

本計測手法は、型内成形現象の解明、および数値シミュレーション結果の検証に対して有効な手段となるものと考えられる。各感圧部間の出力誤差補正方法を検討し、測定精度をさらに向上させることにより、本計測手法の利用範囲が今後益々広がるものと期待される。

## 第8章 集積熱電対センサによる 型内樹脂温度分布計測

### 8.1 緒言

前章では、圧力伝達ピンアレイと圧力分布触覚センサを用いたキャビティ面圧分布計測手法の確立を行い、実際の成形運転下での計測実験を通して、その有効性を実証した。

本章では、今後確立が求められる樹脂温度計測手法として、熱電対の誤差因子を排除し、かつ高集積度、高位置決め精度で急峻なキャビティ厚さ方向の樹脂温度分布を計測できるセンサを提案・試作する。そして流動過程から冷却過程に至る樹脂温度分布の計測実験を通して、本センサの有効性を確認する。

射出成形金型内におけるキャビティ厚さ方向の樹脂温度分布を知ることは、流動、固化等の成形プロセス、およびひけ、そり等の成形不良現象の解明、数値シミュレーション結果の検証に対して極めて重要である。序論で述べたように、型内の樹脂温度計測法としては、これまでに、(1)赤外線放射温度計測法<sup>66), 69), 111)</sup>、(2)超音波計測法<sup>70)</sup>、(3)蛍光法<sup>76)</sup>、(4)素線熱電対による方法<sup>31), 76)</sup>等が試みられてきた。(1)は主に成形現場における成形過程のモニタ用として利用され、(2)~(4)は研究用として用いられている。この中で、(1)~(3)は、検出部をキャビティ内に突出することなく、すなわち樹脂流動を阻害せずに繰り返し計測が可能であるが、温度分布計測への適用はまだ技術的に困難な状況である。一方、(4)は温度分布計測を可能としているものの、多数の熱電対を精度良く位置決めするために煩雑な作業が必要となる。加えて、成形品からセンサを取り出す際の熱電対強度にも問題があり、成形条件(金型・樹脂温度)が安定するまでの繰り返し計測に耐えることができないという問題を有している。

このような現状から、本章では、キャビティ厚さ方向の樹脂温度分布を高位置決め精度・高集積度でかつ簡単に繰り返し計測する方法の開発を目的とし、



めっきによりポリイミドフィルム上に多数の熱電対パターンを集積形成した集積熱電対センサを提案・試作する。そして同センサの基本特性および誤差の評価実験を行った後に、キャビティ厚さ方向樹脂温度分布の計測を試みる。

## 8.2 集積熱電対センサの計測原理と基本特性

### 8.2.1 計測原理

図8.1は、キャビティ厚さ方向の樹脂温度分布計測原理を示している。キャビティ厚さ方向における樹脂温度分布を詳細に解析するためには、厚さ2~3mmのキャビティにおいて少なくとも5~10点の計測点を設ける必要がある。数10 $\mu$ m径の素線をスポット溶接して作られた熱電対をキャビティ厚さ方向に正確に位置決めすることは極めて困難と考えられる。そこで本研究では、プリント基板におけるパターン形成技術を援用し、めっきを用いたパターンニングにより多数の熱電対を薄いポリイミド基板上に形成した集積熱電対センサを、キャビティ壁面に対して垂直に設置し、流動から冷却過程に至る樹脂温度分布を計測する方法を提案した。この方法によれば、センサから下流側の樹脂の流れは乱れるが、カップリング部位をセンサの端面部分に配しているため、同部分の温度は正確に計測できる。本計測法の特長を以下に列記する。

- (1)めっきを用いたパターンニングにより熱電対を形成するため、高い集積度と位置精度が得られる。
- (2)成形条件によっては、実際の成形運転下で5~10ショットの繰り返し計測が可能であるため、1ショットしか計測できない素線熱電対に比べて安定した成形条件下で計測が行える。

### 8.2.2 集積熱電対センサの形状および製作方法

図8.2は、集積熱電対センサ（以後、本センサと呼称する）の形状・寸法を示している。4.2mmの測定範囲内にカップリング部が0.3mm間隔に14点配列されている。したがって、本研究の測定範囲であるキャビティ厚さ2mm~3mmに対しては、6点~10点の計測が可能となる。本章では、カップリング部の番号をセンサ固定側から順に①~⑭と呼称する。図8.3は、本センサのパターン形成方法を示

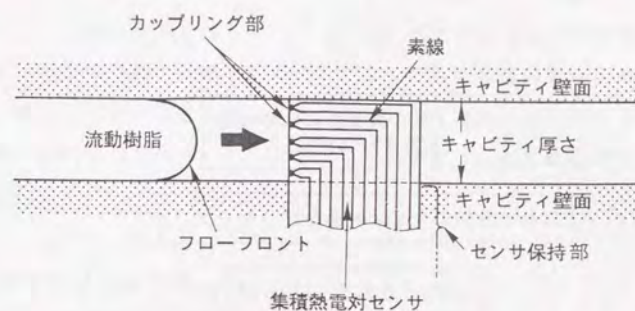


図8.1 キャビティ厚さ方向の樹脂温度分布計測原理

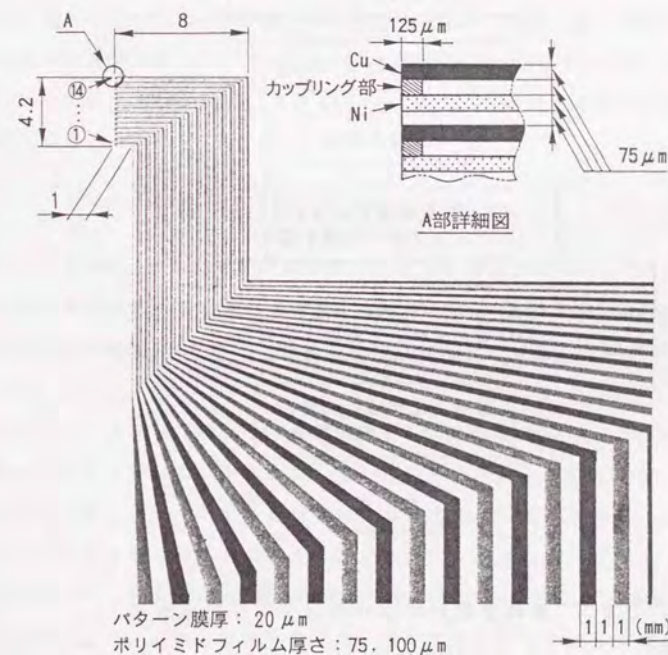


図8.2 集積熱電対センサの形状・寸法（単位：mm）



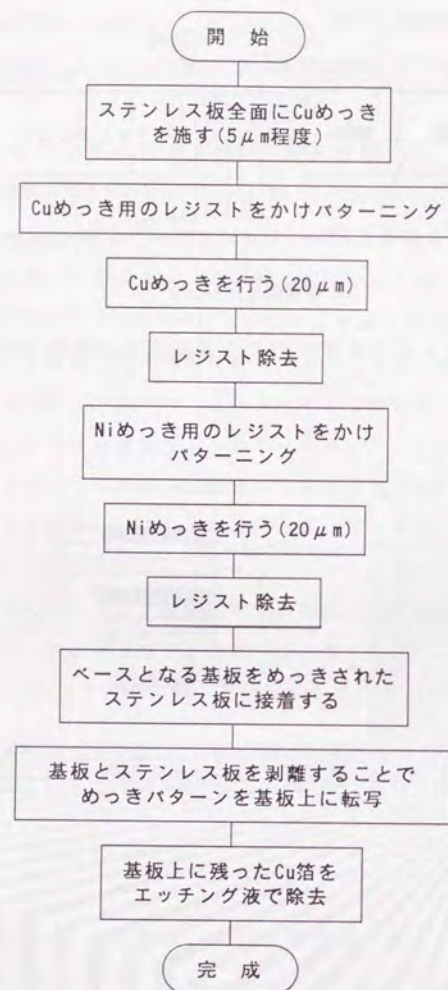


図8.3 集積熱電対センサのパターン形成方法

している。パターンニングは、スパッタリング等比べて膜厚強度が高く形成速度の速いめっき法を用いて行った。コンスタンタンのような合金材料ではめっき工程による組成変動が心配されたため、ここでは純金属の組み合わせによるCuとNiによりパターン形成を行った。形成パターンは、ポリイミドフィルム（東レ㈱：KAPTON Hタイプ）上にエポキシ系接着剤（三井石油化学工業㈱：EPOX AH-333）を用いて反転接着した。

### 8.2.3 センサの出力特性

センサの出力特性として、ここでは熱起電力－温度特性と応答性の評価を実施した。実験には、いずれもシリコンオイル（信越化学工業㈱：KF-54）の入った恒温液槽（ヤマト科学㈱：BF-61）を用いた。まず、熱起電力 $E(\text{mV})$ －温度 $T(^{\circ}\text{C})$ 出力特性の評価実験では、任意の3個のセンサを用いて、各々のセンサ出力特性を平均し、 $T=f(E)$ の近似式を求めることとした。図8.4は、得られた熱起電力と温度の関係を示している。3次近似が実測値との誤差を最小にする結果となったため、以下では $f(E)$ として次の近似式(8-1)を用いて温度への換算を行うこととする。

$$T = 0.990E^3 - 9.375E^2 + 65.393E + 1.293 \quad (8-1)$$

なお、上記3個のセンサで評価したセンサロット間出力誤差と、4回の繰り返し計測で評価した再現性誤差の合計は、後述する直流増幅器等の本計測系全体の誤差を含めても $\pm 1\%$ 以内と、極めて小さな値にとどまることが併せて確認されている。

つぎに、応答性評価実験として以下の条件による時定数（63.2%応答に要する時間）の計測を行った。すなわち、約 $30^{\circ}\text{C}$ の外気温におかれた本センサをそれぞれ $140$ 、 $160$ 、 $180$ 、 $200^{\circ}\text{C}$ に設定した恒温液槽中に一気に浸漬し、出力の立ち上がり特性を評価した。その結果、設定温度にかかわらず、ポリイミドフィルム厚さ $75\mu\text{m}$ 、 $100\mu\text{m}$ の時定数は、それぞれ $70\text{ms}$ 、 $90\text{ms}$ となり、極めて高い応答性が確認された。以後の計測実験では、強度を考慮してフィルム厚さ $100\mu\text{m}$ のセンサを使用することとした。



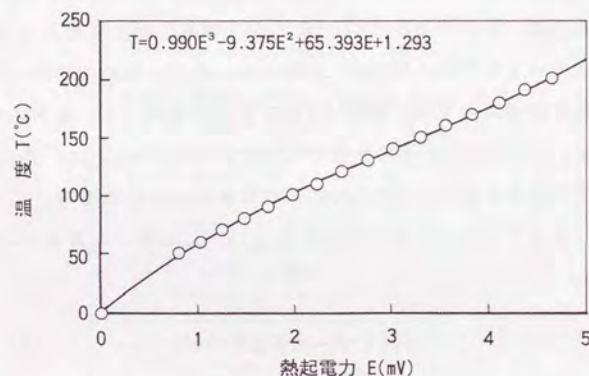


図8.4 熱起電力と温度の関係

### 8.3 実験方法

図8.5は、実験に使用したキャビティ形状を示している。本キャビティは、中央のB-Bにおいて2分割できる構造で、図8.6に示される2つの半割れブロック間に本センサを挟んで固定する。後述する素線部を介しての熱伝導誤差評価実験では、キャビティ末端Gを開放状態にして計測を行った。図8.7は本センサの計測金型への取り付け方法を示している。計測金型には、第1部で試作した汎用ガラスインサート金型を利用した。具体的には、第1章の図1.2のプリズムガラス④とスペーサAを取り除いた空間に、本センサが挟まれたブロックを挿入する構造となっている。

図8.8は本センサの設置方法を示している。本実験では、センサは実験用途に応じて3通りに設置される。具体的には、(a)が流動方向に沿う熱伝導誤差評価実験、(b)がキャビティ厚さ方向の熱伝導誤差評価実験、(c)が型内樹脂温度分布計測実験のセンサ設置方法をそれぞれ示している。なお、(b)では、計測の対象となるキャビティ厚さ方向の位置を金型固定側から順にⅠ～Ⅵと呼称する。カップリング部の位置決めは、工具顕微鏡（ミットヨ機：TM300）とX-Yテーブルを用いて行った。次節以後のセンサ評価実験と型内樹脂温度分布の計測実験は、すべて実際の成形運転下により行った。成形条件を表8.1に示す。

実験に使用した樹脂は、生産によく用いられる汎用ポリスチレンGPPS（住友化学工業機：エスブライト2V）と耐衝撃性ポリスチレンHIPS（住友化学工業機：エスブライトHH-501）である（粘度特性等の樹脂物性および適用成形条件範囲は巻末の付録参照）。

図8.9は計測システムの構成を示している。センサ出力は、直流増幅器（共和電業機：DA-510B）を通してトランジェントメモリ（機エレクトロニカ：ELK-6000）に記録し、パーソナルコンピュータ（日本電気機：PC-9801VX）で処理した。本センサと計測システムとの接続は、図8.10に示すコネクタにて行われる。また、図8.5のPで示したエジェクタピン下には水晶圧電式圧力センサ（日本キスラー機：Type9221）を挿入し、温度分布計測位置に対応する圧力変化の同時計測を行った。実験に使用した射出成形機は、ファナック機製のAUTOSHOT MODEL 75E（型締力75tonf）である。

