

レーザー光の可干渉性を利用したプラスチックの高機能射出成形法の研究

東京工業大学工学部機械知能システム学科
助教授 佐藤 勲
(平成9年度研究開発助成 AF-97008)

キーワード：プラスチック、射出成形、レーザー光

1. 研究の目的と背景

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。射出成形品には、熔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。これを改善するためには、熔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ない。そこで著者らは、型内の熔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。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。

本研究ではこれらの知見をもとに、型内樹脂に投入する熱エネルギー源としてレーザーを用い、その可干渉性を利用して、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る。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。この成形手法は、射出成形に不可避で従来欠点として捉えられてきたskin層の発現を逆に利用して、成形品に新しい機能を付与しようとするものであり、プラスチック成形加工品の適用範囲を飛躍的に拡大するブレークスルーとなる可能性を秘めている。しかし、この成形法を実現するためには、(1)型内樹脂材料に照射するレーザー光の強度分布を所定のパターン状に制御する技術、(2)樹脂内の熱拡散とパターン状加熱の相互作用の解明、(3)パターン状加熱時の樹脂内温度分布と樹脂の流動・分子配向発現の関連の解明な

ど、検討すべき課題が数多く残されている。本研究では、これらの課題を主として伝熱工学的な視点から検討し、新しい射出成形法実現のための足がかりを得ることを目的とする。

2. 実験装置ならびに評価方法

2.1 実験装置

型内樹脂に投入するレーザー光エネルギーの干渉性を利用した射出成形品skin層のパターン状制御の実現可能性を確認し、制御性と効果に対する各種成形条件の影響を検討するために、本研究では実際に干渉したレーザー光を型内樹脂に照射しながら射出成形が行える成形システムを構築して実験を行った。

実験装置は、射出成形機（住友重機械工業（株）ミニマット5/7）、レーザー光透過窓をもった金型（図1）、加熱用レーザー（炭酸ガスレーザー、最大出力32W）、ならびにレーザー光を干渉させるための光学系（図2）からなっている。成形される樹脂材料には非晶性プラスチックとして代表的なポリスチレンを用いた。

型内樹脂にレーザー光を照射するためには、型の一部にレーザーを透過する材料を用いる必要があるが、本研究においては基本的にセレン化亜鉛（ZnSe）を用いた。ZnSeは本研究で用いた炭酸ガスレーザー（波長10.6 μm ）に対して約90%の高い透過率を有する一方、供試樹脂であるポリスチレンは炭酸ガスレーザーをきわめて強く吸

