

# レーザー光を用いた プラスチック射出成形品の高品位化・高機能化

佐藤 勲\*

## 1. はじめに

プラスチック材料、特にエンジニアリングプラスチックの射出成形品は、その成形自由度の大きさ、比強度の高さに加えて、生産性の高さから、さまざまな部位の機械部品として利用されている。射出成形では、高温の溶融プラスチック材料を材料の凝固温度以下に冷却された金型内に充填するため、溶融樹脂が金型内を充填流動する間に固化し始めることに基づく分子鎖が強く配向した成形品表面層（いわゆるskin層）の発現が不可避であり、それによる機械的・熱的・光学的性質の異方性が問題視されることがある。また、これらが問題にならないまでも、肉厚の薄い成形品を得ようとする、充填途中で溶融樹脂の流動が停止して成形が行えなくなる充填不良の発生が成形そのものの可否を決定づけることもある。これらを改善するためには、溶融樹脂充填中の金型温度を高めてこの間の冷却を抑止すればよいが、こうすると射出成形加工の特長の一つである生産性が損なわれるため、この方法が実際の成形加工において用いられることは少ない。

そこで著者らは、型内の溶融樹脂に外部から熱エネルギーを投入することによって充填段階における樹脂の冷却を抑止する方法を考案し、その実現可能性を検討してきた<sup>1)</sup>。その結果、この方法によれば、金型は型内樹脂の冷却に専念できるため、生産性をほとんど落とさずに、skin層の消失のみならず、成形品表面の転写性の向上、極薄成形品の成形性改善など、充填段階における樹脂の冷却に基づく射出成形品の問題点を大幅に改善できることが明らかになった。

さらに、この知見をもとに、型内樹脂に投入する熱エネルギー源として用いるレーザー光の可干渉性を利用し、skin層の性質をパターン状に制御することによって、射出成形品に新たな機能を発現させることを試みた<sup>2,4)</sup>。例えば、透明な射出成形品のskin層内の光学的異方性を微細パターン状に制御すれば、成形品を透過する光に対して回折格子やレンズとして作用する光学素子を成形品の形状によらずに実現できる。すなわち、従来の射出成形品の形状による機能とは独立した新たな機能を成形品に付与できる可能性がある。

本稿では、これらのレーザー光を用いたプラスチック射出成形品の高品位化・高機能化に対する著者らの取り組みを紹介することを通して、熱工学が製造の分野にど

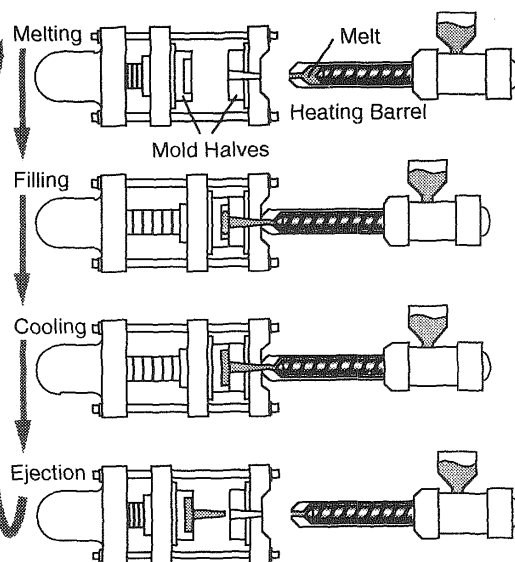


図1 プラスチック射出成形プロセス

のように寄与できるかを述べていきたい。

## 2. プラスチック射出成形プロセスとskin層の発現

まず、プラスチック射出成形プロセスのあらましとその伝熱工学的特徴、特にskin層の発現機構について述べておく。プラスチック射出成形は、図1に示すように、射出成形機可塑化筒内で加熱溶融混練された溶融プラスチック材料を、金属製の型に彫り込まれたキャビティ内に高速に充填することで附形・固化させる成形法であり、成形品の大きさや形状によらず比較的高い成形精度が短い成形サイクルで、すなわち高い生産性を維持しながら得られる点を最大の特徴とする。この特徴は型内を流動する溶融プラスチック材料と型壁との間の熱移動に基づいている。

図2は型キャビティ内を流動する溶融プラスチック材料の流動先端近傍の様子を観察した結果<sup>5)</sup>である。この図に見られるように、溶融プラスチック材料はキャビティ内を「わき出し流れ」を呈しながら流動するため、高温の溶融材料は流動先端直後で初めて低温の型壁に接触し、冷却される。このときの溶融材料・型壁界面の温度 $T_i$ は、非定常熱伝導の解析解<sup>6)</sup>から、次のように予測され、時間、すなわち接触点からの距離に無関係である。

