レーザ干渉を利用した射出成形品表面の レコード溝状フローマークの発現プロセスの解明

斉藤 卓志^{*1}・佐藤 勲^{*1}・黒崎 晏夫^{*2}

A Study of the Wave-like Flow Mark Generation Process on an Injection Molded Polymer Strip with Laser Interference

SAITO, Takushi^{*1}/SATO, Isao^{*1}/KUROSAKI, Yasuo^{*2}

The generation of wave-like flow marks on an injection molded polymer strip was experimentally studied using laser interferometry with a He-Ne laser during the filling process. A microscope camera system was used to observe the interference fringe patterns through a calcium fluoride observation window of an experimental mold. A geometric analysis of the flow marks was calculated with a simple optical theory that gave the surface shape change as a function of optical path difference. The variation of local flow mark depths was obtained as a function of the distance from the melt flow front, and the time after the passage of the flow front. It was found that the polymer started to shrink when it contacted the mold wall surface, and this deformation caused a warp on the molded surface that was the origin of flow marks. It was also shown that the hill and valley shape of the flow marks grew with time. In a previous paper, one of the authors reported a model that described the wave-like flow mark generation from a thermal engineering point of view. The results obtained in this study correspond to the surface deformation that was discussed in the previous paper. Therefore the present authors believe that the flow mark generation model proposed in the previous paper is proper.

Key words : Flow Mark/Thermal Shrinkage/Laser Interference/Quantitative Measurement

1. 緒 言

プラスチック材料の射出成形法では、熔融樹脂温度に比べはるかに低い温度の金型内へ材料樹脂を射出充填、次いで冷却固化させることで高い生産性を実現している。一般に樹脂材料の熱伝導率は低く、金型壁と

接触することで樹脂表層部の温度が低下しても、そのすぐ内側の樹脂の温度は充填段階においては熔融樹脂温度に近いレベルで維持される。このような樹脂表層部の急峻な温度分布は、樹脂分子の流動配向や成形品表面における不良問題などを発現させる一因となっている。

一方、プロセスパラメータの影響に目を転じると、不適切な熔融樹脂温度や充填速度は、ショートショットやジェットングあるいはフローマーク等の問題を生じる。中でもフローマーク問題では、樹脂流動に起因して様々な成形品表面の不具合が観察される。例えば、横井らが可視化観察によりその発現機構を明らかにした、成形品表面に繰り返し曇りが生じるケース¹⁾や、吉井らが報告したマイクロスケールのフローマーク²⁾などは、その形状や大きさが著しく異なる。一方、

^{*1} 東京工業大学 工学部 機械知能システム学科
東京都目黒区大岡山 2-12-1 (〒152-8552)
Department of Mechanical and Intelligent Systems
Engineering, Tokyo Institute of Technology
O-okayama 2-12-1 Meguro-ku,
Tokyo, 152-8552, Japan

^{*2} 電気通信大学 機械制御工学科
調布市調布ヶ丘 1-5-1 (〒182-8585)
Department of Mechanical and Control Engineering
The University of Electro-Communications
1-5-1 Chofugaoka, Chofu, 182-8585, Japan
1999. 7. 29 受理

樹脂の充填速度が極端に低い場合や、流路の急拡大部では、レコード溝状のフローマークが成形品表面に観察されることがある。一般にコールドマークと呼ばれるこの種のフローマークは、樹脂充填速度を大きくしたり、金型温度を上昇させることで解消されることが多い。このため、実際のプロセスにおいてその発現を防止すること自体はそれほど困難ではない。しかしながらその発現機構の解明は、樹脂射出成形法におけるフローマーク問題の対策にとどまらず、さらに広義な成形加工という視点において、有益な知見を与えるものと考えられる。例えば、金属のキャスティングプロセスにおいても湯皺と呼ばれるフローマークに類似した現象が報告されている³⁾が、このようなケースに対しても現象の理解とその対策に役立つことが期待される。

