここでは、マイクロ・ナノ（厳密にはサブマイクロ）スケールの表面構造を有する成形品の成形加工特性、その表面および内部高次構造、物性に関する研究を行った。具体的には、 9×9 mm に溝幅を $10 \sim 200 \mu\text{m}$ 、深さ $5 \sim 200 \mu\text{m}$ などの凸形状を有する成形品や、数百 μm の表面格子形状の成形品などを作製した¹⁸⁾。また、数 $10 \mu\text{m}$ のマイクロプリズムでの転写性¹⁹⁾や光の波長程度の 500 nm スケールのライン&スペースについても成形性、構造形成の評価を行っている²⁰⁾。

長さ $400 \mu\text{m}$ 、深さ $20 \mu\text{m}$ の格子状の表面転写性を評価した結果を紹介する。成形品の厚さは薄肉化を意識して、 0.1 、 0.3 、 1.0 mm と変化させた。また、試料には、PP、COC、PC、PMMA などを用いた。この結果、ゲート近傍ではせん断応力の増加から分子配向が高く、つまりひずみが大いことや、射出速度の増加にともない、内部のせん断配向層が厚くなる事が示された（図 11）。また、薄肉にともない、材料の固化が急激に起こる事で、流動末端には保圧が十分に付与されず、型内圧力にも分布が生じており、表面凹凸の転写性に分布が生じる。成形条件に対する転写率の分布およびスキン/せん断層の厚みを総合的に判断すると、スキン/せん断層の発達（固化）が成形品面内の転写性に関係することが示唆された。

また、図 12 は、高さ $200 \mu\text{m}$ で幅 $100 \mu\text{m}$ のライン&

スペース表面構造体を有する PP 成形品の断面写真である。クロスニコル下での偏光顕微鏡写真で、スキン・せん断配向・コア層の高次構造分布が観察される。ゲート近傍ではせん断応力が高く、マイクロ構造体への樹脂流入後、せん断配向の発達が大きく、マイクロ構造体への樹脂の流れ込みと同時にその構造体直下での流動配向によってせん断層の厚化が生じる。一方、ゲートから離れた地点の流動末端では、樹脂圧力は低く、従ってせん断応力も低い状態であり、熔融樹脂はファウンテン流動を生じながら、マイクロ構造体流れ込み、構造体の内部に薄いせん断配向層が形成されている。つまり、成形品中央部と流動末端部では、せん断配向の形成に大きな違いが見受けられ、これら断面内の高次構造分布が成形特性、収縮率、力学特性や熱物性にバラつきを生じさせる要因であることは明確である。

6. おわりに

紙面の都合で十分な紹介や議論は出来なかったが、最新のマイクロ射出成形に関する研究動向を一部紹介した。様々なプラスチック材料でのマイクロ/ナノ成形品の成形加工-高次構造-物性の相関を明らかにするとともに、マイクロスケールでのポリマー流動特性と成形品の構造・物性データベースの系統的、統一的な検討は、高付加価値・機

図 10 直径 1 mm のマイクロディスク成形品と偏光写真（射出速度 200 mm/s 射出温度 300°C 、金型温度 80°C 、保圧 80 MPa 、成形品板厚 $t=0.3 \text{ mm}$ ）¹⁷⁾

図 11 マイクロ表面構造体を有する COC 成形品の断面偏光写真（射出速度 50 mm/s 射出温度 290°C 、金型温度 90°C 、保圧 20 MPa 、成形品板厚 $t=0.3 \text{ mm}$ ）¹⁸⁾

図 12 ライン&スペース表面構造体を有する成形品の断面偏光写真（射出速度 150 mm/s 射出温度 220°C 、金型温度 40°C 、保圧 20 MPa 、成形品板厚 $t=0.3 \text{ mm}$ ）

能性デバイス基盤部材の開発に必要不可欠である。今後の課題として、より広範囲なスケールでの成形加工性の把握、発現する高次構造、モルフォロジーや各種物性の評価などが挙げられる。また、これまでに得られた高次構造、各種物性のデータベースをもとに、理論モデルの構築やより現実的な数値解析などへの展開が残されている。本研究技術分野の活発な議論を期待したい。

筆者らの研究の一部は、NEDO 平成 15 年度産業技術研究助成事業「インテリジェントマイクロポリマープロセス支援システムの開発」(プロジェクト ID: 03 A 33001 d)により遂行された。本プロジェクトは、連携研究者の東京工業大学、斉藤卓志助教授、安原鋭幸助手に多大な御協力をいただいた。さらに、装置開発は日精樹脂工業(株)山極佳年氏、東洋精機製作所(株)室井一男氏との連携研究、開発によって行われた。研究を遂行するにあたり、東京工業大学、鞠谷雄士教授にはご指導とご鞭撻をいただき、実験全般においては、東京工業大学/NEDO 研究支援者、風間邦彦博士に多大なる研究支援をいただいた。ここに感謝の意を表する。

また紹介した研究の一部は、筆者らの研究グループと企業 6 社を中心としたマイクロ成形研究共同体の成果であり、ここで取り上げた超微小成形品の構造形成の研究課題は、太盛工業(株)田中茂雄氏、大久保健児氏による共同研究である。ここに関係各位に感謝申し上げる。

