

# 半導体レーザー加熱支援による射出成形樹脂の流動性向上

佐藤 公俊\*・中西 助次\*・宇都宮浩司\*\*

(平成16年9月8日受理)

## Improvement of Fluidity of Plastic Material in Injection Molding Assisted by Diode Laser

Kimitoshi SATO, Suketsugu NAKANISHI and Koji UTSUNOMIYA

(Received Sep. 8, 2004)

### Abstract

The excessive cooling in the filling stage of injection molding stops flow of polymer melt and gives insufficient filling of material in to the mold. In order to enhance the fluidity of the material, it is desirable to prevent the decrease in the temperature of molten polymer. One solution is radiative heating of molten polymer by lasers passing through the mold wall. The authors adopted a diode laser, which allows comprehensively inexpensive equipments of light source. In this study, an experimental test of molding of disk with laser irradiation was performed and a numerical simulation for analyzing the temperature profiles within the flow of polymer melt was also investigated. The results show that the fluidity of polymer melt by laser heating is improved and it is especially effective at high injection rate.

**Key Words:** thermoplastics, injection molding, diode laser, infrared-transparent window, fluidity

### 1. はじめに

樹脂の射出成形では、高温の熔融樹脂が金型内を流動しながら低温の金型壁で冷却されるため、熔融樹脂が型内を流動している際に、低温型壁に接する部分にスキン層と称する樹脂の温度が低下して、非常に高い粘度の層が形成される。このスキン層の形成が、充填不良やウェルドラインの形成に結びつくため、その対策が必要とされている。

金型内で樹脂成形品表面に形成されるスキン層の抑制には、加熱器などにより金型温度を上昇させる方法<sup>1,2)</sup>や断熱金型を採用する技術<sup>3)</sup>がこれまでも提案されている。しかし、金型の膨張・収縮の問題、さらに加熱・冷却の繰り返しのため生産性の大幅な低下で、実際上の技術としては利用度が低く、技術的發展性が見いだせなかった。

この改善策として、射出成形中に金型内の樹脂に赤外線

照射することにより、熔融流動樹脂温度を上昇させ、樹脂と金型壁の熱移動を制御し、樹脂の流動性を向上することが可能であることが提案されている<sup>4),5)</sup>。これまで、炭酸ガスレーザーを光源に適用し流動性や転写性が向上することが確認されているが、炭酸ガスレーザーを透過できる窓材料のコスト高により実用性の面で問題があった。

本研究では低価格かつ取扱いに容易な半導体レーザーを光源に用い、射出成形への適用について、流動性向上を目的として、成形実験ならびにレーザー照射時の金型内の熱解析により、妥当性を検討した。

### 2. レーザー加熱支援射出成形

提案するレーザー加熱支援射出成形法の原理は、図1に示すように金型の一部をレーザー透過材料に置き換えて、熔融樹脂が金型内に射出され流動し充填される短い時間に

\* 広島工業大学工学部機械システム工学科

\*\* 広島工業大学工学部知能機械工学科

外部光源からレーザーを樹脂に照射する方法である。無添加の樹脂には波長 1000nm 以下の近赤外線レーザー光の吸収性がほとんどないが、着色添加された樹脂は、赤外領域において一般的に大きな吸収帯を有するので樹脂の表面の極めて薄い層でふく射エネルギーを効率よく吸収し発熱する。これにより、熔融樹脂から金型への熱損失が補われ、樹脂温度の低下が低減され流動性が保持される。この際、型部分では物理的発熱がなく低温保持が可能であり、樹脂充填後は速やかな冷却が期待できる。

### 3. 実験装置および方法

実験において、型締力35トンの射出成形機（日本製鋼所, J35EL II）を使用した。この成形機の可動盤にレーザー透過窓を組み込んだ金型を取り付けている。金型の外部に設置した半導体レーザー光源（波長 808nm, Jenoptik, JOLD-20-CPXF-1L）より光ファイバーを用いて集光レンズに導光し、上記金型内にこのレンズを保持してキャビティにレーザー光を照射できるように設定した（図2）。