本研究では、特にコールドマークと呼ばれるレコード溝状のフローマークの発現機構の解明を研究対象とする。このタイプのフローマークは成形品の外観品質や表面精度を著しく損なうため、その対策を目的とした発現機構の検討ならびにモデルの提示がこれまでも行われてきた。すなわち、樹脂表層部に生じる表面固化層を樹脂主流が不連続かつ繰り返し乗り越えるいわゆる「乗り越えモデル」²⁾や、金型表面と樹脂表面の間において微細なスリップが規則的に繰り返されるモデル⁴⁾などである。一方、筆者らは可視化金型を用いた樹脂流動の直接観察に基づいて、伝熱学的な見地より樹脂表層部の熱ひずみに起因するモデル⁵⁾を報告した。しかしながらその論文の中では、熱収縮による局所表面のそりがフローマークの発現原因であることを示唆したもの、その機構を実験的に確認するには至らなかった。その理由として、フローマーク自体の大きさが非常に小さく（波長で数百ミクロン、深さで数十ミクロン程度）、金型内において成形工程中に発現・成長するフローマークを外部より定量的に評価することが困難であったことが挙げられる。

そこで本研究では、成形品表面におけるフローマークの発現状況を定量的に議論することを目的として、フローマーク深さをレーザ光の干渉により干渉縞次数の分布として可視化することを提案し、実際の成形工程に適用することを試みる。実験では可視化金型を用いて、いわゆるニュートンリングと同様の原理により、金型内の樹脂表面と可視化窓表面の間の微細な間隙の変化を測定する。またこの手法を用いて、フローフロントが通過した後の樹脂表面の形状変化を明らかにし、既報³⁾において述べた熱ひずみに起因するフローマーク発現モデルの妥当性について、実験的な面からの検討を与える。

2. 熱ひずみによるフローマークの発現モデル

本論に先立ち、筆者らの一部が以前に報告した熱ひずみに基づくフローマーク発現モデル⁵⁾について簡潔に述べる。既報では、フローフロント部における温度分布解析、成形品表面に発現するフローマークの通常光による可視化観察、およびその最終形状の詳細な測定を通して、フローフロント直後において樹脂表面と金型壁面が接触した瞬間から開始される熱移動、それにより生じる熱収縮が、フローマークの発現に大きく影響することを予測した。その概念をFig.1に示すが、モデルではフローマークの発現と成長は、金型壁との接触による樹脂材料の厚さ方向の温度分布に起因するとしている。すなわち成形品の厚さ方向の温度分布により生じる熱収縮率の分布が、図中に示されるようにフローフロント通過直後の表面を持ち上げ、成形品表面に波状のフローマークを形成するとしている。ところがこの局所的に反っている部分は、フローフロントの進行とともに樹脂表面を支持することができなくなり、再びフローフロントは金型壁と接触する。つまりこのモデルでは、フローマークの凹部は成形品の冷却による局所的な反りにより形成され、凸部はその変形に打ち勝ってフローフロントが金型壁と再接触することで形成されるとしている。また、様々な成形条件の影響を伝熱工学の見地より整理し、成形条件の変化が与えるフローマーク形状（フローマーク深さと長さの比）への影響を検討した。その結果をFig.2に示すが、フローマーク形状は樹脂表層部の熱移動に視点を置いたモデルにより整理されることが示された。この結果より既報では、固化層の発達状況の分布により生じる局所的なそり変形がフローマークの発現を支配していると結論づけた。またこのそり変形は、樹脂表層部の冷却に起因するため、フローマーク深さは時間経過にしたがって深くなることが示唆された。

Fig.1 Surface bending behavior around a melt flow front. Thermal shrinkage distribution in the melt thickness direction causes the bending force. This deformation is considered as an origin of a flow mark