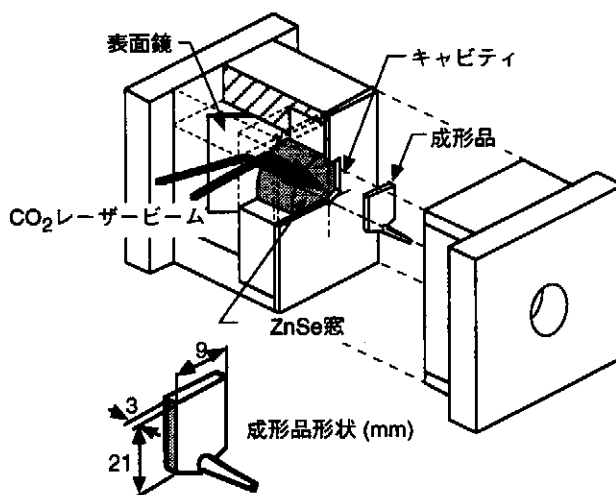


図1 実験用金型

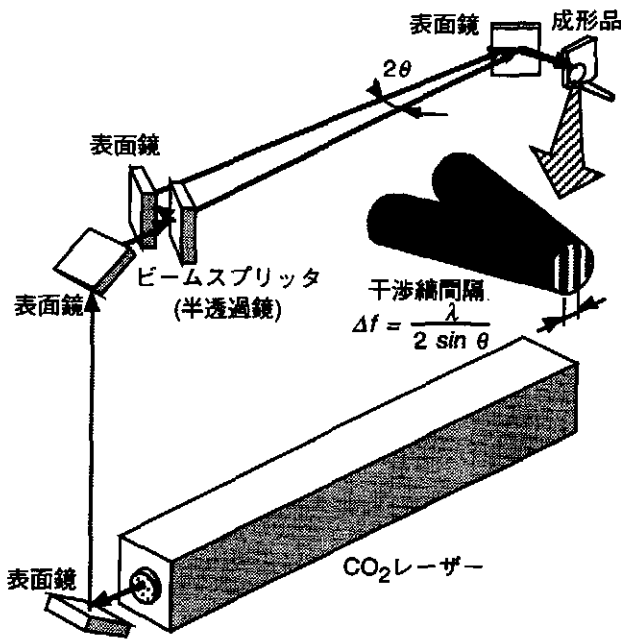


図2 干渉レーザー光学系

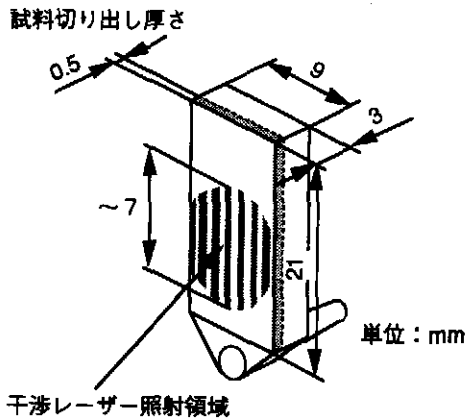


図3 干渉レーザー照射位置

収するため、これらの組合せを用いることによって型温度を上昇させずに成形途上の樹脂表面部の温度のみを制御できる。このとき、照射するレーザー光を図2に示した光学系によってパターン状とすると射出成形品表面のskin層内の分子鎖配向をパターン状に制御できる。本研究ではこのパターン状制御の制御性を検討することを目的としているため、型内樹脂に照射するレーザー光のパターンとして最も単純な平行で等間隔の線状パターンを用い、その間隔を変化させることで制御性に対するパターンの影響を調べた。線状パターン(干渉縞)間隔は、図2の2つのレーザー光の交差角を変化させることで変化させた。レーザーの照射は型内を樹脂が流動している間(約1~3秒)のみ図3中の斜線で示される範囲内に行い、パターンは型内における樹脂の流動方向に平行とした。

2.2 評価方法

干渉したレーザー光の照射によるskin層の発現制御の

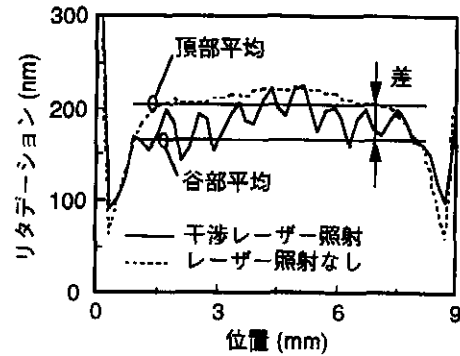
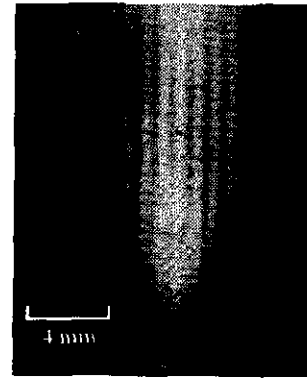


図4 試料内に観察されるリタデーションパターン

効果を評価するために、本研究では高分子の分子配向による光学的異方性、すなわち複屈折分布を計測した。ただし本研究の方法で制御できるのはレーザー照射側の成形品表面近傍のskin層内の分子配向の面内分布であり、他の部分の成形品内にも分子配向・複屈折の厚さ方向の分布が存在するため、複屈折分布の計測には成形品レーザー照射部位からskin層に相当する500 μm厚さの試料を切り出してその中における厚さ方向の総和(リタデーション)を評価した。

図4はレーザー照射部位から切り出された試料の複屈折パターンの一例と、パターンを横切る方向に測定したリタデーション分布の模式図である。試料内のリタデーションを計測すると連続的な波状の分布が得られるが、この波形の頂部が照射干渉レーザー光の暗部に、谷部がレーザー光の明部に対応しており、頂部と谷部の差が図4中の複屈折パターンのコントラストを表している。そこで本研究では試料内のパターンを横切る方向に測定したリタデーション分布の頂部平均値、谷部平均値、ならびにこれらの差をもって射出成形品skin層内分子配向のパターン状制御の制御性を議論した。