本実験で用いた成形樹脂材料はポリプロピレン（PP）である。供試形態としての材料マスターバッチには灰色の色素添加がなされており、その光学特性は表1に示すとおりである。

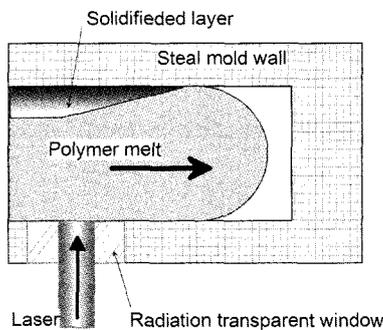


Fig.1 Concept of an injection molding process assisted by diode-laser radiation

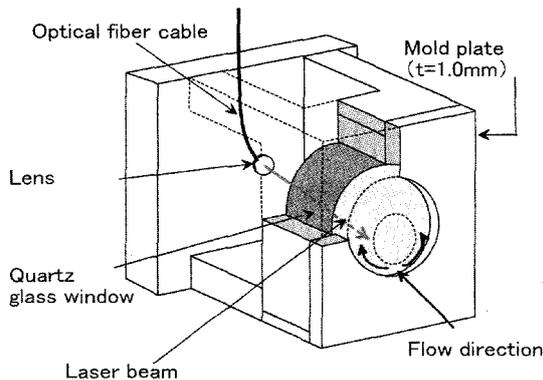


Fig.2 Details of experimental mold

今回の検討においては樹脂流動性を主対象にしているが、ウェルドライン対策についても同時に検討を行うものであるため、成形品形状はリング状円盤（外径φ 48, t=1.0）となっている。成形品の外形および寸法を図3に示す。

本報告における成形条件としては、レーザー加熱の流動性への効果を検討するため、フル充填の約80~90%のショートショット形状になる設定とした。表2にこの場合の成形条件を示す。

レーザー照射の効果についての検討として、今回は照射位置の影響を調べた。照射した位置は、上述の図3に示すように①ゲート部②流路片側中間部③流動末端（内側）・④流動末端（外側）である。レーザービームの寸法は直径4mmで、強さは27W、照射タイミングについては、充填開始から3秒間とした。

Table 1 Optical properties of tested material

material	color	absorbance [%] (t=0.5mm)	radiation coefficient [m <sup>-1</sup> ]
polypropylene	gray	88.9	4400

Table 2 Molding condition in experiment

injection pressure	19.6 MPa
injection rate	188 mm/s
mold temperature (radiation side)	30°C
mold temperature (injection side)	40°C
temperature of polymer melt at a nozzle	215°C

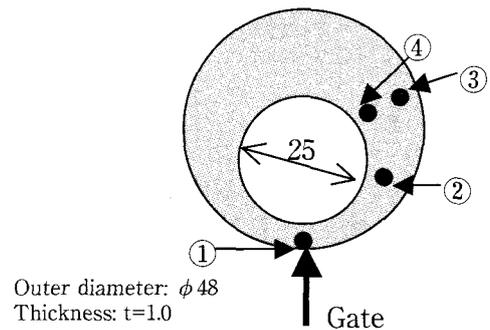


Fig.3 Shape and size of molded article and positions of laser irradiation

### 4. 成形実験

レーザー照射の条件を上述のとおりに変化させ、それぞれにつき10ショットづつ成形し、レーザー照射の効果について形状の比較を行った。図4にレーザー照射なしの場合について、図5(a)~(d)にそれぞれレーザー照射位置①~④の成形品の側面形状を示す。図5(a)~(d)中の丸印で示す箇

所が実際にレーザーが照射された部分である。レーザー照射ありの場合にはなしのものに比べて形状が拡大しており、特に流動末端に近い照射位置の条件では、照射位置近傍での伸びが顕著である。

また、本研究における成形品では流動が分岐するのであるが、レーザー照射を受けた位置の先へ流動が伸びており、流動性向上を発現する箇所を容易に選択的に制御できることを示した。これに対し高温物体や低熱伝導材を設置する方式では自在に対処できないことを付記しておく。