Fig.2 Effect of the experimental conditions on the aspect ratio of the flow marks, d/λ (flow mark depth/its length). The value of the horizontal axis includes various molding conditions; α , T_s , T_i , T_{p0} , F_0 , and t_c^* are thermal strain, solidification temperature of the polymer, interface temperature between the mold wall and the molded polymer, initial melt temperature, Fourier number, and delay time of the initiation of the bending deformation, respectively

3. 測定原理

本実験では、フローマークの発現する領域における金型-樹脂間の微細な間隙変化を測定するためにレーザ光の干渉現象を利用する。この測定法の原理は、一般にニュートンリング⁶⁾として知られるものと同様である。すなわち、微小な傾きを持って対向する二枚のガラス板の上下それぞれの板の表面において反射する光の光路差のために生じる干渉縞の間隔が、ガラス板同士の間隙に比例することを利用する。実験では Fig. 3 に示すように、金型外部より観察光である He-Ne レーザを導き、成形品表面で反射した光 (実線) と観察窓の表面において反射した光 (破線) を干渉させる。この場合、両者の光路差 L は図中に示す記号を用いれば次式のように表せる。

$$L = 2 \left(\frac{n_1 d}{\cos \varphi} + \frac{h}{\cos \theta} \right) - 2(d \tan \varphi + h \tan \theta) \sin \theta \quad (1)$$

ただしここでは、観察窓 (フッ化カルシウム製) 内部の屈折率は時間によらず一定とした。すなわち、樹脂充填により観察窓は非定常加熱されるが、結晶材料の屈折率の温度依存性が 10^{-5}K^{-1} 程度と非常に小さいことを勘案して、その影響を無視した。さて、Fig. 3 において樹脂表面が「そり」あるいは「ひけ」などにより、 Δh だけ移動したとき、上式は次のようになる。

Fig.3 Schematics of the interference condition observed in this study

$$L' = 2 \left(\frac{n_1 d}{\cos \varphi} + \frac{h + \Delta h}{\cos \theta} \right) - 2(d \tan \varphi + (h + \Delta h) \tan \theta) \sin \theta \quad (2)$$

(1), (2) 式より、樹脂表面が Δh だけ移動したときの光路差の変化 ΔL は下記のように求まる。

$$\Delta L = L' - L = 2 \frac{\Delta h}{\cos \theta} - 2 \Delta h \tan \theta \sin \theta = 2 \Delta h \cos \theta = n \lambda \quad (3)$$

また、この式中に示されるように、光路差が観察光の波長 λ の正数倍として表せるとき、強め合いにより観察者の目には干渉縞の明部が観察される。

以上の関係より、成形品表面の凹凸状態が干渉縞次数の分布として可視化される。すなわち可視化観察される干渉縞模様は、成形品表面における深さ (カメラの観察) 方向の等高線分布と同義となる。よって時間の経過による干渉縞次数の変化は、成形品の表面形状が経時変化していることを意味する。このような映像を顕微鏡ビデオシステムにより記録することで、上記の関係式に基づいて成形品表面形状の相対的な時間変化を光学的に求めることが可能となる。ただし、ここで相対的と述べているのは、本研究で用いた測定法において 0 次の縞位置を決定することが困難であったためである。本研究では、この縞次数の時間変化より、金型-樹脂表面の間隙の時間変化を測定し、先に述べた熱ひずみを考慮したフローマーク発現モデルとの整合性を検討する。なお、測定においては観察レーザ光源 (He-Ne レーザ、波長 633 nm) の入射角度を 10 度としたため、暗-暗あるいは明-明として観察される一干渉縞に相当する深さ方向の値は $0.321 \mu\text{m}$ となった。

4. 実験装置及び方法

実験で使用した金型の概略を Fig. 4 に示す。金型壁の一面にフッ化カルシウムを用いることにより、可視

Fig. 4 Schematics of the experimental visible molds used in this study

Fig. 5 Dimensions of a molded polymer product. Flow mark generation on the 40×10 mm surface was measured and discussed in this study