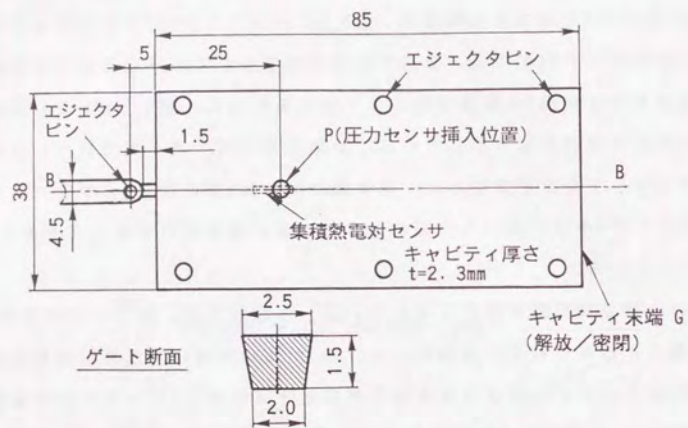


図8.5 キャビティ形状 (単位: mm)

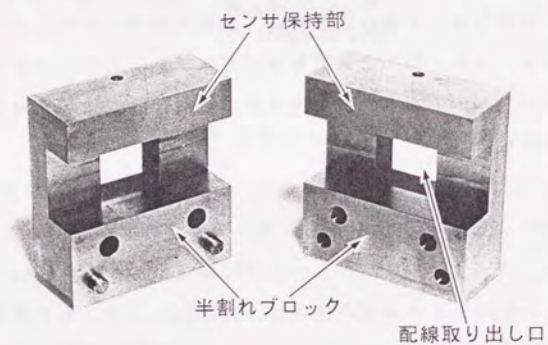


図8.6 センサ固定用半割れブロックの外観

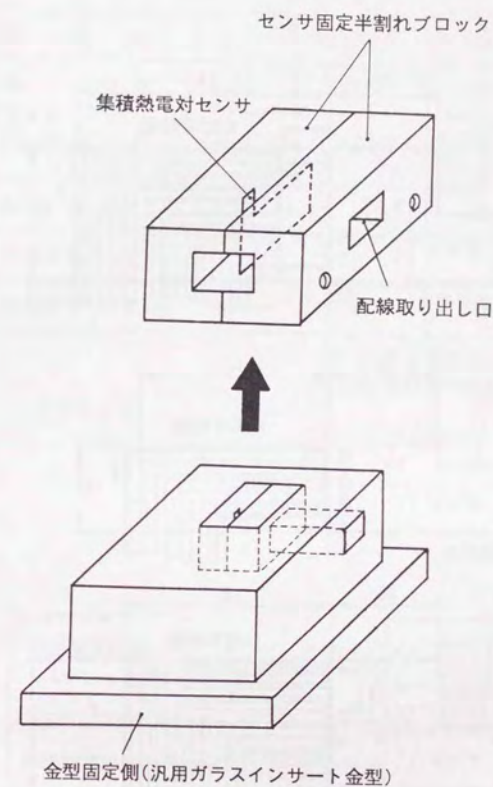


図8.7 金型へのセンサ装着方法



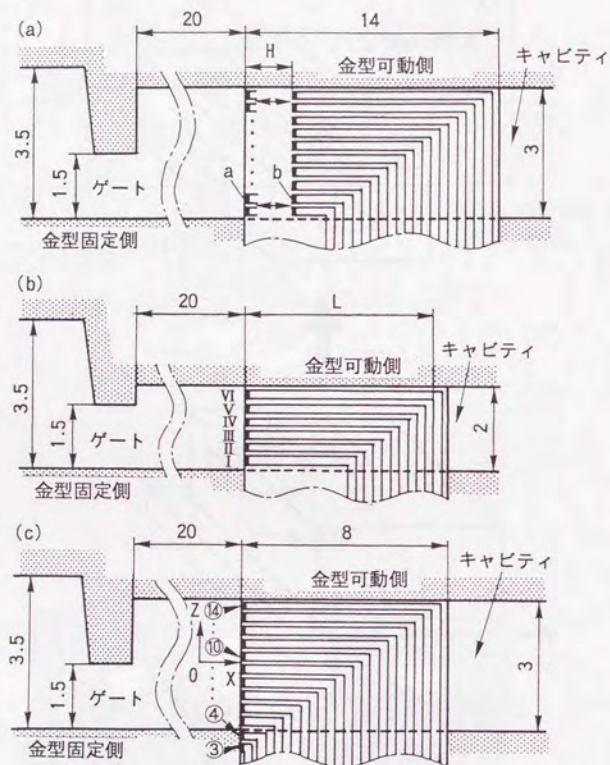


図 8.8 センサの設置方法 (単位: mm)

表 8.1 成形条件

実験 No.	1	2	3
樹脂	HIPS	GPPS	GPPS
射出率 ( $\text{cm}^3/\text{s}$ )	15.3	2.6	1.5, 3.1 7.1, 13.2
射出量 ( $\text{cm}^3$ )	61.1		22.9
樹脂温度* ( $^{\circ}\text{C}$ )	210		
金型温度** ( $^{\circ}\text{C}$ )	50	40	30

\*) ノズル部設定温度

\*\*) 金型温度器設定温度

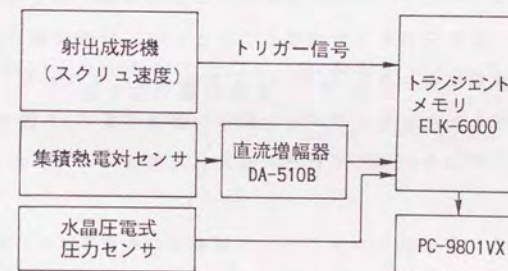


図 8.9 計測システムの構成



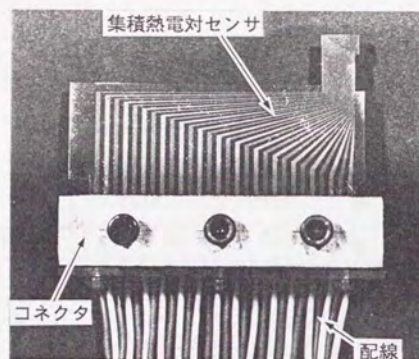


図8.10 センサ配線用コネクタの外観

#### 8.4 素線部を介した熱伝導誤差の評価

##### 8.4.1 流動方向に沿う熱伝導誤差

本センサでは、熱電対素線を樹脂流動方向に平行に並べて熱伝導誤差を回避する点を特長としている。そのため、樹脂流動方向に沿った素線部に温度分布が生成した場合に、熱の移動によりカップリング部温度に誤差が生じる可能性が懸念された。そこで、本節では、樹脂流動中に上記素線部に沿ってどのような温度分布が生じているかを実際に計測することとした。計測実験は、図8.8(a)に示すセンサ設置状態により表8.1のNo.1にて実施した。すなわち、センサ全体の長さを14mmで一定とした上で、パターンのない領域の長さHを変化させて計測を行い、カップリング部をaとbにそれぞれ設定した場合の両者の温度差の測定を試みた。

図8.11は、フィルム端面からカップリング部までの距離Hとカップリング部⑩、⑪（キャビティ厚さ中央部）の出力との関係を示している。同図では、 $H=5\text{mm}$ 付近において若干の温度低下が見られるものの、温度低下は測定温度の約3%以内と僅かであることが示されている。これより、素線部に沿って樹脂流動方向に生成する温度分布は、カップリング部にほとんど影響を及ぼさないものと判断された。

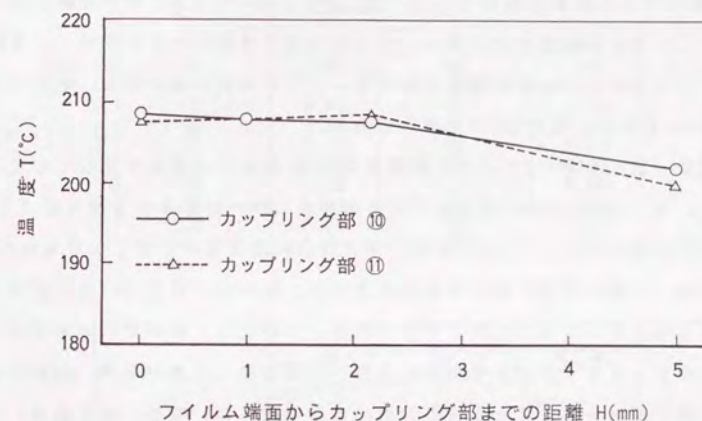


図8.11 センサ出力とフィルム端面からカップリング部までの距離の関係



#### 8.4.2 キャビティ厚さ方向の熱伝導誤差

一般にキャビティ厚さ方向には大きな温度勾配が生成する。素線を厚さ方向に配した本センサの場合、素線部を介した厚さ方向の熱伝導誤差の生成が懸念されていた。こうした熱伝導誤差は、素線長さを十分長くし、カップリング部近傍における急激な温度勾配をなくすことで回避できることが知られている<sup>121)</sup>。そこで熱伝導誤差が回避可能な素線長さを決定するために、図8.8(b)におけるキャビティ厚さ方向の計測点Ⅰ～Ⅵは同一とし、樹脂流動方向の素線長さLを変化させて計測実験を行った。表8.2は、カップリング部の設置パターンを示している。素線長さの変更は、センサを上下方向にシフトさせて、各6対のカップリング点をⅠ～Ⅵに位置決めすることで実現される。なお、各カップリング部のLの値は、表8.3に示す通りである。

図8.12は、表8.1のNo.2で求めた素線長さLと計測温度の関係を示している。ここでは、センサのLが短いほどセンサ自由端側(Ⅳ～Ⅵ)よりも保持側(Ⅰ～Ⅲ)の温度が低くなり、一方、Lが長いほど両者の温度差が小さくなる傾向が見い出される。一般に樹脂の厚さ方向温度分布は、中心部が高温で、また壁面に向かうほど温度が低下するものと考えられる。このため、保持側においては、中心付近のカップリング部から低温の金型へ素線を介して熱が逃げ、実際の温度よりも低い温度を示すこととなる。逆に自由端側においては、温度の高い中心部の樹脂から素線を介してカップリング部へ熱が移動するために実際よりも高い温度を示すものと推察された。この影響は、図8.12に明示される通りLが短いほど顕著に表れている。これは、Lが短い場合において、素線を介してカップリング部から金型に移動する熱流束が、樹脂から直接あるいは素線を介してカップリング部に向かう熱流束を上回るためと推察される。したがって、熱伝導誤差をできるだけ抑えるためには、Lを同図の実線と破線がほぼ収束する5mm以上に設定する必要があることが示唆される。

表8.2 センサ設置パターン

設置位置	センサカップリング部の組み合わせ										
Ⅰ	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	⑪
Ⅱ	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	⑪	⑫
Ⅲ	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	⑪	⑫	⑬
Ⅳ	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	⑪	⑫	⑬	⑭
Ⅴ	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	⑪	⑫	⑬	⑭	—
Ⅵ	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	⑪	⑫	⑬	⑭	—	—

表8.3 各測定点のパターン素線長さL

カップリング No.	素線長さ L (mm)	カップリング No.	素線長さ L (mm)
①	1.06	⑧	4.56
②	1.56	⑨	5.06
③	2.06	⑩	5.56
④	2.56	⑪	6.06
⑤	3.06	⑫	6.56
⑥	3.56	⑬	7.06
⑦	4.06	⑭	7.56

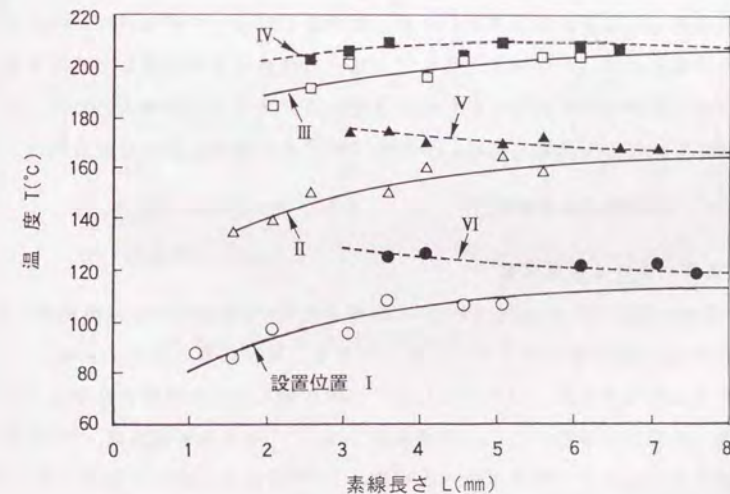


図8.12 パターン素線長さLと温度の関係  
(温度立ち上がりから2秒経過した時点)



## 8.5 型内樹脂温度分布の計測

### 8.5.1 キャビティ厚さ方向樹脂温度の時間変化

#### a. 流動過程における温度変動

型内樹脂温度分布の計測は、図8.8(c)のセンサ設置方法にて、保圧を行わずに計測を行った。8.4.2節の結果を考慮し、熱伝導誤差の影響が小さい $L=5.0$  mm以上のカップリング⑩～⑭と金型内③の温度を評価の対象とした。図8.13(a)(b)は、表8.1のNo.3の4通りの射出率でGPPSを射出して計測した各計測点の温度と圧力の経時変化をそれぞれ示している。計測に用いたカップリング部は、キャビティ厚さ中心を0mm(基準)として、キャビティ内0.15mm(⑩)、0.45mm(⑪)、0.75mm(⑫)、1.05mm(⑬)、1.35mm(⑭)、および金型内の-1.95mm(③)の各位置に設置されている。