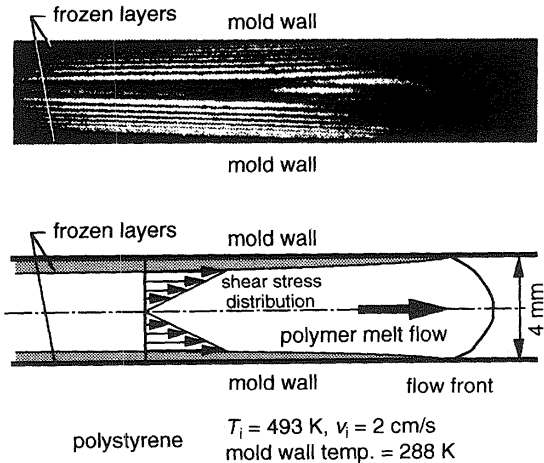


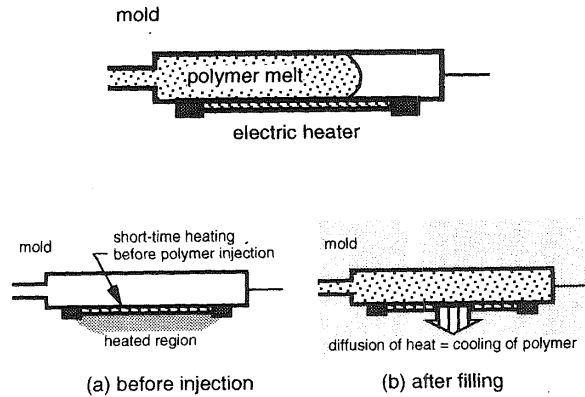
図2 充填工程における溶融樹脂の挙動と固化層の発現

$$T_i = \frac{\sqrt{\rho_p c_p k_p} T_{p0} + \sqrt{\rho_m c_m k_m} T_{m0}}{\sqrt{\rho_p c_p k_p} + \sqrt{\rho_m c_m k_m}} \quad (1)$$

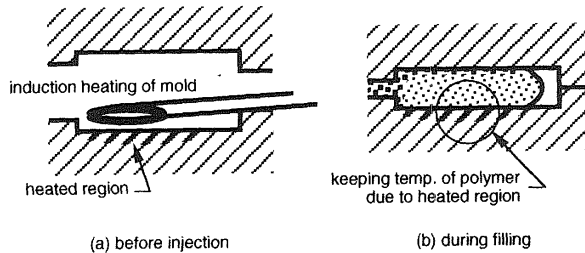
ここで、 $T_{p0}$  と  $T_{m0}$  は溶融材料と型壁の接触前の温度、 $\rho$ 、 $c$ 、 $k$  は材料の密度、比熱、熱伝導率である。一概にプラスチック材料の(密度×比熱×熱伝導率)の値は金型を構成する金属のそれに比べて概ね3桁ほど小さいため、この界面温度はほとんど金型の初期温度に等しくなる。金型は充填される溶融プラスチック材料の凝固温度より十分に低い温度まで冷却されていることが普通であるから、型内を流動する溶融プラスチック材料は型壁に接触した瞬間から固化し、図2に見られるように表面に固化層を形成する。このような固化層の形成が、溶融プラスチック材料がキャビティ内を流動している間から生じる点にプラスチック射出成形の利点と欠点の双方が根ざしている。すなわち、プラスチック材料は一概に熱伝導率(温度伝導率)が低く、溶融材料の一端を冷却しても全体が固化するまでに長い時間がかかる。したがって、射出成形プロセスの冷却工程は本来もっとも時間を要する工程であるが、実際には表面に固化層が発達し成形品の形状を維持できる強度になった時点で型から取り出すことで生産性を維持している。すなわち、素早い固化層の発達は射出成形プロセスの生産性維持のために必要不可欠である。一方、溶融材料の流動中に固化層が発達すると、材料内にひずみ(高分子鎖の配向)が残留し、これがskin層内の機械的・熱的・光学的異方性の原因となる。このことから、固化層の発達の制御、言い替えると溶融プラスチック材料とキャビティ壁との間の熱移動の制御が、射出成形プロセスの生産性と成形品品位維持の両立に対して重要な意味を持つことが理解いただけるものと思う。