化観察窓とした。本実験において脆性破壊の恐れがあるフッ化カルシウムを窓材料として敢えて使用したのは、その透明性もさることながら、結晶材料であるこの材料が高い熱伝導率を有し、フローマークを観察窓上に発現させやすいためである。ここに示す実験金型で得られる成形品の形状を Fig. 5 に示す。また、Fig. 6 に本実験において使用した光学系の概略を示す。観察光源には He-Ne レーザを使用し、ビームエキスパンダーによりその直径を約 10 mm とした上で、上記のフッ化カルシウム窓より金型内を流動する樹脂の表面に導いた。樹脂表面及びフッ化カルシウム窓の表面で反射した二つのビームにより発現する干涉縞は、顕微鏡カメラシステム (KEYENCE, VH-5900) により記録される。この映像より干涉縞次数の分布やその時間変化を解析することで、先に示した(3)式よりフローマークの発生した成形品表面の形状やフローマーク深さの時間変化を求めることが可能となる。また、実験

Fig. 6 Experimental apparatus used in this study. He-Ne laser was used as a light source

Table 1 Experimental conditions used in this study

Melt temp. (°C)	Mold wall temp. (°C)	Injection and holding pressure (MPa)	Flow front velocity (mm/s)
160	Room temperature (around 25)	25	11.5~22.4

では、フローマーク深さ変化の実時間測定に加え、冷却が完了した成形品についても非接触表面形状測定装置 (KEYENCE, VF-7500) を用いて、その最終的な表面形状の測定を行った。実験では高密度ポリエチレン (ダイヤポリマー株, JR 200) を供試材料として使用した。Table 1 に実験で用いた成形条件を整理する。

5. 実験結果及び考察

5.1 干涉縞の可視化映像

顕微鏡カメラシステムにより記録された可視化映像を Fig. 7 に示す。画像は充填が完了し成形品表面におけるフローマークが顕著に観察される状態 (充填開始から約 3.5 秒経過) を示している。また、樹脂充填は図中右から左方向に行われた。図中下部に成形品表面の断面図を模式的に示すが、2 次元的な可視化映像と、実際の成形品表面の凹凸の関係は、成形品表面に偶然生じたキズなどを利用して、予備実験によりあらかじめ把握している。なお、画像中左上から右下方向にのびる、広く不明瞭な干涉縞は、光学系の僅かなひずみ (実際には反射鏡の表面うねりと考えられる) により生じたものであり、成形品の表面形状とは関係ない。図中 A に示されるように、可視化窓と接触するフローマークの凸部は全反射により連続線として観察された。これにより可視化映像から、フローマークの凸部から隣の凸部までの距離であるフローマーク波長を、直接測定することが可能となった。そこでまず繰り返し成形を行い、生じたフローマーク波長を測定することで、成形機及び可視化系の再現性を検証した。その結果を、縦軸にフローマーク波長、横軸にフローフロント速度

Fig.7 Visualized image of the molded polymer surface geometry. Wave-like shape of the flow marks is shown as contour distribution of the interference fringe pattern

Fig.8 Effect of the flow front velocity on the wavelength of the flow marks. Each data point was measured through the visualized images

をとることで Fig.8 に示すが、得られたデータは、十分な再現性を有した。また、検証では射出速度を二段階に変化させていたが、速度の増加にしたがって生じたフローマークの波長が短くなることが示された。これは従来の観察結果⁷⁾と一致する。

さて、Fig.7 中に示されるように、フローマークの凸部の間には長楕円の縞模様（図中 B）が観察されたが、これがフローマークの凹部の深さに対応して発生した干涉縞である。先の測定原理においても述べたが、観察された干涉縞の次数は、その位置における深さ（紙面垂直方向）に比例するため、二つの凸部の間に存在する縞次数をカウントすることでフローマーク凹部の深さが求まる。フローフロント通過直後を捉えた映像より、フローフロントからの位置に対するフローマーク凹部深さの変化を求めた結果を Fig.9 に示す。図中

