セラミックヒーターを用いたポリスチレン 射出成形品のウェルドライン加熱消去

泊 清隆*・原田敏彦*・前川善一郎**・濱田泰以**

Elimination of Weldlines in Polystyrene Injection Moldings Using a Ceramic Heater

Kiyotaka TOMARI*, Toshihiko HARADA*
Zenichiro MAEKAWA**, Hiroyuki HAMADA**

Polystyrene injection moldings can easily exhibit weldlines which appear as cracks on the surface and which often result in serious problems. These cracks develop as a V-notch caused by entrapping air or contaminants at the merging flow fronts. The V-notch not only reduces appearance quality but also mechanical properties, especially for brittle materials such as polystyrene. The V-notch depth was measured to be several microns using surface roughness tester. In our previous study, the weldline area which influences mechanical properties was found to be several hundred microns deep, including the surface V-notch. Preheating of a mold with halogen light or a high frequency inductor can eliminate the weldline efficiently. These methods, however, reduce the safety for work and require long cooling times.

An alternate method for weldline elimination was discussed in the present study, in which a ceramic heater fixed directly on the cavity at the weldline region was heated instantaneously during the injection process. Using this approach, the effects of heating on the appearance and the mechanical properties of polystyrene injection molding with weldlines were clarified.

Key words : Weldline/Polystyrene/Injection molding/Appearance quality/Ceramic heater

1. 緒 言

家電品などに用いられるポリスチレンは、射出成形品中に生じるウェルドラインが明確に表面に現れやす

い材料の一つである。ウェルドラインが割れと同様の外観を呈するためにしばしば問題となる。これは熔融樹脂合流時に金型表面において空気や不純物を巻き込むことによって形成されるV溝が原因である¹⁾。このV溝は外観品質の低下をもたらすとともに、とくにポリスチレンなどのぜい性材料では応力集中による強度低下の原因となる。黒田らは、表面に生じるウェルドラインの段差量を表面粗さ計で評価した結果、数 μm の深さであると報告している²⁾。また、筆者らのこれまでの研究によると、表面のV溝を含む深さ数100 μm までのウェルドライン領域が成形品強度に影響を及ぼすとの知見も得ている³⁾。

* 大阪市立工業研究所 プラスチック課
大阪市城東区森之宮 1-6-50 (〒536)
Osaka Municipal Technical Research Institute,
1-6-5, 0Morinomiya, Joto-ku, Osaka 536 Japan

** 京都工芸繊維大学 繊維学部
京都市左京区松ヶ崎御所海道町 (〒606)
Kyoto Institute of Technology
Matsugasaki, Sakyo-ku, Kyoto 606 Japan
1992.3.16 受理

このようなウェルドラインを消去する方法としては、樹脂温度や金型温度を通常よりも高めに設定することなどが推奨されている⁴⁾。また、ハロゲンランプや高周波などを用いて成形直前にキャビティを外部から予熱する方法も発表されている^{5),6)}。しかし、これらの方法には、作業の安全性や成形サイクルなどの点でなお問題が残っており、また、改善効果の定量的な評価もこれまであまり行われていない⁷⁾。

そこで本研究では、金型キャビティに直接固定したセラミックヒーターを用いて、射出成形中に会合樹脂を瞬間加熱することによりウェルドラインを消去する方法について検討した。この方法には、ウェルドラインの発生位置を正確に決定してから金型製作をしなければならない点や複雑な製品に関しては金型製作費が高くなる点などの短所がある。しかし、金型全体ではなく小型ヒーターのみを瞬時に加熱する方法であるため昇温や降温速度が高く、成形サイクルへの影響が少ない利点を持つ。また、特別な外部装置を必要としない、ハロゲンランプなどが作業環境に与える危険性が少ない、などの長所も持っており、ウェルドラインの効果的な消去方法の一つであると考えられる。本報では、ヒーター電圧を変化させた時の外観品質や機械的強度の変化を測定した。

2. 実験方法

2.1 成形材料

実験に供した成形材料は、汎用のポリスチレン（ダイアレックス HF-77、三菱化成ポリテック社製）である。メルトインデックスは 7.5 g/10 min である（JIS K 7200, 200°C, 荷重 5 kgf）。