### 3. 充填工程における伝熱制御

上述の通り、プラスチック射出成形の充填工程、すなわち溶融プラスチック材料がキャビティ内を流動している



(1) 薄膜状電気ヒーターによる加熱



(2) 高周波誘導による加熱

図3 型初期温度を高める方法

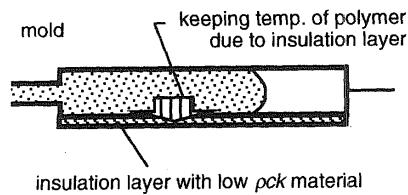


図4 低pck材料を型に用いる方法

間の固化層の発達を制御することが生産性と成形精度を両立させるために必要であるが、実際にはこの制御はきわめて難しい。何故なら、図2に示すような流動先端直後からの急速な冷却と固化層の発現が、プラスチック材料と金属製の型という材料の組み合わせによって「自然に」生じているからである。

このような急速な冷却を抑制する方法は、成形されるプラスチック材料と条件が決まっているとすれば、(1)式からもわかるとおり、型の初期温度  $T_{m0}$  を高めるか、型として  $pck$  (密度×比熱×熱伝導率) の値の小さな材料を用いるかの二通りしかない。実際に冷却制御のための試みでもこの二つの方法のいずれかが採られている。ただし型全体の初期温度を高めたり、型全体を  $pck$  の小さな材料で作ったりすると、充填工程終了後の溶融プラスチック材料の冷却固化をも抑制してしまい、射出成形の最大の利点である生産性を低下させることにつながるため、実際に試みられている方法では、溶融材料に接触する型キャ

ビティ表面近傍のみの初期温度を高める、あるいはキャビティ表面近傍のみに $pck$ の小さな材料を設置することで生産性への影響を抑えている。

図3と図4はこれらの方法の実際を模式的に示したものである。図3は型初期温度を高めることで冷却制御を行おうとする方法であり、キャビティ表面に設置した薄膜状電気ヒーターによって熔融材料充填以前にキャビティ表面を加熱したり<sup>7)</sup>、熔融材料充填以前に型を開いて高周波誘導加熱によってキャビティ表面温度を高める<sup>8)</sup>などの方法が採られる。図4は $pck$ の小さな材料で型を構成し冷却制御を行おうとする方法であり、一概にキャビティ表面に低 $pck$ 材料の皮膜を貼付することが多い<sup>9)</sup>。低 $pck$ 材料としては、セラミックスや高融点ポリマーが用いられる。

これらの方法はそれぞれ成形品の成形精度や品位の改善に効果を有することが確認されている。しかし、型を加熱するために要する時間による生産性への影響や、薄膜状電気ヒーターや低 $pck$ 材料皮膜の耐久性、あるいは薄膜・皮膜による成形品形状の制限など、実際の射出成形プロセスに適用するためには解決すべき問題が多く残されている。

#### 4. 型内プラスチック材料の直接加熱による伝熱制御<sup>1,2)</sup>

図3・4に示したような方法の実用的な難点は、熔融プラスチック材料と型キャビティ壁との間の熱移動を型側から制御しようとする点に基づいて生じている。すなわち、型は熔融材料に付与されるべき形状を規定すると同時に熔融材料を冷却する役割を担っており、その上さらに冷却制御のための機能を付与することが「過負荷」であるため、実用上の問題が生じるといえる。この点を回避するためには、熔融材料と型壁との間の熱移動の制御を熔融材料側から行えばよい。ただし熔融材料は冷却されて成形品になるためこれに「手を加える」ことは事実上不可能であるため、著者らは型壁への熱移動による冷却に見合った量の熱エネルギーを外部から熔融材料に直接投入することで型壁との接触直後の熔融材料表面層を「保温」する方策を検討した。キャビティ内樹脂へのエネルギー投入法には様々なものが考えられるが、著者らは制御性に優れ、加熱(保温)領域の推定の容易なふく射加熱を利用した。この検討のための実験装置を図5に示す。ふく射源には供試樹脂材料(ポリスチレン)に強く吸収される炭酸ガスレーザーを用い、金属製の型内部にレーザー光を導くためにキャビティの一部を赤外線透過材料(ZnSe)としてある。

このような装置によって、キャビティ内の熔融樹脂に、熔融樹脂がキャビティ内を流動している間のみ炭酸ガスレーザーを照射し、固化層の発達を抑制した状態で成形を行って、得られた成形品をふく射加熱を行わない通常の成形による成形品と比較した。図6にはその一例とし