3. 実験結果と考察

3.1 skin層内分子配向のパターン状制御可能性と成形条件の影響

まず、干渉レーザー光照射によってskin層内の分子配向分布がどの程度パターン状に制御できるか、あるいはそれが射出成形の成形条件によってどの程度影響される

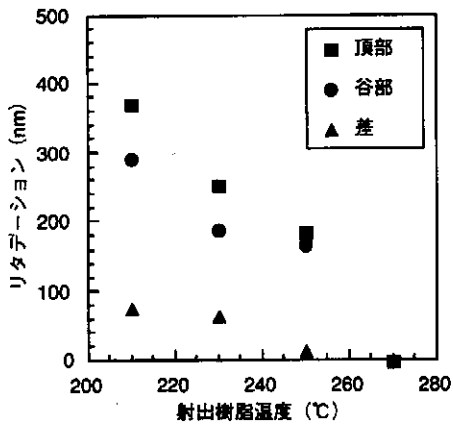


図5 パターン状制御に対する射出樹脂温度の影響

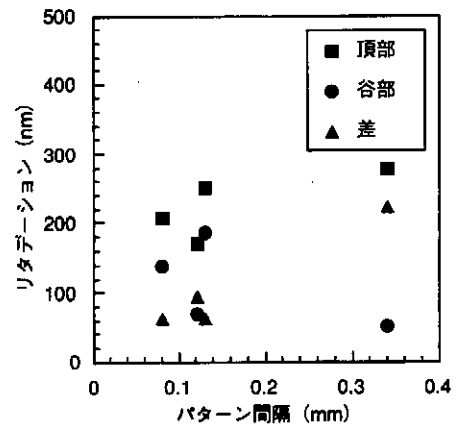


図8 パターン状制御に対するパターン間隔の影響

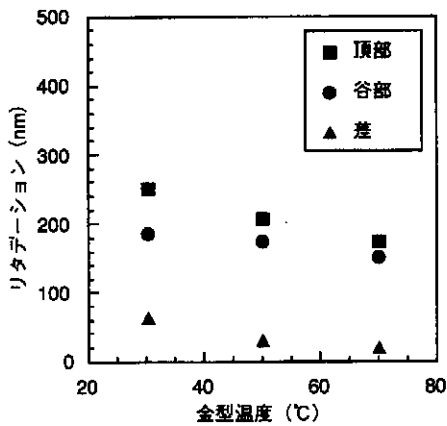


図6 パターン状制御に対する金型温度の影響

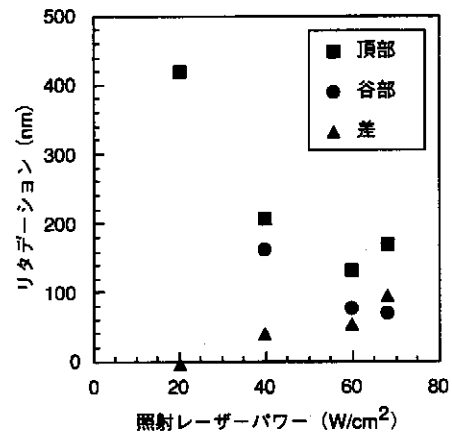


図8 パターン状制御に対する照射レーザーパワーの影響

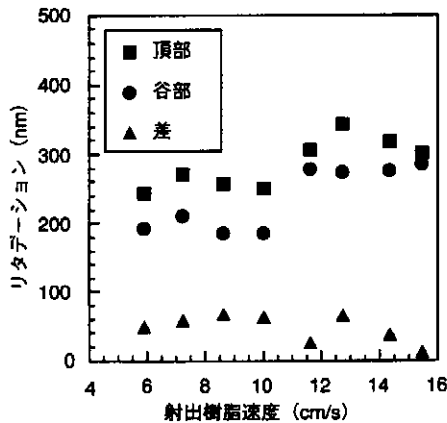


図7 パターン状制御に対する射出樹脂速度の影響

かを実験的に評価した。図5～7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表面に観察されるリタデーションパターンの頂部・谷部平均値とそれらの差を示したものである。これらのグラフに示されているとおり、成形条件によって効果は変化を見せるものの、干渉レーザー光の照射によって射出成形品のskin層の分子配向はパターン状に制御できることがわかる。

パターンのコントラスト、すなわち表面層内のリタデーション分布の差（振幅）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7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が、詳細については次章で検討する。