すべての射出率において、中央部⑩⑪を除く壁面近傍で、立ち上がり直後から双曲線状の温度低下が始まる。図8.13(a)の $1.5\text{ cm}^3/\text{s}$ では、⑩、⑪において流動過程の後半にわずかな温度上昇が見られる。さらに、すべての射出率において中央部⑩の温度が時間とともに上昇している。低射出率では流動樹脂がキャビティ壁面の冷却効果を受けやすいため、流動後半において壁面近傍では厚い固化層が形成される。その結果、厚さ中央部では流動速度が増加し、固化層境界領域のせん断発熱が促進されるために温度が上昇するものと考えられる。この現象は、中央⑩でも同様に現れ、その結果わずかな温度上昇が認められたと推察される。

#### b. 圧縮過程における温度変動

E-Fの圧縮過程では、 $3.1\text{ cm}^3/\text{s}$ から $13.2\text{ cm}^3/\text{s}$ においてcで示される温度ピークが認められる。cが計測されたカップリング部は、高温状態の厚さ中央部と、GPPSのガラス転移点温度( $T_g=82^\circ\text{C}$ )以下の固化層とのほぼ中間に位置している(以後、中間層と呼称する)。圧縮過程では、(1)樹脂の断熱圧縮、(2)圧縮された樹脂のキャビティ壁面方向への移動、(3)壁面による冷却が同時に起こっているものと推察される。(1)、(2)は樹脂に温度上昇を、(3)は降下をもたらすが、(1)、(2)の中にcの原因が存在するものと推察され、以下にその原

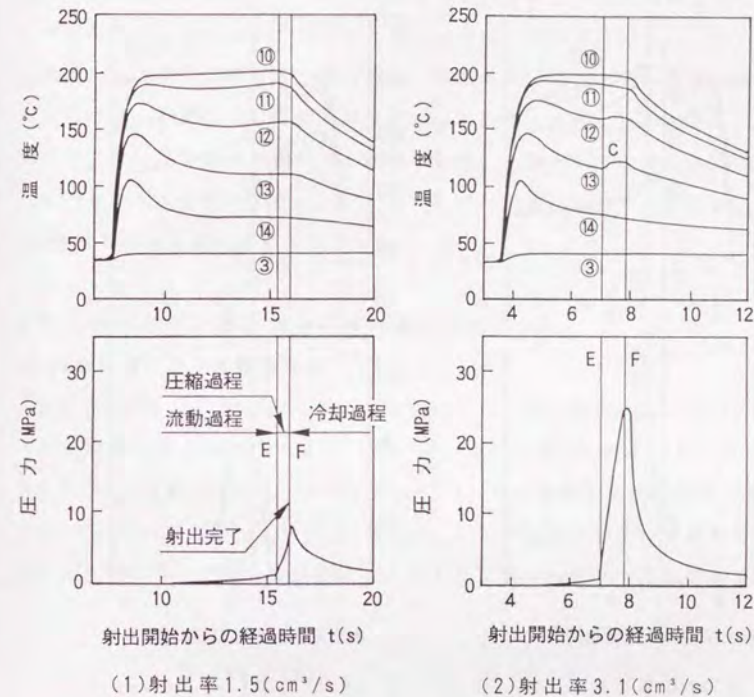


図8.13(a) 射出率を変化させて得られたキャビティ厚さ方向樹脂温度および圧力の経時変化



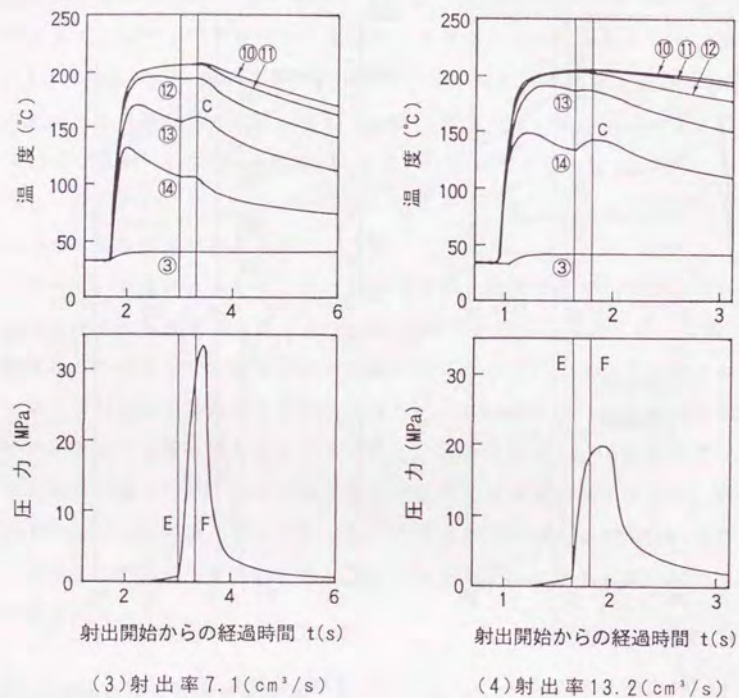


図8.13(b) 射出率を変化させて得られたキャビティ厚さ方向樹脂温度および圧力の経時変化

因についてさらに考察を加えることとする。温度ピークが(1)の断熱圧縮の影響であるとすれば、中央部⑩、⑪においても同様にピークが現れるものと予測される。図8.13(a)(b)の⑩、⑪においてピークが見られないことから、(1)が原因ではないものと判断できる。(2)は、ピーク現象を最も明確に説明することができる。図8.14は、温度ピーク発生原因の説明図である。急峻な温度勾配をもった中間層の熔融樹脂が圧縮を受けた場合、それらの樹脂は図8.14に示すように流動方向とキャビティ壁面方向へ同時に移動する。壁面方向へ高温の樹脂が移動した場合、移動先では温度上昇現象として計測されることとなる。これが温度ピークとして計測されたものと推察される。一例として壁面方向へ $70\mu\text{m}$ ～ $100\mu\text{m}$ 移動したと仮定すると、 $4^\circ\text{C}$ ～ $9^\circ\text{C}$ のピーク値が発生することが図8.13(a)(b)の結果より容易に計算される。

### 8.5.2 キャビティ厚さ方向の樹脂温度分布

#### a. 流動過程における温度分布

図8.15(a)(b)は、射出開始後の各時間における温度分布を示している。金型内温度は固定側 ( $Z = -1.65\text{mm}$ ,  $-1.95\text{mm}$ ) での計測結果を記している。

図8.15(a)の低射出率 ( $1.5\text{cm}^3/\text{s}$ ,  $3.1\text{cm}^3/\text{s}$ ) では放物線形状の温度分布を、図8.15(b)の高射出率 ( $7.1\text{cm}^3/\text{s}$ ,  $13.2\text{cm}^3/\text{s}$ ) では台形状の分布をそれぞれ呈する。これは、速度分布の形状をそのまま反映した結果と推察できる。

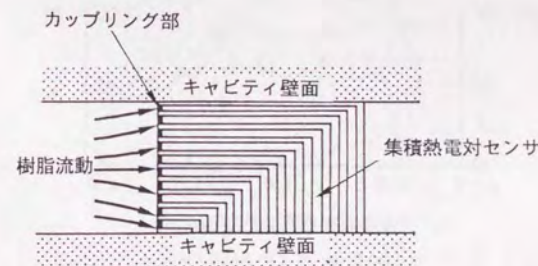


図8.14 温度ピーク発生原因の説明図



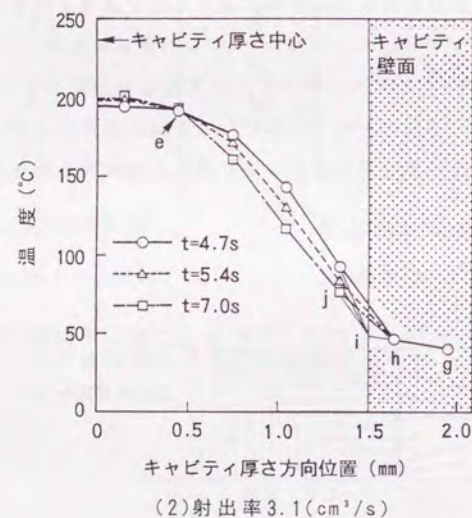
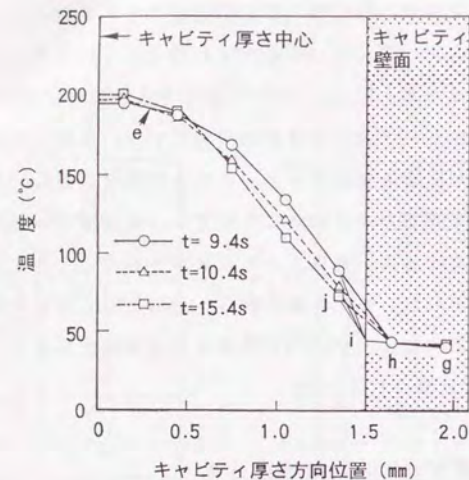


図 8.15(a) 射出率を変化させて得られた流動過程におけるキャビティ厚さ方向樹脂温度分布

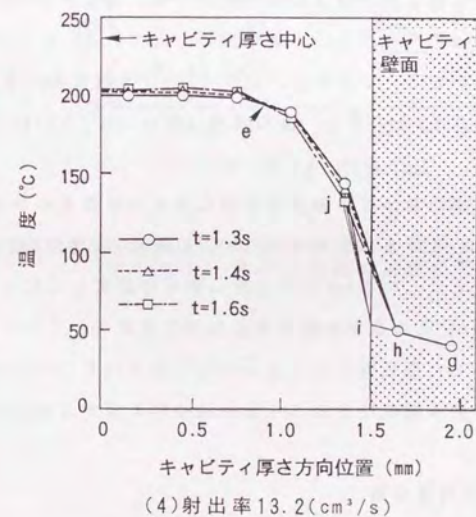
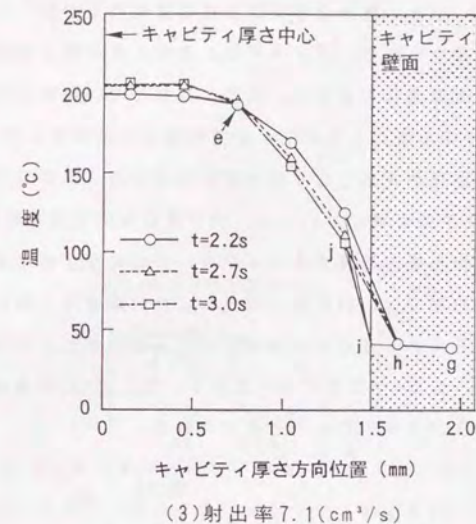


図 8.15(b) 射出率を変化させて得られた流動過程におけるキャビティ厚さ方向樹脂温度分布



すべての射出率の場合に、流動過程において厚さ中央部で $4.5^{\circ}\text{C} \sim 9.0^{\circ}\text{C}$ の温度上昇が認められる。一方、壁面近傍では急速な温度降下が起こり、これは特に低射出率で顕著に認められる。厚さ中央部の温度上昇領域と壁面近傍の降下領域との間には、全流動過程を通じて、温度の変動しない位置eが存在している。位置eは、樹脂のずりせん断により発生する発熱量と金型壁面へ伝導して失われる熱量が釣り合って温度が変化しなくなる定常領域であると推察される。2つの位置eに挟まれた厚さ中央領域においては、同中央領域の速度勾配によって生成する熱量が金型への伝熱量を凌駕する形となり、その結果中央の温度が徐々に上昇する。特に低射出率では、固化層の成長により流動後半において厚さ中央にも速度勾配が生じるため、厚さ中央部においても比較的大きなせん断発熱現象を伴う。その結果、位置eが壁面方向へ移動し、図8.13(a)にも確認されたように厚さ中央部の温度が上昇したものと推察される。

$13.2\text{cm}^3/\text{s}$ の壁面近傍では、 $T_g = 82^{\circ}\text{C}$ 以下の部分がなくなり、見かけ上スキン層が生成されていない結果を示していると考えられる。この場合のように、大きな勾配が存在する壁面近傍の温度分布の検討には、本センサのカップリング部集積度では不十分と考えられる。詳細な検討のためには、h-jの他にh-i-jの補正線を用いる必要がある。すなわち、金型内のg-hを延長し、その延長線とキャビティ壁面との交点をiとすると、真の温度勾配は、h-jとh-i-jの間に存在するものと推察される。

図8.16は、各射出率における圧縮過程直前の温度分布を重ね描きしたものである。射出率が変化しているにもかかわらず、位置eの温度が $191^{\circ}\text{C} \sim 193^{\circ}\text{C}$ の範囲内で一定となり、また、位置e付近の温度勾配もほぼ等しくなっている。これらの結果より、位置e付近の速度勾配も各射出率でほぼ等しくなっていることが推察されるが、こうした類似性が何によってもたらされているかの詳細な検討は、速度分布計測、数値解析を含めた今後の総合的な解析を待たねばならない。

#### b. 冷却過程における温度分布

図8.17(a)(b)は、冷却過程の温度分布を示している。図8.13の圧力特性より明らかなように、冷却過程初期の温度分布には、圧縮樹脂の圧力低下に伴った断熱膨張に起因する温度降下が含まれている。しかし、これらの影響が含まれ