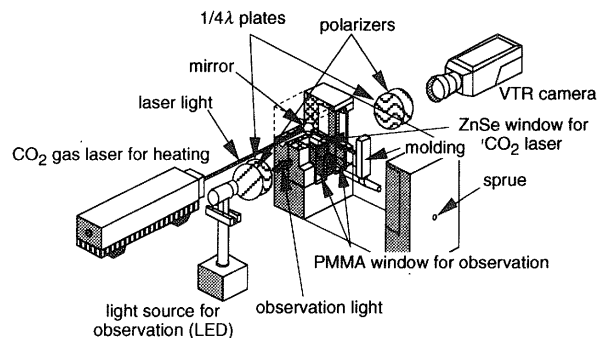


図5 レーザー照射による型内プラスチック材料保温効果の検討のための実験装置

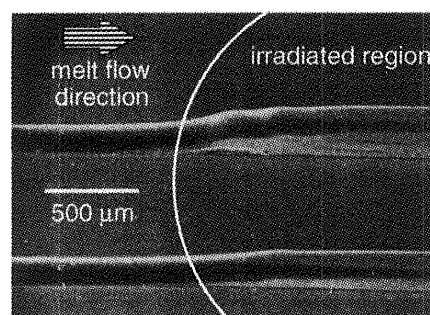


図6 レーザー照射による転写性改善効果

て、キャビティ壁表面(窓内表面)に彫り込んだ幅 $100\ \mu\text{m}$ 、深さ $100\ \mu\text{m}$ と $200\ \mu\text{m}$ の矩形溝を転写してできる成形品表面の突起形状に対するふく射加熱の効果を示してある。この図に見られるように、ふく射加熱を行わずに得られた成形品表面の突起は、型表面に彫り込まれた溝の深さによらずほぼ等しい高さの「かまぼこ」状であるのに対し、ふく射加熱を行った領域では、溝深さに対応した高さの矩形断面形状の突起が転写されている。すなわち、熔融樹脂材料がキャビティ内を流動している間の固化層の発達を伝熱工学的に抑制することによって、成形品の精度(この場合は転写性)を飛躍的に改善することができる。ふく射加熱を行わず通常の成形条件の調整だけでこれと同等の効果をしようとすると、相当に極端な条件設定を行わねばならない。例えば、図7は熔融樹脂初期温度、射出圧力ならびに熔融樹脂の流動速度を変化させたときの突起高さの変化を示したものである。この図に見られるように、熔融樹脂初期温度や射出圧力を実用的な範囲で高めても、転写高さをふく射加熱時と同等にすることはできず、唯一、熔融樹脂流動速度を高めることによってふく射加熱時に近い転写高さが得られている。このことは、固化層が発達する前に附形を終えることが転写性向上の鍵を握っていることを示しており、ふく射加熱による固化層発達抑制の効果と同一の原理に基づくものである。

これ以外にも、附形中の固化層の発達の抑制が、流動長の改善(図8)やskin層内残留複屈折(光学的異方性)の

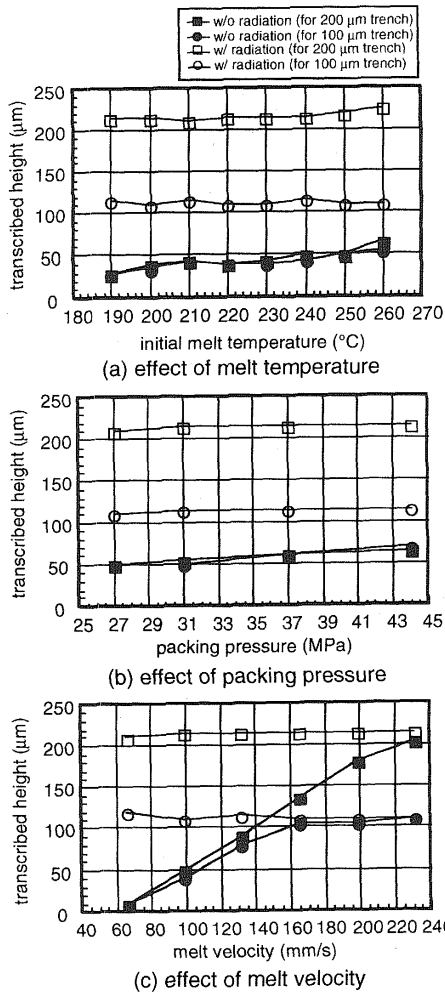


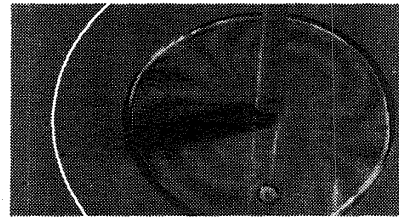
図7 レーザー照射による転写性改善効果と成形条件による効果の比較

低減(図9)など、いわゆる不良現象の抑止に効果を有することが確認されている。さらに、型内樹脂の冷却解析によって、これらの不良抑止が冷却プロセスの延長、すなわち生産性の低下にほとんど影響しないことも確認している。ただしこれらの検討においては、固化層発達の抑制にふく射加熱を用いており、そのため型には光透過のための「窓」を取り付けねばならず、実用性という意味では疑問符をつけざるを得ない。しかし、この方法の本質は型キャビティ内の溶融樹脂材料の表面付近に、溶融樹脂が流動している間だけエネルギーを供給して樹脂を保温することにあり、同等の効果を有するふく射以外のエネルギー源を用いれば、より実用的な高品位射出成形法を実現することができるものと考えられる。