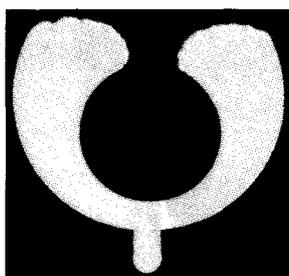


Fig.4 Flow behavior of a conventional molding without laser irradiation

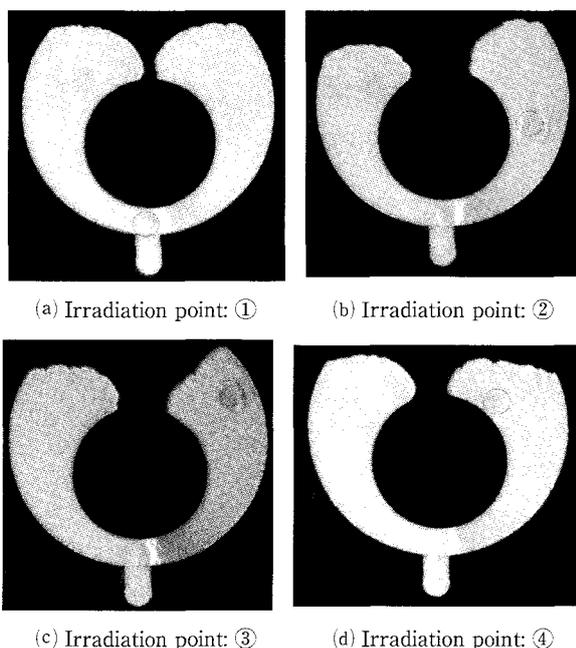


Fig.5 Flow behavior of the molding with laser irradiation

レーザー照射位置の効果を定量化するべく、前掲の成形品側面の面積を計測して比較を行った。図6にその結果を示す。各条件ともショット間にばらつきがみられ、これは金型温度に影響されているものと思われるが、平均をプロットすると照射位置がゲートに近づくにつれ面積が拡大する傾向にあった。この点は局所の流量と照射エネルギー量との関係で一概には言えないものの、下流側で速度の低い状態はすなわち、その位置でのレーザー照射スポットを通

過する単位時間あたりの流量が低下するので、レーザー加熱を受ける堆積が小さく、流動長が短くなるものと思われる。結果として、「再加熱」よりも「冷やさずに初速をなるべく保持する」効果の方が流動性向上への寄与が大きいものと推察される。

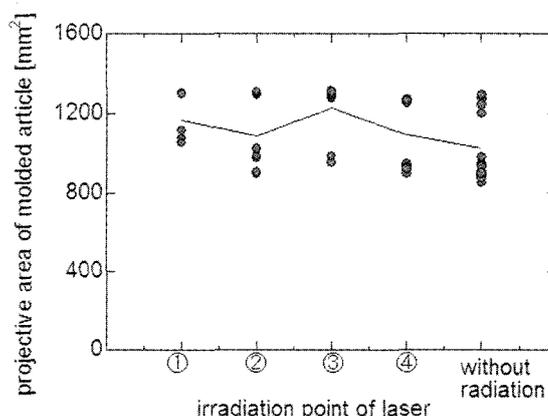


Fig.6 Relationship between projective area of molded article and position of laser irradiation

## 5. 数値解析

射出成形において、樹脂の粘性が温度に大きく依存しているため、流路中における温度を知ることが、樹脂の流れの理解のために重要となる。そこで実験系に対して図7に示すように流れ方向とキャビティ厚さ方向の2次元流動モデルを仮定し、そこでの非定常熱移動を計算した。図に示すように流れ方向に  $x$  軸、垂直方向に  $y$  軸と座標をとった。

計算モデルを構成する要素としては、それぞれ長さ  $L=80\text{mm}$  [および肉厚  $H=1\text{mm}$  である、スチール製金型、石英ガラス型およびポリプロピレン樹脂が平行に積層されているものとしている。計算に用いた樹脂と金型構成材の物性値を表3に示す。