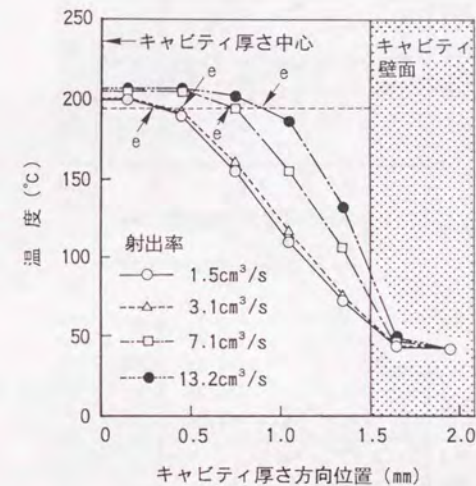
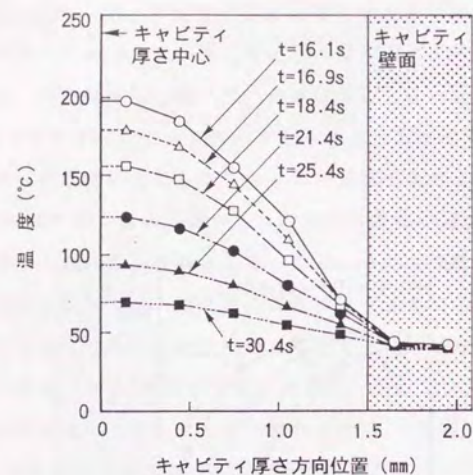
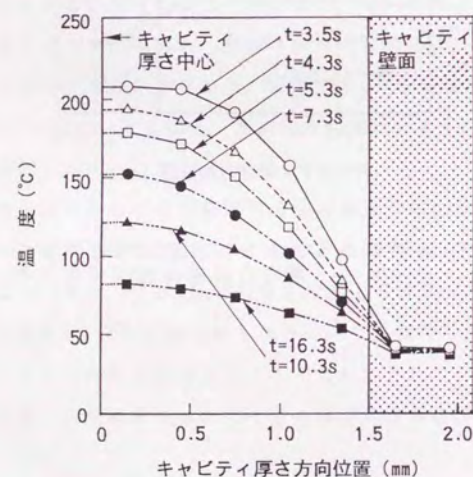


図8.16 各種射出率における圧縮過程直前でのキャビティ厚さ方向樹脂温度分布比較



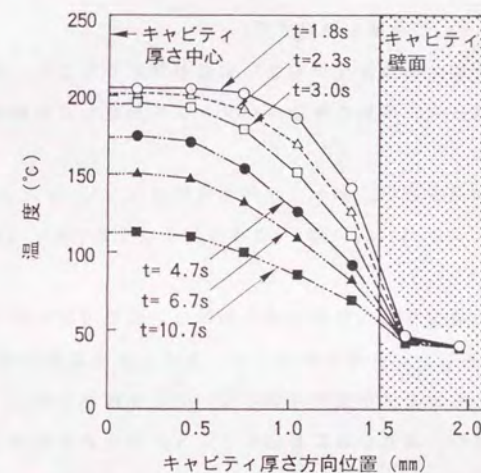


(1) 射出率  $1.5(\text{cm}^3/\text{s})$



(2) 射出率  $7.1(\text{cm}^3/\text{s})$

図8.17(a) 射出率を変化させて得られた冷却過程におけるキャビティ厚さ方向樹脂温度分布



(3) 射出率  $13.2(\text{cm}^3/\text{s})$

図8.17(b) 射出率を変化させて得られた冷却過程におけるキャビティ厚さ方向樹脂温度分布



る冷却初期の実線、点線を除けば、一点鎖線以下の分布形状の遷移は、冷却過程を具体的に示すものと考えられる。すなわち、流動停止直後にキャビティ厚さ全域で冷却が始まり、時間の経過とともに温度の降下および冷却速度の低下が確認される。なお、流動停止後に計測する図8.17(a)(b)の結果には、流動過程と同様に、8.4節で示したセンサの素線部を介した熱伝導誤差因子を伴うため、注意を要する。

## 8.6 結 言

以下に、本章で得られた結論を列記する。

- (1)キャビティ厚さ方向の樹脂温度分布を詳細に計測するために、めっきにより薄いポリイミド基板上に多数の熱電対パターンを形成した集積熱電対センサを提案・試作した。
- (2)センサ特性評価実験を行い、本センサの測定誤差は $\pm 1\%$ 以内で、時定数はポリイミドフィルム厚 $75\mu\text{m}$ 、 $100\mu\text{m}$ の場合、それぞれ $70\text{ms}$ 、 $90\text{ms}$ であることを確認した。
- (3)熱伝導誤差の発生をできるだけ抑えるためには、流動方向に沿う素線長さを $5\text{mm}$ 以上に設定することが必要であること、また上記素線部では、樹脂流動方向に沿ってほとんど温度勾配が生成しないことを確認した。
- (4)射出率の増加に伴い、速度分布に対応するように放物線形状から台形形状へと温度分布が変化することを計測実験により明らかにした。
- (5)金型壁面に奪われる熱量とずりせん断による発熱量とが、流動過程を通じて釣り合って温度が変化しなくなる定常領域が厚さ方向の一定位置に生成すること、その領域に挟まれた厚さ中央部では温度がわずかに上昇することを確認した。
- (6)圧縮過程において、圧縮された溶融樹脂がキャビティ壁面方向に移動するためと考えられるコア層・スキン層境界領域での一時的な温度上昇現象を、計測結果により明らかにした。

本センサは、型内成形現象の解明、および数値シミュレーション結果の検証に対し有効な手段となるものと考えられる。カップリング部集積度のさらなる向上と、耐久性の改善により、本センサの利用範囲が今後益々広がるものと期待される。



## 第9章 ノズル流路内樹脂温度分布の計測

### 9.1 緒言

前章では、キャビティ厚さ方向の樹脂温度分布を計測するために、めっきにより多数の熱電対パターンを薄いポリイミド基板上に形成した集積熱電対センサを新たに提案・試作した。そして流動・圧縮・冷却過程におけるキャビティ厚さ方向の樹脂温度分布計測実験を通して、本センサの有効性を実証した。

本章では、集積熱電対センサをノズル流路内の流動樹脂温度分布計測に応用し、型内成形現象の基本となる上記温度分布変動現象を明らかにすることで、本センサの汎用性を確認する。

射出成形における成形プロセスおよび成形不良現象は、樹脂の温度分布状態と密接な関係があると言われている。そのため、加熱シリンダ内において、いかなる温度分布状態で樹脂が可塑化・計量され、ノズルから射出されるかを把握することは、型内樹脂温度分布計測と併せて重要な課題となっている。特にノズル部は金型の直前に位置しているため、この部分で樹脂温度分布を詳細に計測することは、型内成形現象を解明する上で最も基本的なことと考えられてきた。

ノズル流路内における樹脂温度計測法としては、現在、赤外線放射温度計測法<sup>68), 122)-124)</sup>および超音波温度計測法<sup>73)</sup>、シース熱電対を用いた計測法<sup>125)</sup>が利用されている。赤外線放射温度計測法および超音波計測法は、高い応答性に加えて、樹脂の流れを阻害せずに計測できるなどの優れた特長を有している。しかし、これらは平均温度を計測するものであるため、ノズル流路内半径方向の温度分布計測には適用できないという問題点を有していた。シース熱電対法は、一本の熱電対を流路内に突き出して挿入し計測する場合がほとんどであった。天野らは、シース熱電対を直接流動樹脂の中に挿入した場合に発生する各種誤差を補正し、高精度の計測を行うことに成功した<sup>126)</sup>。かれらは、温度分布計測に対してもシース熱電対を適用したが、その際シース熱電対挿入



位置をその都度移動させるような極めて煩雑な作業を必要とした<sup>127), 128)</sup>。

本章では、上記問題点を解決するために、集積熱電対センサを応用したノズル流路内の樹脂温度分布計測手法を提案する。そして同手法を用いて、可塑化条件、スクリュ計量部溝深さが連続射出動作中のノズル流路内樹脂温度変動に及ぼす影響について検討を行う。

## 9.2 実験方法

### 9.2.1 ノズル流路内温度分布計測装置の基本構造

図9.1は、ノズル部への集積熱電対センサの装着方法を示している。まず、先端部が半割れ構造となっているノズルA上に、本センサを設置する。次にX-Yテーブルを用いて本センサをノズル流路上に精度よく位置決めした後、ノズルカバーBにより挟み込んで固定する。図9.2にノズル流路内温度分布計測装置の外観を示す。組み上がった計測装置は、図9.3に示されるように射出成形機加熱シリンダ先端に装着される。本手法の主な特長を以下に列記する。

- (1) 狭いノズル流路内およびノズル本体内の温度分布を高位置決め精度で一度に計測できる。
- (2) センサの厚さが $100\mu\text{m}$ と薄いため、シース熱電対よりも優れた応答性  
(63.2% 応答に要する時間:  $90\text{ms}$ ) が得られる。

### 9.2.2 計測方法

図9.4は集積熱電対センサの形状・寸法を示している。本センサでは、CuとNiのめっきにより左右対称にパターン形成された28対のカップリング部が、 $8.4\text{mm}$ の測定範囲内に $0.3\text{mm}$ 間隔で配されている。図9.5は、計測装置の断面形状、および本センサの主要寸法、装填位置を示している。本実験では、流路出口から $20\text{mm}$ の位置Cに本センサを装填し、ノズル流路内の他にノズル本体内の温度も計測できるようなカップリング部の配置を行った。各熱電対の生成熱起電力は、前章と同様に、直流増幅器（共和電業㈱：DA-510B）を通してトランジェントメモリ（㈱エレクトロニカ：ELK-6000）に記録した。

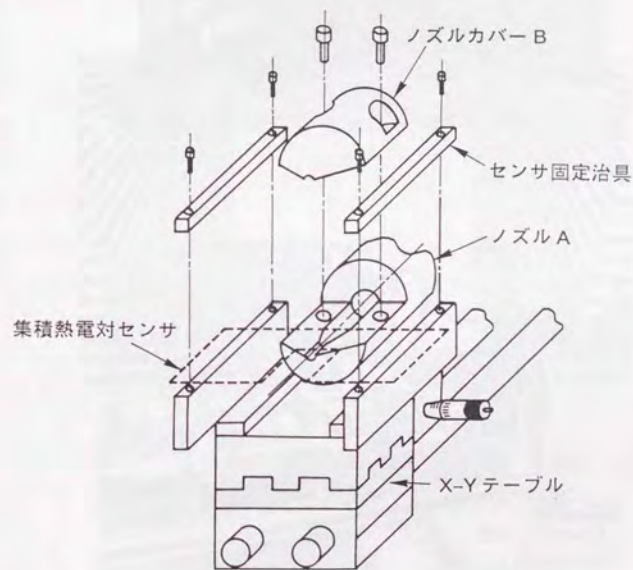


図9.1 ノズル部への集積熱電対センサ装着方法



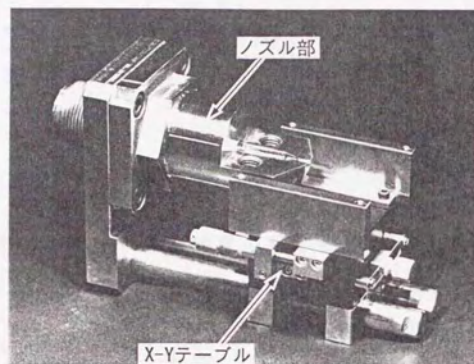


図9.2 ノズル流路内温度分布計測装置の外観

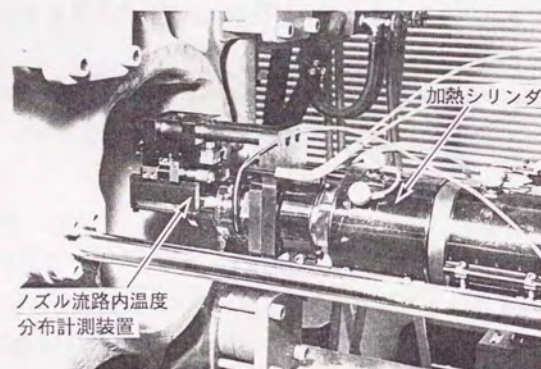


図9.3 実験装置の外観

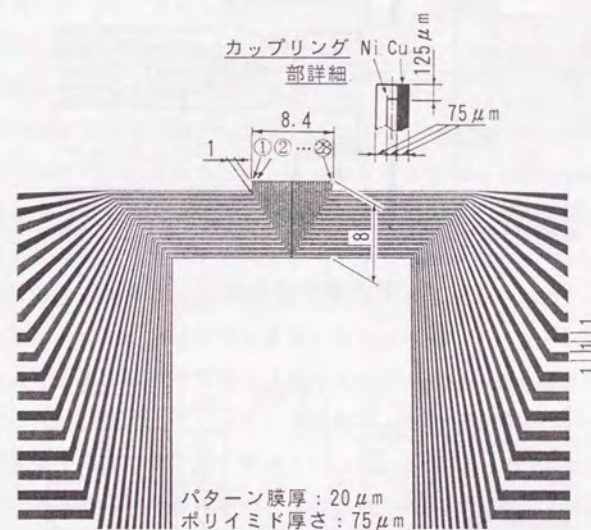
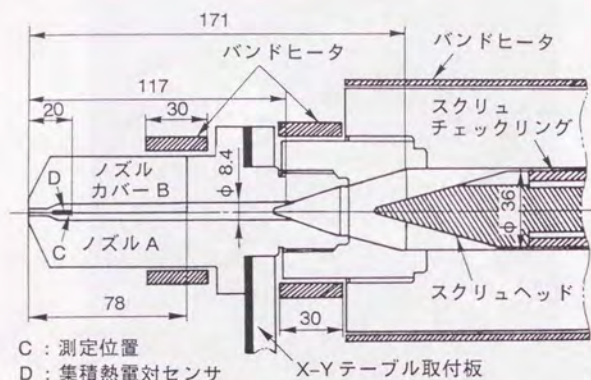
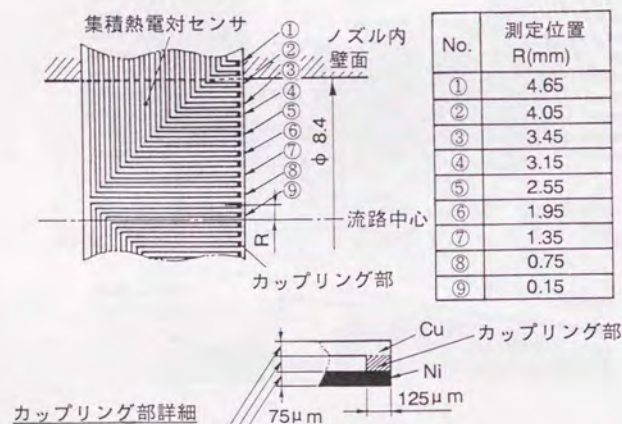