### 5. 照射レーザーの可干渉性を利用した射出成形品の高機能化<sup>3,4)</sup>

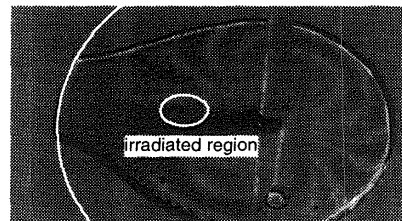
上で述べたように、成形途上の溶融プラスチック材料に外部からエネルギーを投入することで材料表面の冷却固化を抑制する方法は成形品の精度・品位を改善する上

w/o laser irradiation



shape of mold

w/ laser irradiation



shape of mold

図8 レーザー照射による流動長改善効果

Irradiated Case

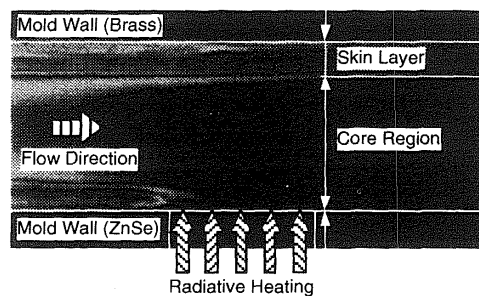


図9 レーザー照射による skin 層内残留複屈折低減効果

で有効であると同時に、生産性への影響もほとんどないことが確認された。しかし、型内材料に投入するエネルギーとして光を用いるためには型に「窓」をつけねばならず、これが実用上の難点になることも上述の通りである。この方法では、型内材料に投入された光は材料を加熱するための「熱源」としてしか作用しておらず、せっかく型に窓を取り付けて光を導入しているにもかかわらず、光の性質を十分に活用しているとは言い難い。

光、特にレーザー光には可干渉性という性質があり、干渉を用いると通常の電気ヒーターなどでは不可能なほどの微細な加熱分布制御を実現できる。著者らは、この性質を利用して skin 層内に残留する複屈折(光学的異方性)をパターン状に制御し、射出成形品に新しい光学的機能とその形状とは独立に付与することを考えた。その実現可能性を探るために、充填工程中の型内溶融プラスチック材料に干渉したレーザー光を照射して、実際に skin 層内に形成される複屈折パターンを評価した。

図10はこの検討のために用いた干渉レーザー光学系である。この光学系によって型内溶融材料に照射される

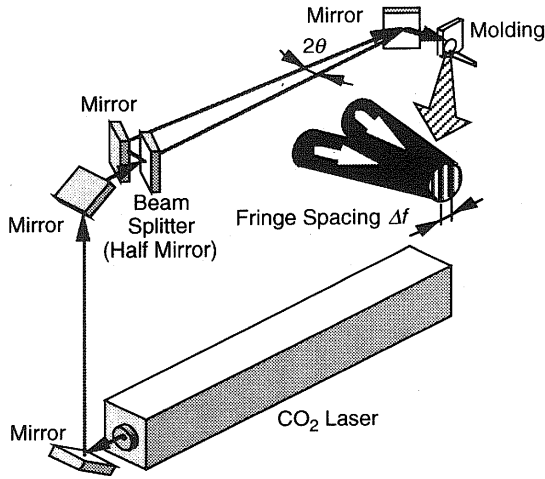
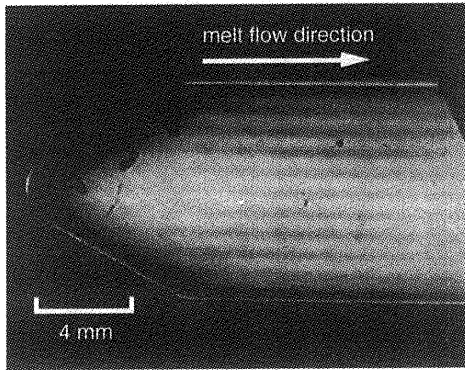


図10 干渉レーザー光生成のための光学系



fringe spacing = 0.8 mm  
 melt flow rate = 15.5 cm/s  
 melt temp. = 230°C  
 initial mold temp. = 30°C  
 mean radiation intensity = 67.7 W/cm<sup>2</sup>