2.2 金型およびセラミックヒーター

用いた金型は、Fig. 1 に示すような長方形平板の金型（長さ 200 mm × 幅 100 mm × 厚さ 3 mm）である。2 点ゲートなので平板中央部で熔融樹脂が会合しウェルドラインが発生する。

斜線で示す部分にセラミックヒーター（京セラ社製）を取り付けた。これは、シリコンカーバイドなどのセラミックを発熱体とするヒーターとは異なり、アルミナを絶縁層として持つ金属発熱体ヒーターである。ヒーターの概略図を Fig. 2 に示す。アルミナシートに金属抵抗体を印刷して、その上にアルミナ絶縁保護層を塗布して高温で一体焼結したものである。ヒーターの全長は 60 mm で、このうち発熱部の長さは 27 mm である。接着剤（アラルダイト LW 561、長瀬チバ製）を用いてキャビティ面に直接加工した溝にヒーターを接着、固定した。

Fig. 1 Injection molded plaque with a weldline at the center

PS : Pressure sensor, TC : Thermocouple.

2.3 射出成形

主な射出成形条件を Table 1 に示す。射出圧力 (P_i) は、金型温度が最も低い 30°C の時に熔融樹脂が金型内に充てんされる必要充分な圧力、つまり最小充填圧力を基準とした。シリンダー温度 (T_c) が 200°C の時は $P_i = 125.7$ MPa, 220°C の時は $P_i = 99.4$ MPa であった。

ヒーターに直結したスライダックを用いてヒーター電圧を調節した。Fig. 3 はヒーター電圧とヒーター温度および金型内圧の時間変化曲線を示している。セラミックヒーターへ通電を開始して一定電圧を加えると（点A）、温度が上昇しはじめる。温度がほぼ定常に達したところで射出する（点B）。射出された樹脂が会合して、ウェルドラインを形成すると同時に樹脂圧力はピークに達する（点C）。この時点でヒーター電圧を 0 V に下げる。キャビティ内のヒーター部温度は溶

Fig. 2 Schematic drawing of ceramic heater

Table 1 Molding condition

Cylinder Temperature (°C)	200		220
Mold Temperature (°C)	30, 40, 50, 60, 70, 80	30, 40, 80	40
Injection Pressure (MPa)	125.7	131.7, 134.0	99.4
Injection Time (s)	6	5	5
Cooling Time (s)	15	25	25
Ceramic Heater Voltage (V)	0, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40	0, 20, 40, 60, 80, 100

Fig. 3 Heating procedure during injection process ; the upper line indicates cavity pressure and the lower line indicates heater temperature ; point A=Heater on, B=Injection starts, C=Heater off, D=Injection stops

Fig. 5 Relationship between surface temperature of heater and heater voltage at the steady state

Fig. 4

Tensile test specimen cut from injection molding ; the weldline remained at the unheated surface was removed using a milling machine

融樹脂の熱により瞬間上昇するもののヒーター電圧が 0 V のため徐々に低下する。ヒーター温度が低下し始めた時点で射出を終了する（点 D）。

2.4 SEM 観察と強度試験

射出成形平板におけるウェルドラインの改善度合を評価するために、電子顕微鏡（SEM）を用いてその幅を測定した。

また、強度を評価するために、平板のウェルド部から Fig. 4 に示す短冊形状の試験片を切り出した。加熱側と非加熱側から各 3 本の試験片を作製し、引張試験を行った。ヒーターはキャビティの片側側面のみ設置されているので、もう一方の側面に残存する V 溝の影響を除去するためにフライス盤を用いて約 0.5 mm の深さで半円状に切削した。引張試験はインストロン引張試験機を用いた。測定条件を以下に示す。

つかみ具間距離 115 mm、引張速度 2 mm/min、試験温度 23°C、湿度 50% RH。

3. 結果と考察

3.1 ヒーター電圧との表面温度

本実験では、セラミックヒーターに一定電圧を加え

表面温度が定常状態になった時点で樹脂を射出した。ヒーター表面温度は金型との接着面に取り付けた熱電対で計測した (Fig. 1 中の TC 点)。しかし、この位置では金型への放熱量が多いため正確な値が得られない。したがって、熱電対の出力とは別にヒーター電圧とヒーター表面温度の関係を較正しなければならない。得られた補正線図を Fig. 5 に示す。これは、各金型温度においてヒーターに一定電圧を加えた時のヒーター部温度を表面温度計で実測して得たものである。実際の成形と同様にヒーターを金型に取り付けた状態で測定を行っているため、金型への放熱の影響が考慮され、発熱量と放熱量がバランスした条件下での表面温度が計測されている。金型温度の上昇にともない、直線的に表面温度も上昇している。この温度は、樹脂が流動する直前のヒーター温度に相当する。