図9.4 集積熱電対センサの形状・寸法 (単位: mm)





(a) 計測装置の断面



(b) センサ設置位置

図 9.5 計測装置の基本構造およびセンサ設置位置 (単位: mm)

### 9.2.3 実験条件

表 9.1 は、本実験で使用したスクリュの諸元を示している。本研究では、スクリュ供給部溝深さを 6.5mm 一定として、計量部溝深さを 3.3mm、2.0mm の 2 通りに変化したスクリュで評価を行った。本実験では、5 箇所に半円形の樹脂通過溝が設けられたスクリュヘッドを用いた。実験に使用した射出成形機は、東洋機械金属製の Ti-80G (型締力 80tonf) である。

表 9.2 に本実験の可塑化条件を示す。本研究では、計量回転速度、計量ストローク、滞留時間を変化させて評価を行った。実験には、ブレイクアップ等の可塑化不良現象の発生が問題となっているポリプロピレン PP (三井石油化学工業株: ハイボール J900) を使用した。本実験では金型内への射出は行わず、クッション量をゼロとした空射状態で計測を行った。計量中の樹脂流出を防ぐために、本装置にはノズル外部からのシャットオフ機構が備わっている。計量・射出のサイクルを 40 回繰り返し、温度分布計測を行った。その際、計量過程の前後には、それぞれ 5 秒と 6 秒の休止時間が設定されている。また本章では、リザーバ内における樹脂の滞留時間が温度分布に及ぼす影響についても検討を行った。具体的には、計量と射出過程との間に、上記休止時間とは別に 20 秒、40 秒の滞留時間をそれぞれ設定し、計測を行った。ただし、計量回転速度およびストローク、スクリュ計量部溝深さの影響検討実験では、滞留時間は 0 秒とした。

## 9.3 実験結果および考察

### 9.3.1 ノズル流路内樹脂温度のショット間変動

図 9.6 は、40 回連続射出動作を行ったときの、射出開始 7 秒後における樹脂温度とショット回数との関係を示している。計測位置は  $R=1.95\text{mm}$  である。計測に際しては、加熱シリンダ内の樹脂をパージによりほとんど空にした状態から実験を開始した。計測開始後すぐに温度が低下し始め、10 ショット目以降において温度が安定する傾向を示している。以上の結果に基づき、本研究では 40 ショット分の計測結果の中から、温度が安定する 20 ショット目以降の 15 ショット分のデータを評価の対象として以後の検討を進めることとした。具体的には、各計測位置での射出開始から任意時間経過時における温度を、それぞれ 15 ショット



表9.1 実験に使用したスクリュ形状  
(単位: mm)

スクリュ径	φ36
スクリュ溝深さ (計量部/供給部)	3.3/6.5 2.0/6.5
スクリュピッチ	35
スクリュゾーン長さ (計量部/圧縮部/供給部)	150/220/350

表9.2 可塑化条件

加熱シリンダ温度(°C)	200
射出率(cm <sup>3</sup> /s)	6.6
計量回転速度(rpm)	30, 60, 90, 120, 150
計量ストローク(mm)	25, 50, 75, 150
スクリュ背圧(MPa)	0
滞留時間(s)	0, 20, 40

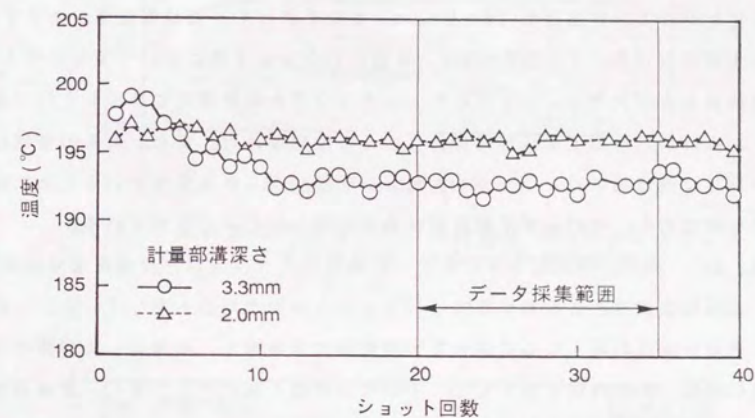


図9.6 ノズル流路内樹脂温度とショット回数の関係 (測定位置:  
R=1.95mm, 計量回転速度: 90rpm, 計量ストローク:  
50mm, 滞留時間: 0s, 射出開始からの経過時間: 7.0s)



ト分抽出し、それらから算出された標準偏差 $1\sigma$ を温度偏差とみなすこととした。

### 9.3.2 計量回転速度の影響

図9.7は、スクリュ計量部溝深さ3.3mm、計量回転速度90rpm、滞留時間0秒の条件で計測した、20ショット目のノズル流路内樹脂温度の経時変化を示している。温度が立ち上がった直後の $T=1s$ から $2s$ の間は比較的平坦な温度状態を示し、その後 $R=1.95mm$ の位置でうねり状の温度変動が現れる。また、射出後半に向かうにしたがって、壁面近傍( $R=4.05mm$ )を除くすべての領域で温度が低下する傾向を示している。ここで $T=2s$ は、直前の19ショット目において流出せずノズル流路内およびスクリュヘッドとチェックリングとの隙間内に残留していた樹脂が、ほぼ射出を完了する時刻に相当すると推定された。またこれらの樹脂は、狭い部分で長時間にわたりノズル・加熱シリンダから熱を受けているために均熱化されており、その結果平坦な温度状態を示したものと推察される。

図9.8に、計量回転速度を変化させて計測したノズル流路内樹脂温度分布を示す。同図の温度は、各計測位置での15ショット分の平均値を示している。一般に計量回転速度が高くなるに伴って可塑化能力が増加し、結果として樹脂の可塑化に必要な所要時間が短くなる。そのため熔融不足が生じやすく、壁面近傍を除き全域で温度低下が起こっているものと推察される。

図9.9は、15ショットのデータから求めたノズル流路内各位置での温度偏差を示している。(a)は射出開始からの経過時間の影響を、(b)は計量回転速度の影響を示している。両者とも、図9.7においてうねり状の温度変動が見られた $R=1.95mm$ の位置で、温度偏差がピークを形成し、流路中央および壁面に近づくほど温度偏差が減少する傾向を示している。ピーク値は、射出の後半に向かうほど、また計量回転速度が高くなるほど、流路中央( $R=0.2mm$ )および壁面付近( $R=3.8mm$ )を除くすべての領域で増加傾向を示している。これらの原因については、9.4節で詳細に検討することとする。

### 9.3.3 計量ストロークの影響

図9.10は、計量ストロークを100mmに設定して計測した、25ショット目の樹脂

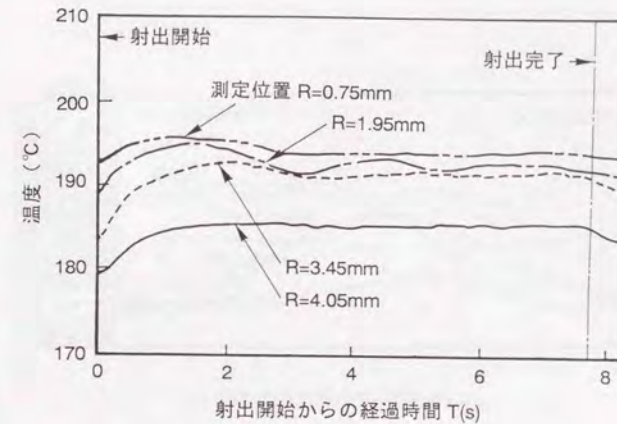


図9.7 ノズル流路内樹脂温度の経時変化(20ショット目、スクリュ計量部溝深さ: 3.3mm、計量回転速度: 90rpm、滞留時間: 0s)

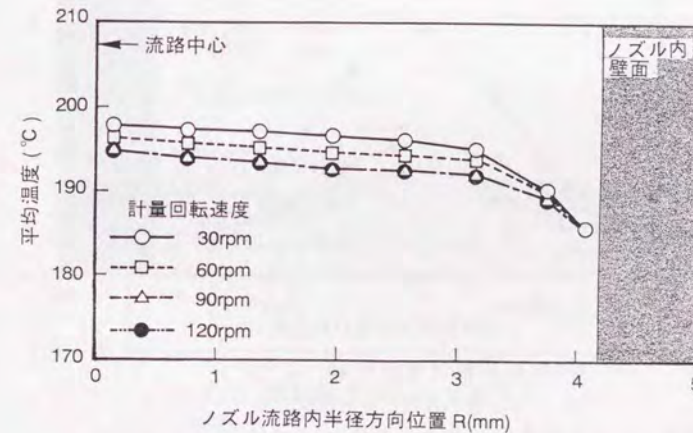
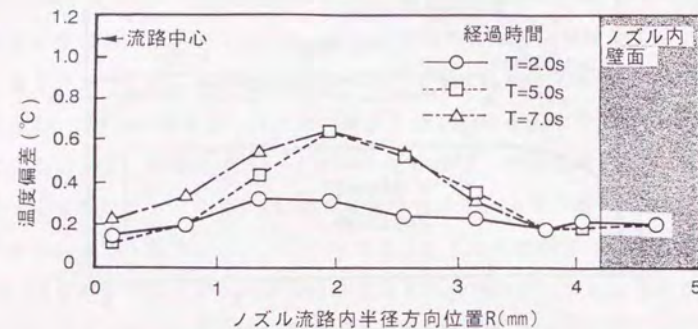
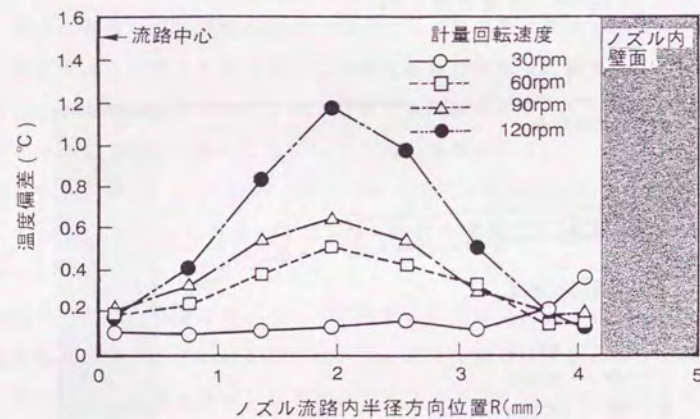


図9.8 ノズル流路内半径方向の樹脂温度分布(スクリュ計量部溝深さ: 3.3mm、計量ストローク: 50rpm、滞留時間: 0s、射出開始からの経過時間: 7.0s)





(a) 射出開始からの経過時間の影響  
(計量回転速度: 90rpm)



(b) 計量回転速度の影響  
(射出開始からの経過時間: 7.0s)

図9.9 ノズル流路内半径方向の樹脂温度偏差分布 (スクリュ  
計量部溝深さ: 3.3mm, 計量ストローク: 50mm,  
滞留時間: 0s)

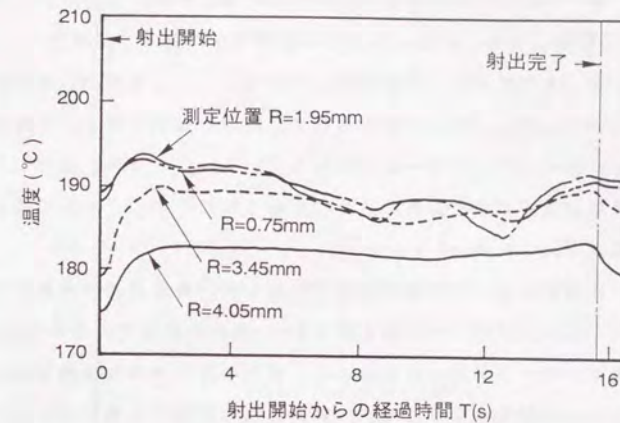


図9.10 計量ストローク100mmにおけるノズル流路内樹脂  
温度の経時変化 (25ショット目, スクリュ計量  
部溝深さ: 3.3mm, 計量回転速度: 90rpm,  
滞留時間: 0s)