Fig.9 Flow mark depth change from the melt front during the filling stage. Dotted lines shown in the graph indicate top position of the generated flow marks

の破線はフローマークの凸部の位置を示すが、凹部はフローフロントからの距離が増加するにしたがって深くなることが明らかとなった。フローフロント位置が充填により移動することを考慮すると、この結果は、あるフローマークの凹部に注目した場合、その深さは時間とともに深くなることを示唆している。

一方、Fig.7 中に示される干涉縞模様をさらに詳しく観察すると、（フローマーク凹部における）縦長の縞模様の外周部分では、縞が不鮮明となり途切れている部分が存在することがわかる。このような縞の不連続については、以下のように説明される。すなわち、図中左右方向にはフローマークによるうねりが成形品表面に存在するが、その頂部と底部近傍以外では本研究で採用している測定手法の原理が適用できないと考えられる。つまりフローマークの頂部と底部を連続的につなぐ傾斜面においては、観察光の入射角が頂部と底部におけるそれとは異なってくるため、成形品の表面で反射した光が正しく観察カメラへ到達できない。このために干涉縞の途切れが生じたと理解された。

5.2 フローマーク深さの時間変化

前節の結果よりフローマーク凹部の深さの時間変化が推察されたため、ここではある一つのフローマークに注目し、フローフロント通過後からの深さ変化を検討する。縞次数の変化をカウントすることで求められたフローマーク深さの変化を Fig.10 に示す。ただしグラフは、測定点をフローフロントが通過したと観察された時刻を 0 として作成されている。また、図中の破線は樹脂充填の完了時刻を示す。グラフには異なる射出速度における結果が併せて示されているが、それらの時間変化は興味深い結果を示した。すなわち、両

Fig. 10 Flow mark depth change with time. The results of two different flow front velocity cases are shown in the graph. The depth growth can be classified into three stages; rapid growth in the short time region ($t = 0 \sim 0.5$), gentle growth of the medium ($t = 0.5 \sim 4.0$), and sharp increase in the last ($t = 4.0 \sim$)

者ともにフローフロント通過直後にフローマーク深さが急激に成長する時間帯が存在し、続いてその増加の傾きは緩やかなものとなる。その後再び急激な増大の増加が観察された後に、干渉縞自体が観察されなくなった。

樹脂の充填速度の違いが与えるフローマーク深さへの影響に目を転じると、速度が低い場合には最終的に生じるフローマーク深さが大きくなることが示された。これは先に述べたフローマーク波長の増加と対応するものである。その一方、時刻0におけるフローマーク深さに注目すると、速度 14.7 cm/s の場合にはほぼ 0 からスタートしたフローマーク深さが、速度が 21.4 cm/s の場合にはある初期深さを有することが示された。すなわち速度が高い場合には、フローフロントが金型壁と接触する時点でフローマークがすでに形成されていたことを意味する。これは既報³⁾のモデルでは説明できない結果であり、フローマーク発現には伝熱的な要因だけでなく、流力的な要因も存在することを示唆している。このため、金型壁に接触する直前のフローフロント形状を明らかにすることが必要と考えられる。しかしながら本実験で用いた表面形状の測定手法では、原理上、大きな傾斜角を有するフローフロント部における初期フローマークの発生を明らかにすることはできず、また正確な時刻0を決定することも困難であった。このため、フローフロントが金型壁と接触した瞬間やそれ直前のフローフロントまわりの形状については、今後の検討課題とする。それよりもここでは、フローフロント通過後もその深さを刻々と変化

Fig. 11 Generation and growth of a flow mark and its depth caused by the surface bending

させることが明らかとなったフローマーク深さ成長のメカニズムについて、既報⁵⁾で述べた成形品表層部の温度低下のために生じる熱収縮による局所的なそりと関連づけて考察する。