図11 成形品表面層に記録された複屈折パターンの例

レーザー光は図中に示すような平行・等間隔の縞状のパターンとなり、このパターンに沿った形状に型内材料表面が加熱される。強く加熱された部分のskin層内の複屈折は緩和し、加熱の弱い部分の複屈折はもとのまま残留するから、skin層内には照射レーザー光パターンと同形状の複屈折パターンが記録されるはずである。この検討においては干渉縞は溶融プラスチック材料の流動方向に一致させた。

図11に代表的な成形品表面層の複屈折パターンを示す。この図に見られるように、成形品表面層には確かに照射レーザー光パターンに一致する複屈折パターンが記録されていることが確認できる。この複屈折パターンのコントラスト(パターン内の最大複屈折と最小複屈折の差)は成形条件によって変化する。図12~14はそれぞれ射出樹脂温度、金型温度、射出速度を様々に変えたときに成形品に観察される複屈折(リタデーション)パターンの

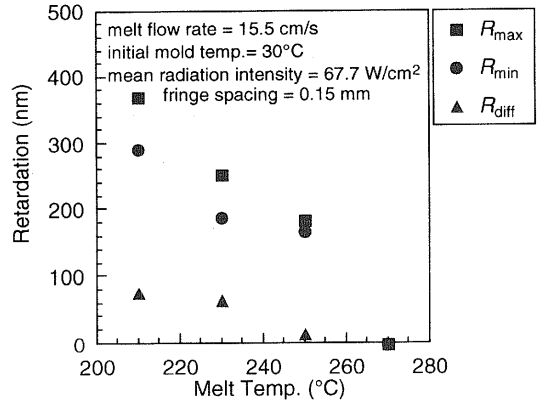


図12 複屈折パターンに対する射出樹脂温度の影響

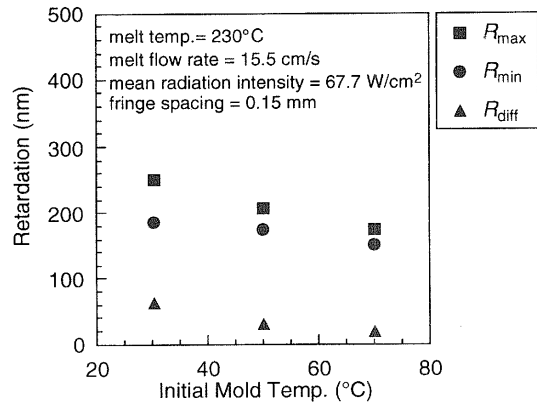


図13 複屈折パターンに対する金型初期温度の影響

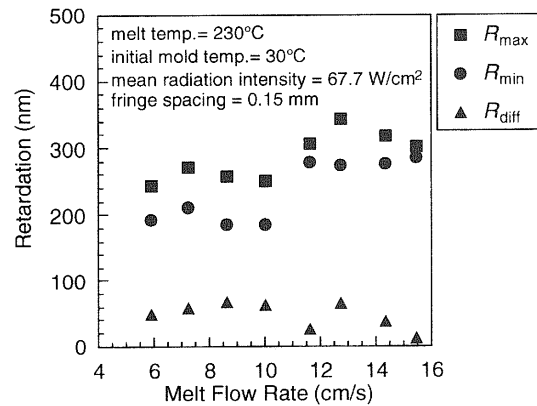


図14 複屈折パターンに対する射出樹脂速度の影響

極大・極小部分の平均値とそれらの差を示したものである。複屈折パターンのコントラストは、射出樹脂温度、金型温度が低いほど大きくなる傾向が見える。射出樹脂温度、金型温度の低下は成形途上の樹脂表面層の冷却を促進するから、干渉レーザー照射によるskin層内の分子配向のパターン状制御にはまずskin層内に十分な分子配向が生じる条件が必要であることがわかる。これに対して射出速度の影響はやや複雑で、リタデーション分布の差はいったん上昇してから低下するように見える。射出速度の増大は表面層内の分子配向を強めるが、同時に成形