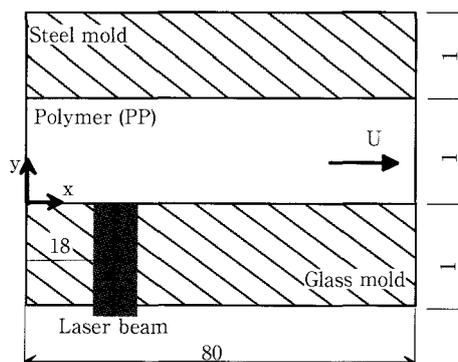


Fig.7 A model of numerical simulation for flow of molten polymer assisted by the laser irradiation

Table 3 Thermal properties of used plastic and molds

	Polypropylene	Steel	Crystal Glass
$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	850	7860	2190
$c$ [J/kgK]	2100	473	860
$\kappa$ [mm <sup>2</sup> /s]	0.11	13.9	0.80
$A$	10.8	-	-
$T_r$	150	-	-
$\eta_r$	15000	-	-

本計算において、樹脂及び金型の熱伝導率、比熱、密度の温度・圧力依存性は無視した。また、簡単のため樹脂はニュートン流体と仮定し、その粘度  $\eta$  はその温度依存のみを考慮して、次式で示す温度の関数として取り扱った。

$$\eta = \eta_0 \exp\left(-A \frac{T_r - T}{T_r}\right) \quad (1)$$

ここで、 $\eta_r$ ,  $A$  および  $T_r$  はそれぞれ参照粘度、アレニウス定数および参照温度を表す。流動樹脂の流れおよび熱移動に関する支配方程式を以下に述べる。

・流れ

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \rho_p \left( \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) \\ = -\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \eta \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \eta \frac{\partial u}{\partial y} \right) \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \rho_p \left( \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) \\ = -\frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \eta \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \eta \frac{\partial v}{\partial y} \right) \end{aligned} \quad (4)$$

ここで、 $\rho_p$  : 樹脂の密度、 $u$  :  $x$  方向の速度、 $v$  :  $y$  方向の速度、 $t$  : 時間、 $P$  : 圧力である。

・熱移動

$$\begin{aligned} \rho_p c_p \left( \frac{\partial T_p}{\partial t} + u \frac{\partial T_p}{\partial x} + v \frac{\partial T_p}{\partial y} \right) \\ = \kappa_p \left( \frac{\partial^2 T_p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_p}{\partial y^2} \right) + Q_r + \eta \Phi \end{aligned} \quad (5)$$

ここで、 $c_p$  : 樹脂の密度、 $T_p$  : 樹脂の温度、 $\kappa_p$  : 樹脂の熱拡散率であり、 $Q_r$  はふく射加熱による発熱を示す項、 $\Phi$  は粘性散逸による発熱を示す項である。

$$Q_r = \left| \frac{dI}{dy} \right| = \left| -\beta I_0 \exp(-\beta \delta) \right| \quad (6)$$

$$\Phi = 2 \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right] + \left( \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 \quad (7)$$

ただし

$$I = I_0 \exp(-\beta \delta), \quad \delta = y + \frac{H_p}{2}$$

であり、 $I_0$ ,  $\beta$  はそれぞれ、投入するふく射強度および吸収係数である。

同様に、金型における熱移動についての支配方程式についても以下に記す。

$$\rho_s c_s \frac{\partial T_s}{\partial t} = \kappa_b \left( \frac{\partial^2 T_s}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_s}{\partial y^2} \right) \quad (8)$$

$$\rho_g c_g \frac{\partial T_g}{\partial t} = \kappa_g \left( \frac{\partial^2 T_g}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_g}{\partial y^2} \right) \quad (9)$$

ここで、 $\rho$  : 密度、 $c$  : 比熱、 $T$  : 温度、 $\kappa$  : 熱拡散率であり、添字についてはそれぞれ、 $s$  : スチール、 $g$  : ガラスを示す。