5.3 フローマークの発現機構のモデル

上記に述べた結果を、既報³⁾の内容を踏まえて、成形品表面に生じるレコード溝状のフローマークの生成機構として以下に整理する。樹脂充填段階において繰り返して生じるフローマークをその断面方向より模式的に表したものを Fig. 11 に示す。ただしここでは、繰り返して形成されるフローマークのうち、任意の一つの成長に注目し、その前後は同様のメカニズムによりフローマークが形成されるものとする。

フローフロントの進行にしたがって、その先端から移動した樹脂は、金型表面との接触により温度低下する (Fig. 11 (a))。この温度低下は、樹脂表層部という局所に限定した場合、熱伝導率の低い樹脂材料においても直ちに進行し、ほぼ同時に熱収縮すると考えることができる⁸⁾。このとき、温度低下した部分の剛性は相対的に上昇するため、熱収縮は周囲の樹脂を引き込むようにして生じる。このような現象は、スケールの差こそあるがひけの発生位置の偏りについても観察される⁹⁾。すなわち金型温度に分布がある場合、相対的

に高温部と接触する樹脂表面が、低温部と接触する樹脂の熱収縮により大きく変形し、結果としてひけの発生に偏りが生じる。本研究で注目するフローマークでは、熱収縮に対する埋め合わせは、相対的に温度が高く自由表面を有するフローフロント部分から行われる。このため、Fig. 11 (b)に示されるようにフローフロントの一部に局所的なそりが生じる。一方、フローフロントは進行し続けるため、局所的な熱収縮により反った成形品の表面は、反り変形と新たなフローフロントからの湧き出し流れがバランスする位置から再び金型表面へ近づく。その結果、金型表面と再接触することでフローマークの凹部が形成され、一つのフローマークを形成することになる (Fig. 11 (c))。

次に Fig. 10 に示されたように、フローフロントが通過したあとにおいても、フローマークの凹部の深さが時間の経過とともに大きくなる機構について述べる。金型表面と接触することで、樹脂表面から熱移動が生じるため、樹脂表層部の温度レベルは時間の経過とともに低下する。しかしながらその冷却は、成形品の表面に生じたフローマークのためにはやや均一には進行しない。すなわちフローマークの形成により金型壁と接触する部分 (フローマークの凸部) では、そうでない部分 (フローマークの凹部) に比較してより冷却が速やかに進行する。先にも述べたように、温度低下した部分はその体積収縮を補うために、周囲のより高温の部分の樹脂を引き込もうとする。これが結果として Fig. 11 に示されるように、フローマークの凸部が固定されたまま、両隣の凹部の大きさを増加させることになる。ただし、このフローマーク深さの成長の時間レベルは 0.5 s 以下と非常に短く、その間は樹脂充填が継続されているために、フローマークの凸部を金型表面に押しつける力が働いていた点に注意を要する。このようなメカニズムにより、Fig. 10 に示されたように、フローフロント通過後もフローマーク深さが時間経過とともに大きくなるのが観察された。さて、ここまでは短い時間領域においてフローマークの凹部深さが表層部の熱収縮により増大する理由を述べたが、Fig. 10 中の長時間領域において、再びフローマーク深さが著しく増加する様子が観察された。これはこの時点において樹脂充填が完了していること、またその時刻が 4 s 付近であることを考えあわせると、成形品全体の冷却による板厚さ方向の体積収縮、いわゆる面ひけを測定したものと理解される。このことは、可視化映像においてフローマークの凹凸部それぞれにおける干渉縞次数が一様に増加したことから裏付けられる。

Table 2 に本研究で採用した手法により、成形行程

Table 2 Comparison of the measured flow mark depth of two techniques, one is the present and the other one is con-focus laser microscope

Melt temp. (°C)	Flow front velocity (mm/s)	Measured in this study (μm)	Measured with confocus laser system (μm)
160	14.7	4.8	14.1
160	21.4	3.2	3.6