3.2 金型温度とウェルドライン幅

金型温度とウェルドライン幅の関係を Fig. 6 に示す。金型温度を 30~80℃ の間で変化させた時のウェルドライン幅の変化を示している。●は加熱部 (セラミックヒーターの中央位置)、○は非加熱部 (ヒーターから 4 mm 離れた位置) の測定結果である。非加熱部では、金型温度 30℃ ではウェルドライン幅は約 17 μm だが、金型温度が上がるにしたがって急激に減少した。金型温度を高めるだけでもウェルドライン消去に効果があることがわかる。加熱部でも同様に金型温度の効果がみられたが、非加熱部と比べると約 5 μm 小さいウェルドライン幅となった。これは、素材の伝熱特性の違いによるものと考えられる。セラミッ

Fig. 6 Influence of mold temperature on weldline width; ●: unheated area, ○: heated area

クヒーターの主成分であるアルミナの熱伝導率は、金型に用いられる炭素鋼に比べて若干小さく、断熱効果が高いと考えられる⁸⁾。したがって、たとえヒーター加熱しない場合でも、ヒーターに接触した部分の樹脂は融着が充分となり、結果的にウェルドライン幅が小さくなる。このように、金型表面の熱伝導率を下げることもウェルドライン消去に効果があると思われる。金型温度 80℃ 以上ではウェルドライン幅はどの場合もほとんど 0 μm となった。

3.3 ヒーター加熱法によるウェルドライン幅の変化

次にヒーター電圧が 0~100 V と広範囲に変化させた時のウェルドライン幅の変化を調べた。Fig. 7 に示す SEM 写真はヒーターから 4 mm 離れた非加熱部

Fig. 7 SEM micrographs of weldline in the unheated area, Ceramic heater voltage: (a) 0, (b) 20, (c) 40, (d) 60, (e) 80, (f) 100 V

Fig. 8 SEM micrographs of weldline in the heated area, Ceramic heater
voltage : (a) 0, (b) 20, (c) 40, (d) 60, (e) 80, (f) 100 V

のウェルドラインである。ウェルドラインは黒い帯状の線として観察された。電圧 0 V の時のウェルドライン幅は $23\mu\text{m}$ だが、電圧を上げても、その幅はほとんど変化しなかった。これより、セラミックヒーターは、ヒーターに接触する樹脂だけを加熱し、その他部分には全く影響を及ぼさないことがわかる。Fig. 8 はヒーター加熱部における同様の SEM 写真である。電圧 0 V の時のウェルドライン幅は $21\mu\text{m}$ であり、非加熱部とはほぼ同様の値であったが、20 V で $15\mu\text{m}$ 、40 V で $5\mu\text{m}$ と次第に小さくなり、60 V 以上では完全に外観上除去された。

Fig. 9 Relationship between heater voltage and weldline width (heated area); mold temperature
○ : 30, △ : 40, □ : 50, ● : 60, ▲ : 70, ■ : 80°C

ウェルドライン周辺では表面状態は電圧の上昇にしたがって粗面に変化している。これは表面転写性の向上によってヒーター表面の微細な凹凸が転写されたためである。より外観品質を向上させるためにはヒーター表面の研磨、あるいはめっき処理などが必要になると思われる。