次に、計算モデルに対しての境界条件を以下に示す。

・樹脂流動入口部の境界条件

$$T_p = T_m, \quad u = \text{given}, \quad v = 0$$

・金型上下端部の境界条件

$$T_s = T_g = T_w$$

・金型出入口部の境界条件

$$\frac{\partial T_s}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial T_g}{\partial x} = 0$$

・樹脂-金型の境界条件

スチール側

$$\kappa_s \frac{\partial T_s}{\partial x} = \kappa_p \frac{\partial T_p}{\partial x}, \quad T_s = T_p, \quad u = v = 0$$

ガラス側

$$\kappa_p \frac{\partial T_p}{\partial x} = \kappa_g \frac{\partial T_g}{\partial x}, \quad T_p = T_g, \quad u = v = 0$$

上記の熱・流動方程式をコントロールボリューム法に基づく有限差分により解析した。差分近似における格子分割は離散化に伴う誤差が十分小さくなるよう考慮し、表4に示す分割数にて行った。初期状態において、樹脂はポアゼイユ流でキャビティ内に存在し、樹脂温度一定かつ金型の境界面は金型温度となる状態から計算を開始することとした。計算にあたっては、実験で用いた成形条件を基準に、

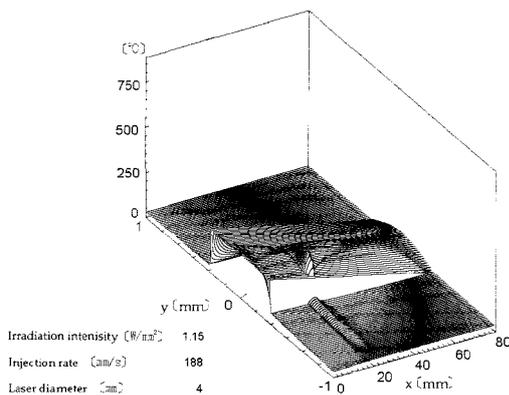
レーザー照射強度，レーザー照射範囲および射出速度を変化させ，それぞれが温度分布に与える影響を検討した。

まず，射出速度  $U_0=188$  [W/mm<sup>2</sup>]，レーザービーム径  $d=4$  [mm] に固定し，レーザー照射強度を変化させた場合の温度分布を求めた。図 8(a)は  $I_0=1.15$  [W/mm<sup>2</sup>]，図 8(b)は  $I_0=2.15$  [W/mm<sup>2</sup>] そして図 8(c)は  $I_0=5.15$  [W/mm<sup>2</sup>] の場合の結果である。 $I_0=2.15$  [W/mm<sup>2</sup>] を基準にすると，より小さい照射強度  $I_0=1.15$  [W/mm<sup>2</sup>] の条件では照射スポット近傍でも温度上昇がかなり小さく，その後流への影響もごく僅かであった。逆に  $I_0=5.15$  [W/mm<sup>2</sup>] の条件では，照射スポットでの温度上昇は著しく流れの中心付近の温度は下流に進むまで高く保たれる。ただし，壁面付近ではビームスポット位置をはずれると，急激に温度低下が始まり，型への熱移動が激しいことを意味している。

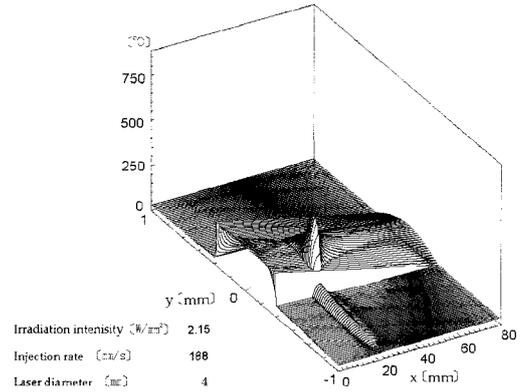
続いて，射出速度  $U_0=188$  [W/mm<sup>2</sup>]，レーザー照射強度を  $I_0=2.15$  [W/mm<sup>2</sup>] に固定し，照射レーザービーム径を 2 倍にして計算を行った。図 9 にビーム径  $d=8$  [mm] の場合の結果を示す。 $d=4$  [mm] の場合については図 8(b)に示されている。ここでの計算条件としては，レーザー照射強度は固定しているので，ビーム径が大きい場合は比例して樹脂への流入エネルギー量が多くなる。よって  $d=8$  [mm] の場合では下流まで高温領域が保たれる割合が多い。実際の応用上，高強度を保ってビーム照射面積を大きくすることは，設備面の増強で対応することになりその分投資を要するが，幸い，今回検討している半導体レーザーは高出力化と低価格化が同時に進んでおり，この面では期待が持てる状況にある。