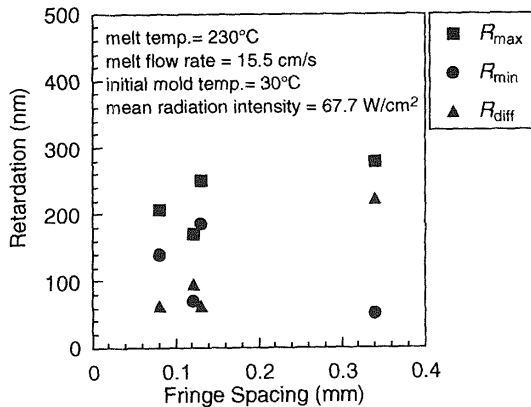


図15 複屈折パターンに対するパターン間隔の影響

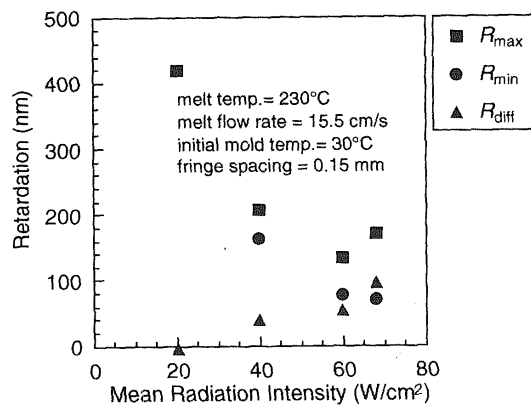


図16 複屈折パターンに対するレーザー強度の影響

途上の樹脂の冷却を抑制し、樹脂表面近傍の固化層を薄くする。図14に示された結果はこれら両者が重畳した結果と考えられる。

さらに、成形品表面層に記録される複屈折パターンのコントラストは、パターンの緻密度（パターンの間隔）と照射レーザー強度にも影響されるものと考えられる。図15、16はそれぞれ線状パターンの間隔と照射レーザーパワーを変化させたときの成形品表面層のリタデーションパターンの極大・極小部分の平均値とそれらの差を示したものである。図15に見られるように、パターン間隔を小さくしていくにつれて、表面層内のリタデーション分布の差（振幅）は小さくなっていき、成形品に形成される分子配向パターンのコントラストが弱まっていく。これは、パターンを横切る方向の樹脂内の熱拡散が、干渉レーザー光照射によってできる温度分布を平準化するためである。したがって、この方法で成形品skin層内に付与できる分子配向パターンの緻密度には、樹脂内の熱拡散に関係した限界が存在すると言える。一方、照射レーザーパワーの増大はskin層内の分子配向分布のパターン制御の制御性を向上させるように見える。これは干渉光明部（リタデーション極小部）における分子配向の緩和の度合いがレーザーパワーの増大にともなって向上するためである。しかしレーザーパワーをさらに強めていく

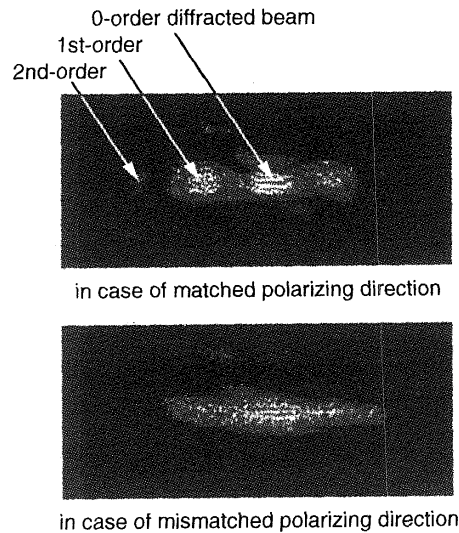


図17 複屈折パターンの回折格子としての適用例

と、樹脂内の熱拡散によって干渉光暗部（リタデーション極大部）における加熱効果も強まるため、結果的にパターンのコントラストは弱められる結果になることに注意すべきである。

この結果を踏まえてskin層内の分子配向パターンのコントラストを高める条件を考えると、冷たい金型に比較的低温の樹脂を充填して充填途上の樹脂表面に低温層が十分発現できるようにした上で、適切な強度の干渉レーザー光を照射して、干渉パターンの明部で樹脂表面の低温層内の温度を内部の分子配向を緩和させるに十分だけ向上させつつ、暗部への熱拡散を抑制することが必要であることがわかる。干渉パターンの明部と暗部との間の熱拡散を抑制するには、伝熱工学的に言えば溶融樹脂の流動速度、すなわち射出速度を上昇させるのが最も効果的であるが、図14に示したとおり、実際の成形品の分子配向パターンのコントラストを計測する限りその効果はあまり明確ではなかった。これは、射出速度を増加させると、充填途上に溶融樹脂表面層部に発現する固化層の厚みが薄くなり、ふく射照射による温度上昇領域の厚さと合致しなくなるためである。言い替えると、射出成形品skin層内の分子配向パターンを明確化するためには、射出速度の増加のみならず、照射するレーザーの波長とプラスチック材料のふく射吸収特性（吸収係数）の関係を最適化することが必要である。