中に得られたフローマーク深さと、表面形状測定機により、最終成形品の表面に対して測定を行った結果をまとめる。表中に示されるように、本実験においてオンラインで測定されたフローマーク深さは、最終成形品の表面に生じたものより小さかった。この原因として、前述の通り成形品表面の傾斜形状のために観察カメラが干渉縞を捕らえることができない領域があるという原理的な理由に加え、離型後の成形品表面の変形の可能性も考えられる。これらの結果をふまえて、ここで提案した測定手法をより定量的なものとして確立するためには、成形品表面のうねり等の影響を抑制・除外することができる光学系を組む必要があると考えられる。しかしながら、フローマークの深さがその形成初期において時間とともに成長することを明らかにした点は、本研究により初めて明らかにされたものであり、その意義は大きいと考える。

6. 結 言

本論文ではレーザ光の光路差により得られる干渉縞を利用して、射出成形品の表面に生じるレコード溝状のフローマークの発現機構を実験的に検討した。実験では可視化金型を用いて成形品表面の凹凸形状の変化を干渉縞次数分布の変化という形で測定し、フローフロントからの距離に対する変化、あるいはフローフロント通過後の経過時間に対する変化として議論した。その結果、フローフロントから金型表面へ移動した樹脂は、その表層部の熱収縮による表面そりのためにフローマークを形成し、時間の経過とともに生じたフローマークの凹凸が顕在化することを明らかにした。この結果は、筆者らの一部が以前に報告した、伝熱学的な立場より説明を与えたフローマーク発現モデル⁵⁾により予測された樹脂表面の変形に対応する。このため、本研究で得られた結果は既報におけるモデルの妥当性を実験的に裏付けたものであると考えられる。

一方、本研究で適用した手法は、金型壁と接触する前のフローフロントの状態を把握することができない。フローマークの発現機構を完全に解明するためには、

金型と接触した後の樹脂表面の変形だけではなく、フローフロントから回り込んでくる樹脂表面の様子をも連続的に明らかにする必要があると思われる。また本研究で用いた測定手法は、成形品表面の形状（うねりや傾き）が観察光の干渉条件に影響するため、結果として大きな測定誤差を招いている。今後はこれらの点についての対策を行うことで、より精度の高い測定が可能となると考えられる。

謝 辞

本研究の一部は、文部省科学研究費補助金（基盤研究(B)(2)、課題番号 09450086）により遂行された。また本研究における実験に多大なご協力を頂いた、東京工業大学工学部卒業生、現川崎重工業株式会社勤務、後藤健一郎氏に謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) Yokoi, H., Deguchi, Y., Sakamoto, I. and Murata, Y.: *SPE ANTEC '94*, pp. 829-832 (1994)
- 2) Yoshii, M., Kuramoto, H., Kawana, T. and Kato, K.: *Polymer Engineering and Science*, **36**, pp. 819-826 (1996)
- 3) Dong, S-X., Niyama, E. and Anzai, K.: *Cast Metals*, **6**, pp. 122-126 (1993)
- 4) 安原鋭幸, 加藤和典, 高岩寿行: 成形加工 '97, pp. 327-328 (1997)
- 5) Louis Tredoux, 佐藤 勲, 黒崎晏夫: 成形加工, **10**, pp. 732-741, 1998.
- 6) 例えば, 久保田広, 浮田祐吉, 會田軍太夫: 光学技術ハンドブック, (1968), 朝倉書店
- 7) 黒崎晏夫, 佐藤 勲, 遠藤 淳: 成形加工シンポジア '94, pp. 74-75 (1994)
- 8) Kurosaki, Y., Satoh, I. and Tredoux, L.: 成形加工シンポジア '96, pp. 295-298 (1996)
- 9) 黒崎晏夫, 佐藤 勲, 斉藤卓志: 成形加工, **8**, pp. 136-143 (1996)