Table 4 Size of control volumes

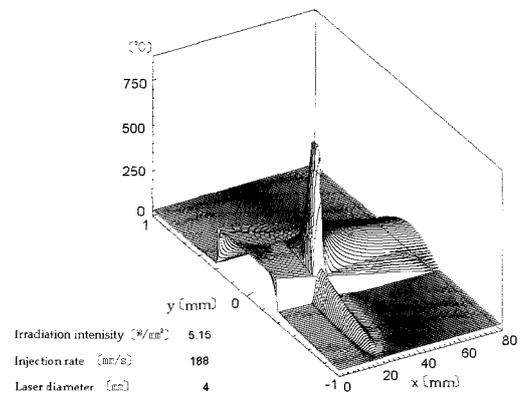
	x direction	y direction
Steel mold	0.25mm/div.	0.025mm/div.
Polymer melt	0.25mm/div.	0.025mm/div.
Glass mold	0.25mm/div.	0.025mm/div.



(a) irradiation intensity,  $I_0=1.15$ W/mm<sup>2</sup>



(b) irradiation intensity,  $I_0=2.15$ W/mm<sup>2</sup>



(c) irradiation intensity,  $I_0=5.15$ W/mm<sup>2</sup>

Fig.8 Influence of irradiation intensity on temperature profile within the flow of polymer melt

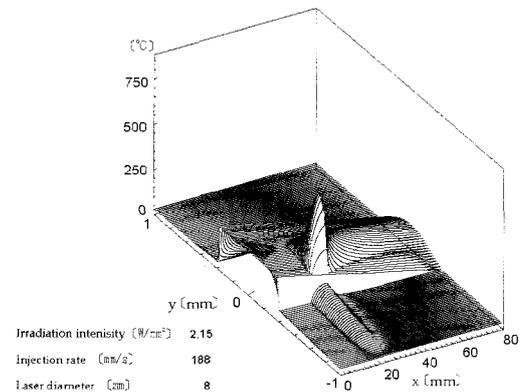


Fig.9 Influence of irradiation area on temperature profile within the flow of polymer melt (laser diameter,  $d=8$ mm)

次に，レーザービーム径  $d=4$  [mm]，レーザー照射強度  $I_0=2.15$  [W/mm<sup>2</sup>] を固定し，射出速度を変化させた場合の温度分布を求めた。図10にその結果を示す。条件としては，それぞれ(a)  $U_0=18.8$  [mm/s]，(b)  $U_0=588$  [mm/s] である。

低速度条件では，樹脂内の単位要素が照射を受ける正味時間が長くなる分，照射スポットでの温度上昇は著しいが，流れが遅いため照射スポットを過ぎた後については，金型

と接する時間も長くなり、それだけ温度低下も大きくレーザーによる加熱の効果はそこではほとんど見られない。つまり単位時間・単位面積あたりの熱バランスでみると、流動する樹脂から金型へ移動する熱量に比べて、高強度のレーザーふく射による加熱の方が相当大きいので、より高速の射出条件では有効に働く傾向にあるといえる。

この傾向をもっともよく表す例として、 $I_0 = 5.15$  [ $W/mm^2$ ],  $d = 8$  [ $mm$ ],  $U_0 = 588$  [ $W/mm^2$ ] の条件での温度分布を図11に示す。流速が上がりレーザー照射時間は少ないといえどもレーザー照射による発熱効率は極めて高いので、樹脂の温度上昇は一瞬で流入時の温度を上回る。一方、金型への熱の伝導速度はレーザー加熱によるエネルギー流入速度に比べて遅いので、両者の差し引きにより高温を保って樹脂は下流へ流れることができることを示した。