さて、こうして形成された複屈折パターンは光学的な機能を発揮できるのであるか。今回の検討で成形品表面に記録した複屈折パターンはもっとも単純な等間隔の縞状パターンであり、かつ加熱レーザー光の波長の都合からパターンの緻密度も十分ではないから、発現するであろう光学的機能も限られるが、特定の偏光面を有する光に対する回折格子としての作用は確認できた。図17は複屈折パターンの記録された射出成形品表面層を切り

出し、それに直線偏光の He-Ne レーザー光を透過させたときの様子である。成形品から表面層を切り出す際の傷などによって明瞭度が限られるものの、この図に見られるように、透過レーザー光の偏光面が特定の方向になったときのみ回折パターンが観察され、干渉レーザー光照射によって記録された複屈折パターンが光学的機能を有することが確認される。

## 6. おわりに

本稿では、プラスチック射出成形品の成形精度・品位と生産性の鍵を握る溶融材料・型キャビティ壁間の熱移動とその制御手法の現状を俯瞰した上で、生産性と成形品品位の向上を両立させ得る新しい伝熱制御手法としてレーザー照射を利用した型内プラスチック材料の温度制御法を紹介した。さらに、型内材料に照射するレーザー光の可干渉を積極的に利用して形状とは独立に成形品に光学的な機能を付与する方法についても述べた。後者は従来プラスチック射出成形品に不可避な欠点の一つととらえられてきた skin 層内の複屈折を逆に利用して新しい機能を発現させようとするもので、プラスチック射出成形品の使途・応用範囲を拡大するブレークスルーにもなり得るものと考えている。

今回はレーザーによる射出成形現象の制御に絞って述べてきたが、プラスチック加工分野を広く見るとレーザーを利用した新しい製造・加工方法の検討はここで紹介したもの以外にもいくつか行われている。例えば、種類の異なるプラスチック材料を混合したポリマーアロイの製造工程で異種材料の混合状態を改善するために、レーザー光の吸収特性が材料ごとに異なることに基づく選択加熱を利用する方法<sup>10)</sup>や、接合物の一方にレーザー光を強く吸収する材料を用い、他方の材料を通してレーザーを照射することで接合界面を直接加熱して両者を溶融接合する方法<sup>11,12)</sup>などが提案・検討されている。このように、プラスチック成形加工とレーザーといった一見繋がりがなさそうな方法・技術の組み合わせによっても(あるいはミスマッチな組み合わせだからこそ)製造技術の新しい方向への発展の「芽」が生まれつつある。本稿がこのこと

に関心を持っていただくきっかけになれば幸いである。

## 参考文献

- [1] 特開平 08-216194 号
- [2] 黒崎晏夫、佐藤 勲、斉藤卓志：赤外ふく射支援による精密射出成形法に関する研究（第1報、炭酸ガスレーザー照射を利用した新射出成形法による樹脂成形品の高品位化）、日本機械学会論文集C編、62-599 (1996) pp. 2864-2871 など
- [3] 特願平 11-367954 号
- [4] 佐藤 勲、斉藤卓志、黒崎晏夫：干渉ふく射照射による高分子射出成形品表面層の複屈折のパターン制御、日本機械学会論文集B編、66-652 (2000) pp. 3180-3188
- [5] 黒崎晏夫、佐藤 勲、石井浩一郎：射出成形機の金型内における溶融プラスチックの流動と固化（溶融プラスチックの流動と固化層の成長状況の観察）、日本機械学会論文集C編、56-552 (1990) pp. 248-255
- [6] Carslaw, H. S. and Jaeger, J. C.: *Conduction of Heat in Solids*, Second Edition, p. 88 (1959) Oxford at the Clarendon Press
- [7] 中村他 5名：金型壁面瞬間加熱技術の開発、成形加工シンポジウム'94、(1994) p.42 など
- [8] Wada, A. 他 4名：U.S. Patent 4439492 など
- [9] 石見他 2名：射出成形用超低圧作動・高機能金型システム(ULPAC)の開発、成形加工シンポジウム'94、(1994) pp. 52-55 など
- [10] 丸岡裕明、佐藤 勲、斉藤卓志：赤外ふく射加熱によるブレンドモルフォロジーの能動制御、成形加工'01、(2001) pp. 281-282
- [11] 長谷川達也他 4名：レーザによる熱可塑性プラスチックのラップ接合、日本機械学会論文集C編、67-661 (2001) pp. 2997-3001
- [12] 宮田祐一郎、佐藤公俊、黒崎晏夫、斉藤卓志：半導体レーザーによる着色熱可塑性樹脂オーバーラップ接合、成形加工'01、(2001) pp. 149-150