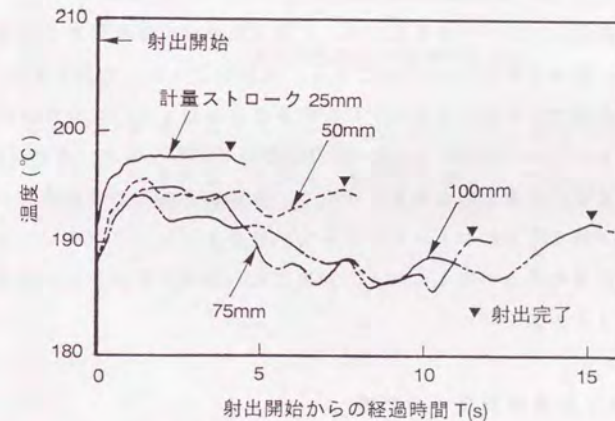


図9.11 各種計量ストロークにおけるノズル流路内樹脂  
温度の経時変化 (25ショット目, 測定位置: R=  
1.95mm, スクリュ計量部溝深さ: 3.3mm, 計量回転  
速度: 90rpm, 滞留時間: 0s)



温度の経時変化を示している。壁面近傍 ( $R=4.05\text{mm}$ ) を除く流路中央部では、流動中半から後半にかけてうねり状の温度低下が見られる。このうねりは、特に  $T=8\text{s}$  以降で顕著になっている。スクリュ溝容積を計算した結果から、上記時間帯は、前ショットでスクリュ圧縮部内にとどまっていた樹脂が、次の計量過程を経て射出される際に、センサ部を通過する時刻と推定される。圧縮部では溝深さがホッパ側に向かって徐々に深くなっている。このため、加熱シリンダからの移入熱量が溝内の樹脂全体に十分に伝達されにくいことが、こうした温度低下の原因と考えられる。

図9.11に、計量ストロークを変化させて計測した、樹脂温度の経時変化を示す。ここでは、温度偏差がピーク値を示す  $R=1.95\text{mm}$  の位置での結果のみを掲げている。計量ストロークが  $25\text{mm}$  の場合には、変動のない平坦な温度状態を示す。しかし、ストロークが長くなるに伴い、射出過程の中程から後半にかけて温度変動および低下が著しくなっている。またこれとは別に、壁面近傍 ( $R=4.05\text{mm}$ ) では計量ストロークが変化しても、図9.10と同様のうねりのない平坦な温度状態を示すことも確認されている。これらの原因については、9.4節で詳細に検討することとする。

図9.12は、計量ストロークを変化させて計測した場合の温度偏差の経時変化を示している。計量位置は  $R=1.95\text{mm}$  である。同図のように、計量ストロークが長く、また射出後半へ向かうにしたがい温度偏差は増加する。この原因は以下のように考えることができる。すなわち、1計量サイクルの間で、最初に計量される樹脂は、最後に計量される樹脂に比べて、計量ストローク分だけ長くスクリュで可塑化されることになる。したがって、計量ストロークが長くなるほど、両者の可塑化状況の差異が大きくなり、温度不均一領域の生成および温度低下現象をもたらすと推察された。

### 9.3.4 スクリュ計量部溝深さの影響

図9.13は、計量部溝深さ  $2.0\text{mm}$  のスクリュにおける樹脂温度の経時変化を示している。 $T=6\text{s}$  以降に、 $R=1.95\text{mm}$  の位置で若干の温度低下が見られる。 $T=6\text{s}$  は、前ショットで圧縮部にとどまっていた樹脂が、計量過程を経て射出され

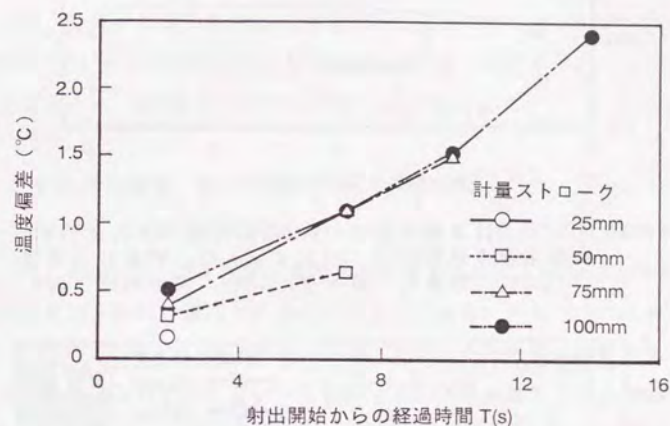


図9.12 各種計量ストロークにおけるノズル流路内樹脂温度偏差 (測定位置:  $R=1.95\text{mm}$ , スクリュ計量部溝深さ:  $3.3\text{mm}$ , 計量回転速度:  $90\text{rpm}$ , 滞留時間:  $0\text{s}$ )



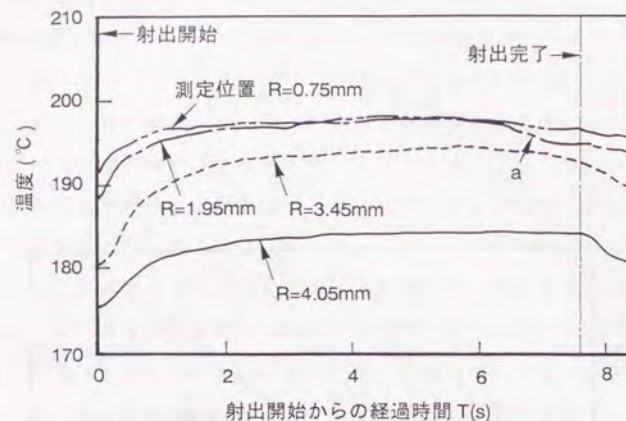


図9.13 スクリュ計量部溝深さ2.0mmにおけるノズル流路内樹脂温度の経時変化(25ショット目, 計量回転速度: 120rpm, 計量ストローク: 50mm, 滞留時間: 0s)

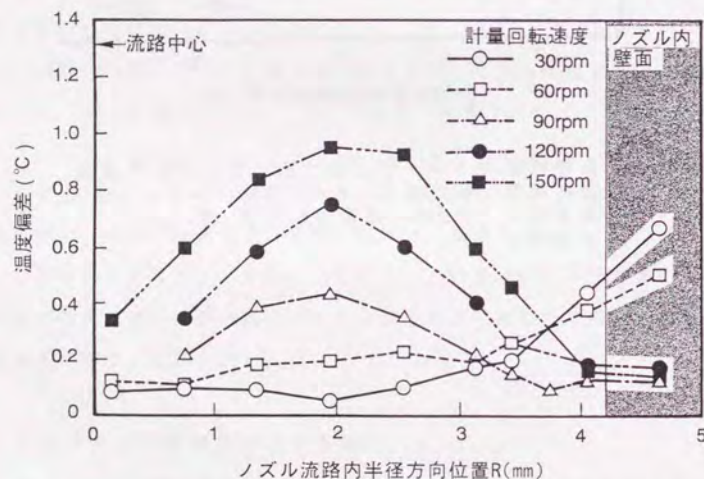


図9.14 スクリュ計量部溝深さ2.0mmにおけるノズル流路内半径方向の樹脂温度偏差分布(計量ストローク: 50mm, 滞留時間: 0s, 射出開始からの経過時間: 7.0s)

ンサ部を通過し始める時刻と推定される。したがって、前節と同じ理由により温度低下が起こったものと推察される。また、計量部溝深さ2.0mmでは、3.3mmの場合に比べてかなり平坦な温度状態を示している。これは、スクリュ計量部溝深さが浅く、(1)スクリュ溝の内部まで均熱化が進みやすいこと、(2)計量時間が長くなることに起因すると考えられる。また、ここには示されていないが、計量ストロークが長くなるにしたがい、計量部溝深さ3.3mmと同様に後半の温度低下が激しくなることも確認されている。

図9.14に、計量回転速度を変化させて計測した温度偏差分布を示す。この場合も溝深さ3.3mmのときと同様に、 $R=1.95\text{mm}$ の位置で温度偏差はピーク値を示し、その値は同3.3mmの場合の60%~70%となっている。

### 9.3.5 滞留時間の影響

図9.15は、スクリュ計量部溝深さ2.0mmにおいて樹脂滞留時間を変化させて計測した、射出開始から7秒後の温度偏差分布を示している。20秒以上の滞留時間により温度偏差分布が一様に平坦化していることから、リザーバ内の樹脂温度もほぼ均一になっているものと推察される。また、このときの流路中央付近の樹脂温度は、射出過程後半においても低下せず、ノズル設定温度と同じ200℃を示すことが確認されている。

### 9.4 温度偏差ピークの発生機構

スクリュ計量部溝深さ、計量回転速度、計量ストロークにかかわらず、(1)温度偏差が $R=1.95\text{mm}$ の位置で最も大きくなること、(2)射出後半に向かうほどその値が大きくなることが確認された。この原因を、図9.16を用いて考察する。

同図は、前節で得られた結果、および横井らのガラスインサートシリンダヘッドによるリザーバ内樹脂挙動の可視化実験結果<sup>12,9)</sup>に基づき、計量・射出中のノズル・リザーバ内樹脂温度分布状況を推定したものである。前ショットにおいて(a)のようにスクリュヘッドとチェックリングとの間の狭い隙間等に滞留していた均一な温度の樹脂①が、(b)において計量開始と同時に最初にリザーバ内に流入する。引き続き、スクリュ計量部溝内で待機していた樹脂②よりも温



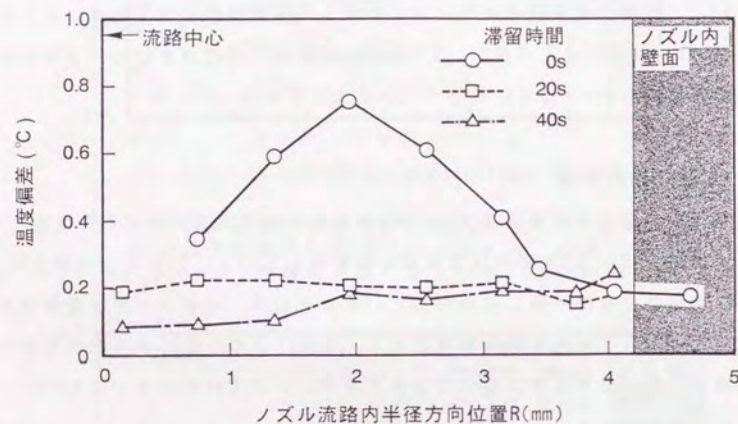


図9.15 滞留時間を変化させて得られたノズル流路内半径方向の樹脂温度偏差分布 (スクリュ計量部溝深さ: 2.0mm, 計量回転速度: 120rpm, 計量ストローク: 50mm, 射出開始からの経過時間: 7.0s)

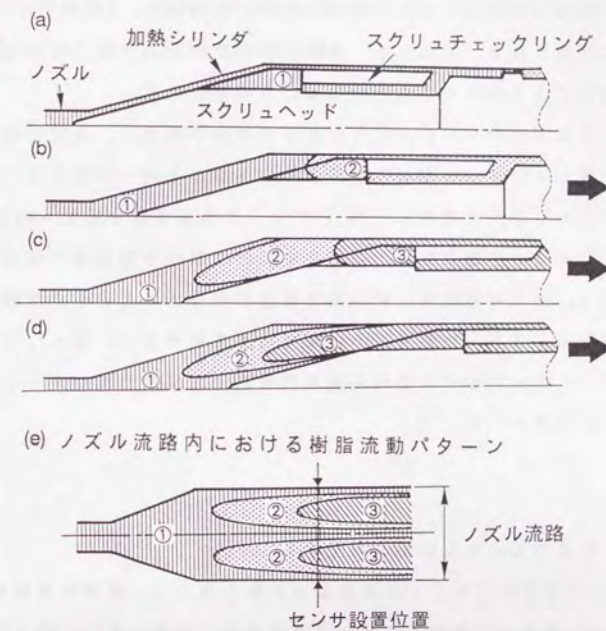


図9.16 計量・射出過程におけるノズル・リザーバ内樹脂温度分布状況の推定図



度が不均一な樹脂②が(c)のようにリザーバ内に流入してくると、樹脂①はスクリュヘッド先端方向に押し流される。一方、スクリュヘッド先端近傍の樹脂は、スクリュヘッドとともに回転しながら後退し、ノズル先端方向へは移動しないことが横井らによって報告されている<sup>129)</sup>。したがって、この場合スクリュヘッド近傍には、温度の均一な樹脂①が分布しているものと考えられる。さらに、スクリュ圧縮部に滞留していた溶融の不十分な樹脂③が、(d)のように樹脂②と同様にして計量される。このとき、加熱シリンダ内壁面付近の樹脂は、シリンダからの伝熱により均熱化されているものと推察される。

以上のようなプロセスで計量された樹脂が射出されると、温度の均一な樹脂①が流路中央およびノズル壁面近傍を通り、温度の不均一な樹脂②、③がその間に侵入する形で順次通過する(e)に示すような流動挙動を示すものと推定された。こうした樹脂の流動挙動は、ノズル中心と壁面の中間位置で温度偏差が最大となること、また時間経過に伴い温度偏差が増加することを合理的に説明することができる。なお、流動過程の大幅な温度変動現象は、恐らくソリッドベットのブレイクアップ等の可塑化不安定現象が上記樹脂流動パターンに重畳しているものと想像される。

## 9.5 結言

以下に、本章で得られた結論を列記する。

- (1)40ショットのポリプロピレン連続射出実験を通じて、集積熱電対センサを用いたノズル流路内の樹脂温度分布計測手法が、可塑化条件、およびスクリュ形状の評価に対し有効であることを実証した。
- (2)スクリュ計量部溝深さ、計量回転速度、計量ストロークにかかわらず、ショット中の温度偏差は、ノズル流路中央と流路内壁面との中間に当たる約2mmの位置でピーク値を示す。そして、計量部溝深さが小さく、射出過程の後半に向かうほど、さらに、計量ストロークが長くなるほどその値が増加することを明らかにした。
- (3)リザーバ内における樹脂の滞留時間が長くなるに伴い、温度偏差分布が平坦化することを明らかにした。

- (4)上記温度偏差のピーク値と流動過程での温度変動を、計量過程におけるリザーバ内での樹脂配置状況、およびその後の射出過程におけるノズル流路内樹脂流動挙動と密接に関係づけるモデルを提示した。

本研究では、空射状態での計測実験にとどまっている。ここで計測された温度偏差分布の樹脂が金型内に射出された場合に、成形品にいかなる影響が及ぶかを具体的に検討することが、今後の課題と考えられる。そのためには、本センサの耐久性のさらなる改善が期待される。



（The left page contains faint, illegible text, likely bleed-through from the reverse side of the paper. The text appears to be organized into several paragraphs, but the characters are too light to transcribe accurately. It seems to follow a similar structure to the right page, with a title followed by a list of items and a concluding paragraph.)