80 V 以上の高電圧下では、とくに表面状態が悪化するので、実用上効果的と思われる 40 V 以下の範囲に関して、種々の金型温度条件 ($30\sim 80^\circ\text{C}$) におけるヒーター電圧とウェルドライン幅の関係を検討した。結果を Fig. 9 に示す。やはり、金型温度が低いほどウェルドライン幅が大きくなった。金型温度 30°C ではおよそ 30 V、金型温度 70°C では 18 V でウェルドライン幅が 0 になり、ウェルドラインは完全に表面から消去することがわかった。Fig. 3 に示した校正線図によってウェルドラインが消失したときのヒーター電圧から表面温度を求めると、およそ 80°C となった。これは、ポリスチレンのガラス転移点 ($80\sim 100^\circ\text{C}$) に相当する温度である。一方、非加熱部では Fig. 10 に示すように、金型温度が低い場合に若干幅の変動が大きくなるが、その平均値は電圧を上げてほとんど変化しておらず、ウェルドラインの解消は認められなかった。

3.4 ヒーター加熱とウェルド強度

ヒーター電圧に対するウェルド強度変化を Fig. 11 に示す。○および△は、各々、射出圧力 $P_t=131.7$, 134.0 MPa 、かつシリンダ温度 $T_c=200^\circ\text{C}$ の場合を、また□は $P_t=99.4\text{ MPa}$, $T_c=220^\circ\text{C}$ の場合を示す。

Fig. 10 Relationship between heater voltage and weldline width (unheated area); the symbols are the same as those in Fig. 9

どの成形条件下でも、ヒーター電圧の増加に対してウェルド強度は約 30 MPa と一定であった。ダンベル試験片を用いたこれまでの筆者らの研究において、ポリスチレン射出成形品のウェルドラインを機械的に切削除去した時のウェルド強度は約 35 MPa であった²⁾。成形品形状や成形条件が異なるため厳密な比較はできないが、本論で検討したヒーター加熱法では、ウェルドラインを機械的に除去した場合よりも低い強度にしか達しなかった。このことから、以下のような状態が考察される。

ヒーター加熱法によって樹脂の融着が促進され、表面のV溝は除去される。しかし、外観不良が改善されても表面の分子鎖の絡み合い度はそれほど向上しなかったために、この領域が切り欠き効果を発揮して、ウェルド強度はあまり向上しなかったと推察される。また、加熱部樹脂に白化現象が見られたことなどから、ヒーター加熱法が不均一冷却を招いて成形品中に成形ひずみが生じたことも考えられ、これらの理由で強度が期待したほど改善されなかったと思われる。

4. 結 言

射出成形品に生じるウェルドラインの解決方法として、成形中にヒーターを用いて樹脂を加熱する方法を検討した。その結果、ヒーターにより合流時の熔融樹脂を部分加熱することによってウェルドラインが消去されることがわかった。ヒーター電圧が高いほどウェ

Fig. 11 Effect of heater voltage on the tensile strength; mold temperature 40°C, ○: $T_c=200^\circ\text{C}$, $P_i=131.7\text{ MPa}$, △: $T_c=200^\circ\text{C}$, $P_i=134.0\text{ MPa}$, □: $T_c=220^\circ\text{C}$, $P_i=99.4\text{ MPa}$

ルドライン幅は小さくなり、非加熱の場合に比べて大幅に改善された。しかし、外観品質は向上したにも関わらず、ウェルド強度はほとんど改善されなかった。これは、表面のV溝が消去されても成形品内部には分子鎖の絡み合いが不足した低融着領域が存在するためと考えられる。また、局部加熱による内部ひずみ発生の可能性もあり、実用化のためにはさらに詳細な検討が必要である。

参 考 文 献

- 1) Hagerman, E. M.: *Plast. Eng.*, **29**, 67 (1973)
- 2) 黒田英夫, 下平勝義: 成形加工, **2**, (2), 159 (1990)
- 3) Tomari, K., Tonogai, S., Harada, T., Hamada, H., Lee, K., Morii, T. and Maekawa, Z.: *Polym. Eng. Sci.*, **30**, 931 (1990)
- 4) 中原靖幸: プラスチック加工技術便覧 (編集委員会編): 177 (1976), 日刊工業新聞社
- 5) 尾浦正幸, 木原武久, 上田誠一: *Moulding*, **13**, (2), 4 (1989)
- 6) 和田明紘, 川端繁忠: 成形加工, **3** (2), 165 (1991)
- 7) 割野孝一, 田村 弘, 松丸重雄: 第2回プラスチック成形加工学会予稿集, p.207 (1990)
- 8) 熱物性ハンドブック (日本熱物性学会編), 188 (1990), 養賢堂