3.2 skin層内分子配向のパターン状制御の限界

干渉レーザー光を成形途上の型内樹脂に照射することで成形品表面層の分子配向をパターン状に制御できることは確認できたが、当然、パターンの緻密度（パターンの間隔）を小さくするにつれてその制御性は低下するものと考えられる。図8、9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頂部・谷部平均値とそれらの差を示したものである。図8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

まってくる。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状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（リタレーション谷部）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と、樹脂内の熱拡散によって干渉光暗部（リタレーション頂部）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ことが考えられる。これについては次章で詳しく述べる。

4. 干渉レーザー光照射時の射出成形品表面層内の熱移動と温度分布

上述の実験結果から、射出成形品 skin 層内の分子配向を干渉レーザー光照射によってパターン状に制御する際には、樹脂内の熱拡散がその制御性に強く影響することが明らかとなった。そこで、型内を流動する熔融樹脂に干渉レーザー光を照射したときの樹脂と型（窓）内の熱移動を数値的に解析し、成形品表面層内の温度分布を予測して、実際に成形品に形成された分子配向層パターンの特徴と比較してみた。

数値解析は樹脂内での干渉レーザー吸収による発熱と樹脂充填にともなう流動を考慮した3次元非定常の熱伝導解析であり、有限差分法により樹脂ならびに型内の温度分布を求めた。図10にこの解析のためのモデルを、以下に基礎方程式と境界条件を示す。

$$\text{樹脂内: } \rho_p c_p \left(\frac{dT}{dt} + u \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \kappa_p \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + Q_r$$

$$Q_r = \left| -\beta I_0 \left(\cos \left(\frac{\pi x}{W} \right) + 1 \right) \exp(-\beta \delta) \right|, \quad \delta = y - \frac{H_p}{2}$$

$$\text{窓内: } \rho_c c_c \frac{dT}{dt} = \kappa_c \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right)$$

$$\text{金型壁内: } \rho_b c_b \frac{dT}{dt} = \kappa_b \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right)$$

境界条件:

$$T_p = T_{\text{melt}}, \quad 0 \leq x \leq W, \quad -\frac{H_p}{2} \leq y \leq \frac{H_p}{2}, \quad z = 0$$

$$T_b = T_{\text{initial}}, \quad 0 \leq x \leq W, \quad y = \frac{H_p}{2} + H_b, \quad 0 \leq z \leq L$$

$$T_c = T_{\text{initial}}, \quad 0 \leq x \leq W, \quad y = -\frac{H_p}{2} - H_c, \quad 0 \leq z \leq L$$

$$\frac{\partial T_b}{\partial z} = 0 \quad \text{at } 0 \leq x \leq W, \quad \frac{H_p}{2} \leq y \leq \frac{H_p}{2} + H_b, \quad z = 0$$

$$\frac{\partial T_c}{\partial z} = 0 \quad \text{at } 0 \leq x \leq W, \quad -\frac{H_p}{2} - H_c \leq y \leq -\frac{H_p}{2}, \quad z = 0$$

$$T_b = T_p \quad \text{and} \quad \kappa_b \frac{\partial T_b}{\partial y} = \kappa_p \frac{\partial T_p}{\partial y} \quad \text{at } 0 \leq x \leq W, \quad y = \frac{H_p}{2}, \quad 0 \leq z \leq L$$

$$T_p = T_c \quad \text{and} \quad \kappa_p \frac{\partial T_p}{\partial y} = \kappa_c \frac{\partial T_c}{\partial y} \quad \text{at } 0 \leq x \leq W, \quad y = -\frac{H_p}{2}, \quad 0 \leq z \leq L$$