— 総 括 —

（The right page contains faint, illegible text, likely bleed-through from the reverse side of the paper. The text appears to be organized into several paragraphs, but the characters are too light to transcribe accurately. It seems to follow a similar structure to the left page, with a title followed by a list of items and a concluding paragraph.)



本研究を始める動機となったのは、プラスチック製品が生活必需品として、すっかり定着しているにもかかわらず、その最も重要な加工法の一つである射出成形の型内成形現象解明および成形理論の体系化が著しく遅れている実状に憂いを覚えたことにある。これは、従来の実験解析法が、断熱材に近い粘弾性体である樹脂が主役となる複雑な型内成形現象の解明に対して十分に寄与できる技術レベルに達していなかったことに起因する。

型内成形現象の解明には、型内樹脂流動挙動および型内ガラス繊維配向挙動、樹脂圧力・温度状態を、点ではなく面情報として詳細に観測することが重要と考えられる。本研究では、ブラックボックスとなっていた型内成形現象の系統的、定量的な解明および成形理論の体系化を達成するための重要な第一ステップと考えられる、これまでにない(1)耐久性と汎用性を有した可視化金型の開発、(2)実際の成形運転下で利用できる型内ガラス繊維配向挙動の動的可視化手法の確立、(3)キャビティ面圧分布、およびキャビティ厚さ方向の樹脂温度分布の計測手法確立を行った。そして、各種実験解析法を用いて得られた成形現象の実験解析結果は、それらの完成度の高さを充分に実証するものとなった。

本総括では、まず第1節において各部で得られた成果を要約して整理し、本論文の結論とする。つぎに、第2節では、本研究で新たに確立した実験解析法と、従来の実験解析法との比較検討を行い、本実験解析法の特長と課題についてまとめる。さらに、第3節において各種実験解析法を用いて得られた解析結果の活用法について述べた後、最後に第4節で各種実験解析法の今後の展望をまとめ、本論文の総括とした。

## 1. 各部のまとめ

### 1.1 第I部で得られた結論

#### ー第1章ー

(1)従来のガラスインサート金型をベースとして、さらに改良を加えた、実成形条件下で発生する各種成形現象の可視化に適用できる広域のガラスキャビティ面と、各種キャビティ形状における観察に対応できる入れ子構造を有する汎用ガラスインサート金型を提案・試作した。



(2)ガラスと金属の両キャビティ面における流動挙動差を、中央部に薄肉部を有する偏肉キャビティを用いて、両者のウェルドライン生成パターンを比較することにより定量的に評価した。その結果、キャビティの片面にガラスブロックを挿入しても、30℃から70℃の広い型表面温度に対して、0.6mmの薄肉部を含むキャビティ内樹脂流動パターンにほとんど影響を与えないことを実証した。

(3)型表面温度をGPPSのTg点よりも20℃低い温度以上に設定した場合には、0.6mmの薄肉部のガラス面と金属面間に明らかな圧力差を生成するが、それ以下の通常の適用金型温度設定においては、その圧力差も低減され、ガラスキャビティ面の影響をほとんど無視できることを実証した。

## －第2章－

(1)ショートショットのフローフロントは、射出完了後の型内冷却過程において変位し、①全前進量の60%以上を占める、スプルー、ランナー内で圧縮された樹脂の圧力開放による前進、②樹脂の冷却収縮による後退、③一部の結晶性樹脂(PP、POM)に見られるフロント部の局所変形による前進が連続、あるいは重畳された形態をとることを明らかにした。

(2)フローフロント部の局所変形③は、冷却過程におけるスキン層と、スキン層に隣接する内層部との冷却時間差により、表面を凸状に反らせる力が発生するために引き起こされ、これによりフローフロントのコア部溶融樹脂を前方に押した結果、くびれが生成することを明らかにした。

## －第3章－

(1)低射出率の場合を除いて、ランナー分岐部通過後のフローフロント前進速度は、樹脂種類・成形条件に依らず一定となることを明らかにした。これら結果は、各キャビティへの樹脂流入タイミングが、ランナー分岐部における樹脂の飛び出し形状のみによって支配されることを示唆している。

(2)ランナー分岐部での飛び出し形状は、射出率には依存せずに、フィラー充填の有無とその形状に依存する。特にフィラーの充填率、およびアスペクト比の増加に伴い、流動方向に大きく飛び出す傾向を示すことを明らかにした。

(3)ランナー分岐部での飛び出し形状差は、樹脂のダイスウェル特性に依存せず、分岐部でのフィラー配向状態とフィラー間の凝集力に依存する。流動方向にフィラーが強く配向するほど、また凝集力が強くなるほど、流動に対して垂直方向にフィラーがファウンテンフローしにくくなるため、流動方向に飛び出すというモデルを提示した。

## －第4章－

(1)汎用ガラスインサート金型を用いた画像計測とウェルドライン形状測定により、樹脂種類および成形条件、キャビティ形状、キャビティ厚さの変化にかかわらず、フローフロント会合角が120°～150°になった時点でウェルドラインが消失することを実証的に明らかにした。

(2)圧力計測により、上記ウェルドライン消失会合角が、フローフロント会合部近傍における樹脂圧力状態に依存し、同部における圧力が高いほど消失会合角が小さくなることを明らかにした。

(3)2つのファウンテンフロー会合部曲面、主にキャビティ壁面近傍曲面の、2次元展開によって生じる余剰表面積がウェルドラインを形成するという生成機構モデルを提示した。

## 1.2 第Ⅱ部で得られた結論

### －第5章－

(1)汎用ガラスインサート金型をさらに発展させたバックライト金型方式の可視化手法を提案した。そして、両キャビティ面をガラス面としてもガラス繊維配向層の形成過程には本質的な影響をもたらさないこと、および本手法がGPPSにおいて25wt%までの高繊維含有率の可視化実験に適用可能であることを示した。



- (2)GPPSと0.1wt%~0.2wt%のNiめっきガラス繊維( $\phi 24\mu\text{m}$ 、 $\phi 60\mu\text{m}$ )を用いた型内ガラス繊維配向挙動の動的観察実験を通して、本成形条件範囲では、射出率・繊維径・キャビティ厚さによらず、キャビティ厚さ方向に互いに交差した配向分布を示す7層の配向層が形成され、その際、キャビティ厚さ中央部のコア層は常に流動に対し直交の配向傾向を示すことを明らかにした。
- (3)固化領域では、流動方向に配向分布する最外層のスキン層Ⅰ、流動方向には垂直に配向分布するスキン層Ⅱの2つの配向層が形成されること、特にスキン層Ⅰではキャビティ厚さの増加に伴い流動方向への配向がより明瞭になることを明らかにした。一方、流動領域では、キャビティ厚さ方向の速度勾配変化が繊維配向状態を規定し、低速度勾配の中心領域は流動に直交配向のコア層を、その両側の高速度勾配領域は流動方向へ配向する中間層を形成することを実証的に明らかにした。

#### －第6章－

- (1)ゲートからキャビティ末端までのガラス繊維回転挙動を連続可視化できる、改良型バックライト方式金型と繊維追跡撮影装置から構成される新しい観察手法を提案した。
- (2)コア層の繊維は、ゲート流出直後、拡大流の影響を受け、流動方向に対して平行から垂直に配向角を変える。そして、その後、拡大流の影響が弱くなった平行流領域で、キャビティ厚さ方向の速度勾配の平坦な部分を、流動方向に垂直な配向角を維持したまま流動することを明らかにした。
- (3)中間層の繊維が、キャビティ壁面近傍において拡大流よりもせん断流の支配を強く受けるため、全流動過程を通して、流動方向に対して平行な配向を維持することを明らかにした。
- (4)スキン層の配向状態は、フローフロント内部で繊維がファウンテンフローする経路に依存する。すなわち、フローフロント表層部をファウンテンフローする繊維がスキン層Ⅰを、また内層部を移動する繊維がスキン層Ⅱを形成することを定量的に実証した。

### 1.3 第Ⅲ部で得られた結論

#### －第7章－

- (1)圧力伝達ピンアレイと圧力分布計測用触覚センサから構成される新しいキャビティ面圧分布計測手法を提案した。
- (2)触覚センサ出力特性の評価実験を行い、各感圧部間の出力誤差(バラツキ)が $\pm 6\%$ 以内(標準偏差 $1\sigma$ )であること、また本センサの圧力測定範囲を広げるためには、センサ周辺温度を $35^{\circ}\text{C}$ 以下に制御する必要があることを確認した。さらに、水晶圧電式圧力センサを用いた実成形中における触覚センサ出力の圧力への変換方法を提案し、その有効性を実証した。
- (3)LDPEにおいて保圧時間を変化させてキャビティ面圧分布計測実験を行い、ゲートシール時間よりも保圧時間が長い場合にはキャビティ末端部から圧力降下が始まる過程を、逆に保圧時間が短い場合には、樹脂の逆流によりゲート付近から圧力降下が始まる過程を、面圧分布の経時変化として実証的に明らかにした。

#### －第8章－

- (1)キャビティ厚さ方向の樹脂温度分布を詳細に計測するために、めっきにより薄いポリイミド基板上に多数の熱電対パターンを形成した集積熱電対センサを提案・試作した。
- (2)センサ特性評価実験を行い、本センサの測定誤差は $\pm 1\%$ 以内で、時定数はポリイミドフィルム厚 $75\mu\text{m}$ 、 $100\mu\text{m}$ の場合、それぞれ $70\text{ms}$ 、 $90\text{ms}$ であることを確認した。また、熱伝導誤差の発生をできるだけ抑えるためには、流動方向に沿う素線長さを $5\text{mm}$ 以上に設定することが必要であること、また上記素線部では、樹脂流動方向に沿ってほとんど温度勾配が生成しないことを確認した。



(3)射出率の増加に伴い、流動速度分布に対応するように放物線形状から台形形状へと温度分布が変化する様子を捉えた。また、金型壁面に奪われる熱量とずりせん断による発熱量とが、流動過程を通じて釣り合って温度が変化しなくなる定常領域が厚さ方向の一定位置に生成すること、さらに、その領域に挟まれた厚さ中央部では温度がわずかに上昇することを確認した。

(4)圧縮過程において、圧縮された溶融樹脂がキャビティ壁面方向に移動するためと考えられるコア層・スキン層境界領域での一時的な温度上昇現象を計測結果により明らかにした。

## －第9章－

(1)40ショットのポリプロピレン連続射出実験を通じて、集積熱電対センサを応用したノズル流路内の樹脂温度分布計測手法の有効性を示した。

(2)スクリュ計量部溝深さ、計量回転速度、計量ストロークにかかわらず、ショット中の温度偏差は、ノズル流路中央と流路内壁面との中間に当たる約2mmの位置でピーク値を示す。そして、計量部溝深さが小さく、射出過程の後半に向かうほど、さらに、計量ストロークが長くなるほどその値が増加することを明らかにした。さらに、リザーバ内における樹脂の滞留時間が長くなるに伴い、温度偏差分布が平坦化することを明らかにした。

(3)上記温度偏差のピーク値と流動過程での温度変動を、計量過程におけるリザーバ内での樹脂配置状況、およびその後の射出過程におけるノズル流路内樹脂流動挙動と密接に関係づけるモデルを提示した。