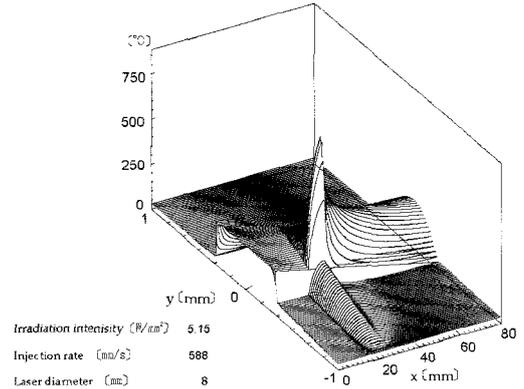


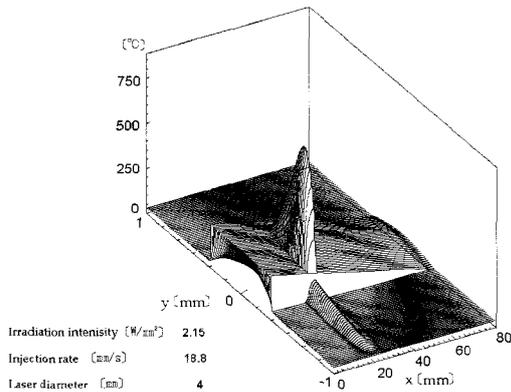
Fig.11 Influence of injection rate on temperature profile within the flow of polymer melt ; irradiation intensity,  $I_0 = 5.15 W/mm^2$ , laser diameter,  $d = 8 mm$ , injection rate,  $U_0 = 588 W/mm^2$

## 6. 結 言

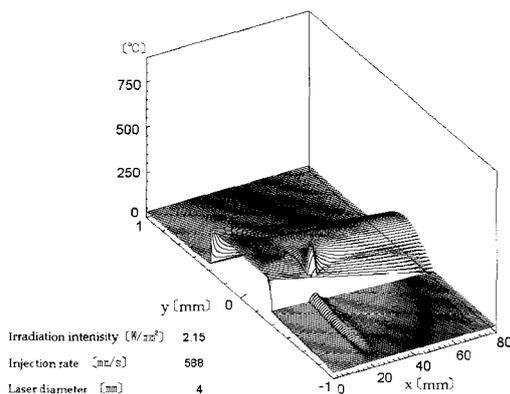
本報告では、射出成形への適用について、流動性向上をターゲットに成形実験ならびにレーザー照射時の金型内の熱解析により、妥当性を検討した。実機を用いての成形実験において、半導体レーザー照射加熱により樹脂の流動が促進され、その効果を発現する箇所を選択的に制御できることを示した。また今回の結果からは、成形実験においてゲート部への照射の効果が流動性に対して最も寄与することとなったが、解析による熱流動計算の結果からもある程度の流速を維持している場所での加熱が有効であることが確認された。

## 文 献

- 1) K. M. B. Jensen and A. A. M. Flaman: *Polymer Engineering and Science*, 34-11, pp894-897 (1994).
- 2) K. M. B. Jensen and A. A. M. Flaman: *Polymer Engineering and Science*, 34-11, pp898-904 (1994).
- 3) J. L. Ming, and P. S. Nam: *Polymer Engineering and Science*, 29-7, pp441-447 (1989).
- 4) 黒崎, 佐藤, 斎藤: 機論(C), 62-599, pp2894-2871 (1996).
- 5) 斎藤, 黒崎, 佐藤: 機論(B), 63-613, pp3114-3122 (1997).



(a) injection rate,  $U_0 = 18.8 W/mm^2$



(b) injection rate,  $U_0 = 588 W/mm^2$

Fig.10 Influence of injection rate on temperature profile within the flow of polymer melt