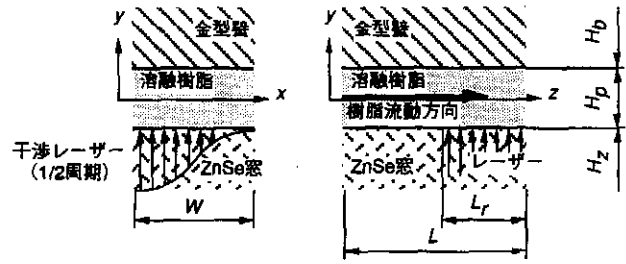


図10 数値解析モデル

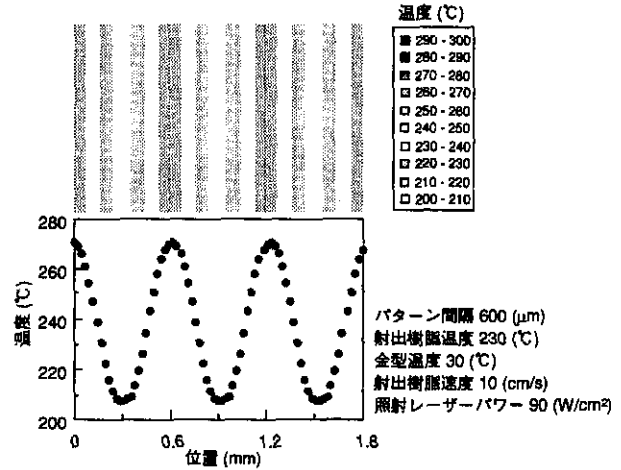


図11 成形品表面層内の温度分布の解析結果の一例

図11はこの数値解析によって求まる成形品表面層内の温度分布の一例である。この図に示されるように、干渉レーザー光照射によって成形途上の樹脂内には干渉パターンに相当した形状の温度分布が形成される。この温度分布の特徴は、干渉によるレーザー強度によってその厚さこそ変化するものの、樹脂・型界面近傍に温度の低い層が存在することにある。これは、レーザー照射による加熱効果とは独立に型が樹脂を常に冷却しているから（だからこそ、成形品の冷却サイクル、すなわち生産性に対する影響が少ない）であるが、これが成形品表層部に残留する分子配向量を決定していると考えられる。そこで、数値解析によって求められる樹脂・型界面近傍の温度低下層の厚さを干渉レーザー光明部・暗部双方において様々な条件下で評価し、実験によって観察された分子配向層パターンの特徴と比較する。

図12～16は数値解析によって求められた樹脂・型界面近傍の低温樹脂層厚さの極大値（干渉レーザー光暗部に対応）と極小値（同明部に対応）ならびにその差を、それぞれ射出樹脂温度、金型温度、射出速度、パターン間隔、照射レーザーパワーに対してプロットしたものである。ここでは低温樹脂層厚さとして便宜上、樹脂温度が180℃以下となった部分の厚さを用いている。これらと図5～9とを比較してわかるとおり、樹脂・型界面近傍の低温樹脂層厚さの成形条件、レーザー照射条件による変化は、成形品表面層に形成される分子配向層のバ