参 考 文 献

- 1) 特集マイクロモルディング, 成形加工, **15**(4) (2003)
- 2) 特集ナノストラクチャーを作り込む成形加工, 成形加工, **16**(9) (2004)
- 3) 特集 MEMS, 成形加工, **17**(6) (2005)
- 4) 山極佳年: 成形加工, **15**(4), 257 (2003)
- 5) 安原鋭幸: 成形加工, **15**(4), 260 (2003)
- 6) 大森整, 上原嘉宏, 森田晋也, 郭泰洙, 石川惣一, 金井茂: 成形加工, **16**(9), 567 (2004)
- 7) Weber, L. and Ehrfeld, W.: *Kunststoffe*, **88**, 1791 (1998)
- 8) Zhao, J., Mayes, R.H., Ge, C. and Sing, C.P.: *Proceedings of Polymer Processing Society-18th Annual meeting* -, 163 (2002)
- 9) Yang, S.Y., Nian, S.C. and Sun, I.C.: *Intern. Polymer Processing*, **XVII**, 354 (2002)
- 10) Whiteside, B., Martyn, M.T. and Coates, P.D.: ANTEC Tech. Paper 2004, 757 (2004)
- 11) Michaeli, W. and Gartner, R.: ANTEC Tech. Paper 2004, 752 (2004)
- 12) *MST NEWS Vol.5* (2005)
- 13) Ito, H., Saito, T., Yasuhara, T., Kikutani, T., Yamagiwa, Y. and Muroi, K.: ANTEC 2005 Tech. Paper, 693 (2005)
- 14) Ito, H., Yagisawa, Y., Saito, T., Yasuhara, T., Kikutani, T. and Yamagiwa, Y.: *Theo. and Appl. Mech. Japan*, **54**, 263 (2005)
- 15) 伊藤浩志, 風間邦彦, 安原鋭幸, 斉藤卓志, 鞠谷雄士, 林和樹, 山極佳年, 坂田雄一: 成形加工 '06, **15** (2006, 東京)
- 16) Ito, H., Yagisawa, Y., Saito, T., Yasuhara, T. and Kikutani, T.: ANTEC 2005 Tech. Paper, 894 (2005)
- 17) Ito, H., Kazama, K., Kikutani, T., Okubo, K. and Tanaka, S.: ANTEC 2006 Tech. Paper, 2511 (2006)
- 18) 伊藤浩志, 風間邦彦, 安原鋭幸, 斉藤卓志, 鞠谷雄士: 第 54 回高分子討論会予稿集, 5398 (2005, 山形)
- 19) 風間邦彦, 伊藤浩志, 安原鋭幸, 斉藤卓志, 鞠谷雄士, 國本栄起, 小林博行: 成形加工シンポジア '05, 253 (2005, 仙台)
- 20) 高岡俊允, 八尾和幸, 北川清一郎, 伊藤浩志, 安原鋭幸, 斉藤卓志: 成形加工 '06, **33** (2006, 東京)
- 21) Kukla, K., Loibl, H. and Detter, H.: *Kunststoffe*, **88**, 1331 (1988)
- 22) Yoshii, M., Kuramoto, H. and Kato, K.: *Polym. Eng. Sci.*, **33**(19), 1251 (1993)
- 23) 吉井正樹, 海老沼尚武: 成形加工, **6**(2), 90 (1994)
- 24) 平田雅也, 北村啓明, 衣笠豊: 成形加工 '00, 129 (2000, 東京)
- 25) 大寺泰章: 成形加工, **17**(6), 384 (2005)
- 26) 上田昌哉: 成形加工, **13**(11), 732 (2001)
- 27) Yoshii, M., Kuramoto, H. and Ochiai, Y.: *Polym. Eng. Sci.*, **38**(9), 1587 (1998)
- 28) 安原鋭幸, 加藤和典, 今村博史, 大竹尚登: 塑性と加工, 43(492), 45 (2002)
- 29) Nagarajan, P., Woo, K. and Yao, D.: ANTEC 2006 Tech. Paper, 2536 (2006)
- 30) Huang, C.K.: ANTEC 2006 Tech. Paper, 2521 (2006)
- 31) Angelov, A.K. and Coulter, J.: ANTEC 2006 Tech. Paper, 2516 (2006)
- 32) Coates, P.D., Whiteside, B.R. and Martyn, M.T.: *Conference Proceedings of Polymer Processing Society-22nd Annual Meeting*-, SP 6-K 1 (2006)
- 33) Zhao, J., Chen, G., Law, W.S., Yong, M.S., Li, S.F.Y. and Xu, D.: *Conference Proceedings of Polymer Processing Society-22nd Annual Meeting*-, SP 6-K 2 (2006)
- 34) Yang, S.Y., Nian, S.C. and Huang, S.T.: *Conference Proceedings of Polymer Processing Society-22nd Annual Meeting*-, SP 6-03 (2006)
- 35) Lu, C. and Lee, L.J.: *Conference Proceedings of Polymer Processing Society-22nd Annual Meeting*-, SP 6-K 3 (2006)
- 36) Park, J.M., Kang, T.G. and Kwon, T.H.: *Conference Proceedings of Polymer Processing Society-22nd Annual Meeting*-, SP 6-05 (2006)