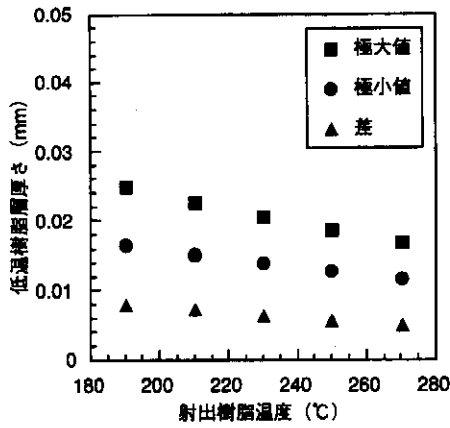


図 12 低温樹脂層厚さに対する射出樹脂温度の影響

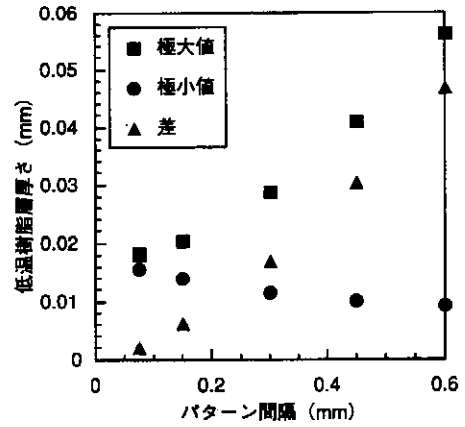


図 15 低温樹脂層厚さに対するパターン間隔の影響

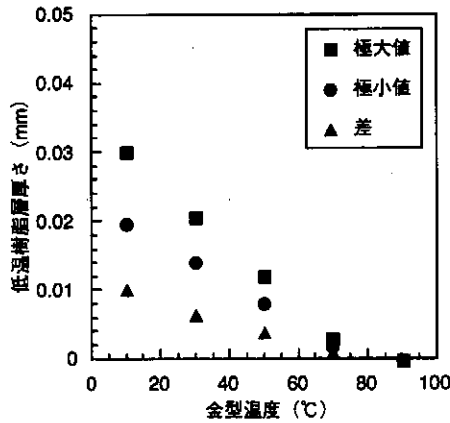


図 13 低温樹脂層厚さに対する金型温度の影響

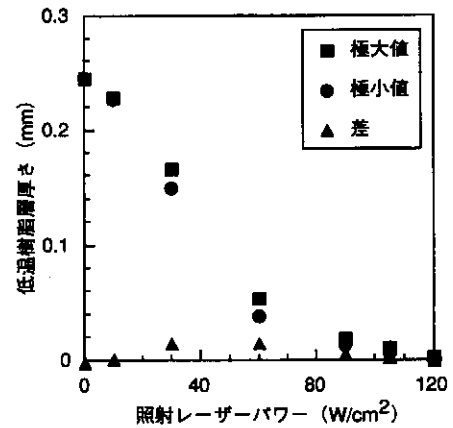


図 16 低温樹脂層厚さに対する照射レーザーパワーの影響

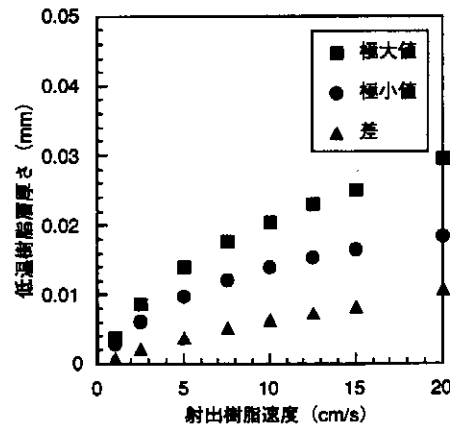


図 14 低温樹脂層厚さに対する射出樹脂速度の影響

ターンの変化ときわめて良い対応を示している。また、照射レーザーパワーに対するskin層内の分子配向パターンのコントラストは、レーザーパワーの増大にもなっていったんは増加するが、実験範囲を超えてさらに照射レーザーを強くするとコントラストは逆に低下していく傾向が見られる。これは、図 16 にも示されているように、レーザーパワーの増大にもなってリタデーション谷部（照射レーザーの明部）の分子配向が低下するのみならず、樹脂内の熱拡散によってリタデーション頂部においても分子配向が低下するようになるためである。す

なわち、成形品に形成される分子配向パターンのコントラストを強めるためには、パターンの緻密度に適合した最適なレーザー照射パワーが存在すると言える。これらのことから、干渉レーザー照射によって形成される射出成形品skin層内の分子配向パターンの制御性は成形途上の樹脂と型との界面近傍の低温層の発現が支配していると言える。

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熔融樹脂の流動速度、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 7 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、充填途上に熔融樹脂表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。

5. 結 論

成形途上の型内樹脂に干渉レーザー光を照射することでプラスチック射出成形品の skin 層内の分子配向をパターン状に制御し、成形品の形状とは独立した新たな機能を成形品に付与する技術を提案し、その実現可能性と制御性に対する成形条件の影響を伝熱工学的視点から検討した。その結果、この方法によって skin 層内の分子配向を効果的にパターン状制御するための指針が得られた。射出成形品 skin 層内に付加された分子配向のパターンは成形品表面に複屈折の規則的変化を生むため、特定の偏光方向をもった光に対して回折格子として作用する。実際に著者らが製作した試料を可視レーザー光にかざすと、偏光方向によって回折パターンが見られ、このような機能が成形品に付与できたことが確認されている。

この手法をさらに進化させるためには、型内樹脂に照射する干渉レーザーパターンをより微細にしたときの現象や、照射レーザーによる加熱効果と溶融樹脂の流動による熱輸送との重畳などの現象面の解明はもとより、パワーの大きなレーザー光を所定のパターンにするためのパワーホログラフィ技術の確立や、樹脂の吸収特性に合致したレーザー波長の選定など、解決すべき課題が残されている。しかし本研究によって射出成形品表面層に新たな機能を付与する原理は確立できたと言え、今後はより現実に近い条件での技術的検討がなされることが望まれる。

参考文献

- [1] 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