## 2. 本研究で確立した各種実験解析法の総合評価

本節では、本研究で新たに確立した各種実験解析法と従来法とを総合的に比較することにより、本手法の特長および今後の課題について整理する。

### 2.1 型内樹脂流動挙動の実験解析法

表1は、型内樹脂流動挙動の実験解析法を相互に比較したものである。静的可視化法では、成形品任意断面での高精度の内部流動情報を得ることができる。

表1 型内樹脂流動挙動の実験解析法

静的可視化法	動的可視化法	実験	観察方向・観察形態	抽出可能な情報	観察可能な流動過程	リアルタイム観察	観察可能なキャビティ面積(mm <sup>2</sup> )	計測装置・金型の耐圧性	使用可能な樹脂温度範囲	キャビティ形状の変更しやすさ
シミュレーション	シミュレーション	実際の成形運転時ノズルシミュレーション(キャビティシミュレーション等使用)	任意	外層部	流動	不可	—	高	高	—
着色材埋込法	着色材埋込法	シミュレーション(キャビティシミュレーション等使用)	任意	内層部	流動	不可	—	高	高	—
着色材埋込法	着色材埋込法	シミュレーション(キャビティシミュレーション等使用)	任意	内層部	流動	不可	—	高	高	—
2 シリンドラ	2 シリンドラ	実際の成形運転時ノズルシミュレーション(キャビティシミュレーション等使用)	任意	内層部	流動/保圧	不可	—	高	高	—
ゲート	ゲート	シミュレーション(キャビティシミュレーション等使用)	任意	内層部	流動/保圧	不可	—	高	高	—
Whiteの可視化装置	Whiteの可視化装置	実際の成形運転時ノズルシミュレーション(キャビティシミュレーション等使用)	正面	内/外層部	流動	可	1900	2枚の平行ガラス板を使用しているために、耐圧性は低い	高	高 (装置の分解・組立が必要)
フォトモールド	フォトモールド	実際の成形運転時ノズルシミュレーション(キャビティシミュレーション等使用)	正面	内/外層部	流動	可	2000	—	高	—
Hanらの可視化金型	Hanらの可視化金型	実際の成形運転時ノズルシミュレーション(キャビティシミュレーション等使用)	正面	内/外層部	流動	可	1300	—	高	高 (金型の分解・組立が必要)
重崎らの可視化金型	重崎らの可視化金型	実際の成形運転時ノズルシミュレーション(キャビティシミュレーション等使用)	厚さ	内/外層部	流動	可	260	厚さ方向からの観察であるために、観察面積が小さく、流動過程のなかでは耐圧性が比較的高い	低 (アクリル材を使用しているため)	—
Kanaiらの可視化金型	Kanaiらの可視化金型	実際の成形運転時ノズルシミュレーション(キャビティシミュレーション等使用)	正面	外層部	流動	可	14500	1枚の平板ガラスを使用しているために、流動過程のなかでは耐圧性が低い	高	—
高橋らの可視化金型	高橋らの可視化金型	実際の成形運転時ノズルシミュレーション(キャビティシミュレーション等使用)	正面	外層部	流動	可	2000	—	高	—
Mengesらの可視化金型	Mengesらの可視化金型	実際の成形運転時ノズルシミュレーション(キャビティシミュレーション等使用)	正面/厚さ	外層部	流動	可	1900	側面プリズムガラスの耐圧性に問題あり	低 (アクリル材を使用しているため)	—
汎用ガラスインサート金型	汎用ガラスインサート金型	実際の成形運転時ノズルシミュレーション(キャビティシミュレーション等使用)	正面	外層部	流動	可	3400	くまびきによるプリズムガラスの耐圧性に問題あり	高	高 (射出成形機上で交換可能)
レーザ可視化金型	レーザ可視化金型	実際の成形運転時ノズルシミュレーション(キャビティシミュレーション等使用)	厚さ	内/外層部	流動/保圧	可	330	側面ガラスの耐圧性は重崎らの金型と同様にあるが、スリットガラスの耐圧性に問題あり	高	高 (装置の分解・組立が必要)
疑	疑	シミュレーション	厚さ	内層部	流動	可	—	—	常	—

\*) 正面は、パーティング面に対して垂直な方向を示す。



2シリンダ法およびゲート着磁法では、さらにそれに加えて、数100MPaおよび300℃以上の高圧・高温の成形条件下における流動から保圧に至る全成形過程の現象解明に対して利用が可能である。しかし、その一方で、静的可視化法は、リアルタイム観察でないために、成形過程の途中で発生する不良現象のメカニズム解析には適さないという問題点を有している。

動的可視化法は、ガラス、またはアクリル等の透明材料を型内に組み込んだ可視化金型を使用するものがほとんどである。耐圧性、耐熱性が低いこと、また透明材料と金属材料との熱物性の差異のために、その使用範囲は、樹脂圧力がそれほど上昇せず、かつ樹脂と金属壁面間の熱交換がそれほど活発に行われない流動過程のみに制約されている。しかし、このような制約条件はあるものの、動的可視化法は、実際の成形運転下で型内成形現象をリアルタイム観察できるために、静的可視化法では不可能であった成形不良現象生成メカニズムの解明に対して極めて実用的かつ効果的な手法となる。

本研究で試作した汎用ガラスインサート金型は、Kamalらの可視化金型に次ぐ面積3400mm<sup>2</sup>の大きなキャビティでの観察を可能としている。一般に、キャビティ面積が拡大した場合にキャビティ全域を可視化しようとする、当然、観察窓の面積も比例して拡大する。その結果、ガラス内部において引張応力状態へと導かれる領域が拡大するため、逆に耐圧性の低下が生じる。しかし、本金型では、従来のガラスインサート金型のくさび締め付け構造を採用しているために、観察窓部が拡大しても、50MPa、300℃以上の高い耐圧・耐熱性を維持することができる。また、本金型では、キャビティを入れ子交換方式としているために、従来の動的可視化法において困難であった各種キャビティ形状への変更が容易となり、汎用性を有している点を特長としている。さらに、表には掲げていないが、従来法では確認されていなかったガラスキャビティ面が樹脂流動特性に与える影響、すなわち実際の成形条件との等価性が明らかにされているために、その適用範囲が明確となり、計測データの高い信頼性が得られる。

本汎用ガラスインサート金型は、以上のような優れた特長を有しており、(1)キャビティの大型化への対応、(2)肉厚変化部、リブ・ボス・コーナー部等における3次元の樹脂流動挙動を解析可能とするための2方向同時可視化機能の付加が、さらに実用的な実験解析ツールとして本金型が成形現場に普及するための

今後の課題と考えられる。

## 2.2 型内繊維配向挙動の実験解析法

繊維配向挙動の実験解析法を比較したものを表2に示す。静的解析法では、透明、不透明を問わずいかなる種類の樹脂に対しても、また繊維含有率が高くなった場合にも成形品内の繊維配向状態を正確に計測できる点を特長としている。しかし、成形品内の最終的な配向状態に至るメカニズムの検討は、理論解析が主体であったために、あくまでも推察の域を脱していなかった。

一方、LeeらおよびCrowsonら、堀川らの動的解析法は、単純化された各種流動場を作り上げ、その流動場における繊維の基本的動作をリアルタイムで直接可視化して、配向メカニズムの把握、整理を行うことを目的としていた。しかし、これらの方法では、実際の成形条件からかけ離れたシミュレーション実験装置と、通常のガラス繊維に対して物性および寸法が大きく異なるトレサ繊維とを使用しているために、これらの実験が実際に金型内で起こっている繊維配向過程を再現できているのかどうかという疑問が常に存在していた。本研究で確立したバックライト金型方式は、従来法では達成できなかった実際の成形運転下での観察を可能とした点を大きな特長としている。また、トレサ繊維は、通常のガラス繊維表面に極めて薄いNiめっきを施したものであるため、母材のガラス繊維の物性、寸法にほとんど影響を与えないことも特長としている。

Crowsonら、堀川らの方法では、正面方向からの観察であるためにキャビティ厚さ方向の繊維配向分布および速度分布の抽出が不可能であった。一方、本手法では、同様に正面方向からの観察であるが、第5章で提案した静的解析法を併用したキャビティ厚さ方向の繊維流動位置抽出法により、厚さ方向の繊維配向・速度分布抽出を可能とした。その結果、ガラス繊維配向挙動を3次元の樹脂（繊維）流動速度分布と関連づけて検討できるようになった。光切断法ではキャビティ厚さ方向の繊維配向・速度分布を直接画像より抽出できる。しかし、高繊維含有率の場合では、光切断面よりカメラ側に存在する繊維の干渉により光切断面のトレサ繊維が観察できず、そのため、0.2wt%の低繊維含有率での観察にとどまっている。それに対して、本手法では、25wt%までの高繊維含有率



表2 型内繊維配向挙動の実験解析法

静的可視化法	動的可視化法	繊維配向メカニズムの検討方法	リアルタイム観察	実験形態	トレース繊維(繊維径)	観察方向	適用可能繊維含有率(%)	適用可能樹脂	その他の特長
可視化装置	光透過法	理論解析	不可	実際の成形運転下	ガラス(φ10μm)	任意	制限なし	制限なし	
		直接観察	可	シミュレーション(押出機使用)	ステンレス(φ180μm)	2方向	30	透明樹脂	
		直接観察	可	シミュレーション(キャピタリレオメータ使用)	ステイール(φ100μm)	正面	1	透明樹脂	
		直接観察	可	シミュレーション(疑似流体と流体循環装置使用)	カーボン(φ10μm)	正面	0.1	透明流体	
		直接観察	可	実際の成形運転下(スクリーンライン式射出成形機)	Niめっきガラス(φ24μm)	正面	25	透明樹脂	繊維追跡撮影装置によりキャビティ全域における繊維挙動観察が可能
		直接観察	可	実際の成形運転下(スクリーンライン式射出成形機)	Niめっきガラス(φ24μm)	厚さ	0.2	透明樹脂	

\*) 正面は、パーティクル面に対して垂直な方向を示す。

での観察が可能である。

微細なガラス繊維の配向角、速度を精度よく計測するためには、カメラの撮影倍率を上げて狭い範囲をスポットで観察する必要がある。そのため、逆にキャビティの広い範囲での繊維挙動を観察したい場合には、LeeらやCrowsonらのように通常のガラス繊維よりも寸法が約8~15倍大きなトレース繊維を使用し、撮影倍率を下げることとなる。ガラス繊維と同じ寸法のトレース繊維を使用する場合には、堀川らのように撮影倍率を上げた状態でカメラの位置をその都度ずらしながら観察する以外に方法がなかった。本手法では、第6章で提案した繊維追跡撮影装置により、撮影倍率を下げることなくキャビティ全域でのガラス繊維配向挙動を精度よく連続観察可能とした点が大きな特長と言える。

以上のように本バックライト金型方式は優れた特長を有している。本手法は、透明樹脂に対してのみ適用が限定されるが、(1)照明方法の改善によりさらに高繊維含有率の場合の配向解析を行うこと、(2)キャビティ形状、肉厚を変化させた場合の配向解析に対応できるキャビティ入れ子構造と多軸駆動の繊維追跡撮影装置の提案を行うことの以上2点が今後の課題と考えられる。

## 2.3 樹脂圧力・温度の計測法

### 2.3.1 樹脂圧力の計測法

表3は、樹脂圧力の計測手法を比較したものである。従来法の水晶圧電式センサおよびひずみゲージ式センサは、樹脂温度、金型温度等の環境の変動に左右されないために計測値から圧力への校正作業が一度で済むこと、また150~200MPaの高い樹脂圧力を精度よく計測できることを大きな特長としており、研究用および成形過程モニタ用として広く利用されている。超音波圧力計測法も、現在、研究開発段階であるが、100MPaまでの高い樹脂圧力の計測に利用できることを特長としている。しかし、上記3つの計測法では、センサの外径が大きいこと、また、アンプ等を含めた1測定点当たりのコストが高いことから、これらをキャビティ面に対して細かく縦横に配列できないために、キャビティ面圧分布計測への利用は困難であった。さらに、超音波圧力計測法では、キャビティ内にステンレス箔を貼り付けなければならないために、キャビティ壁面の状況



表3 樹脂圧力計測法の比較

サ セ ン サ 設置方式	校正作業・ 測定精度	測定可能 圧力範囲	キャビティ 壁面状況の 損傷	センサ外径 (mm/point)	1測定点当 たりにかかる コスト	キャビティ 面圧分布計 測への適用	用途
水晶圧電式圧力センサ	不要	200MPa以下 (直接法)	無	φ4.0 (直接法)	高	不可	研究用/モニタ用
ひずみゲージ式圧力センサ	不要	150MPa以下 (直接法)	無	φ12.0 (直接法)	中	不可	研究用/モニタ用
超音波圧力計測法	要	100MPa以下 (原理的には それ以上可)	有	φ6.35 (配線部を含め るとさらに大)	高	不可	研究用
圧力伝達ピンアレイと 触覚センサを用いる方法	要	50MPa以下	無	φ2.54**	低	可	研究用

\*) 一度校正後における計測毎の校正作業

\*\*) 触覚センサ感圧部1点当たりの寸法

\*\*\*) センサ本体、アンプ、その他必要な周辺機器を含んだ価格

(熱伝導率、表面性状等)を阻害することとなり、実際の成形条件とは異なるという問題も抱えていた。

本研究で確立した圧力伝達ピンアレイと触覚センサを用いた計測手法では、計測値の圧力値への変換作業が必要となること、測定範囲・精度が若干低いことなどの問題があるものの、センサ外径が2.54mm/pointと小さいこと、および1測定点当たりのコストが従来法の100分の1以下と極めて低いことを利用して、キャビティ面圧分布計測をはじめて可能としたことは、他の欠点を補って余りある傑出した特長と言える。

本計測手法では、センサ感圧部間の出力誤差補正方法を検討することにより測定精度の向上をはかることが、研究用として広く普及させるための今後の課題と考えられる。

### 2.3.2 樹脂温度の計測法

樹脂温度計測手法を相互に比較したものを表4に一括して掲げる。非接触式温度計測センサは、特に成形過程モニタ用への適用を主眼として研究あるいは実用がなされている。これに対して、接触式温度計測センサでは圧倒的に熱電対が主流で、研究用と成形過程モニタ用、スポット計測用と分布計測用を問わず、広く用いられてきた。

非接触式センサは、赤外線放射エネルギー、および超音波、蛍光と様々な原理に基づく可能性が探索され、概して間接的な計測故の温度計測データ変換に伴う変動要因に悩まされやすい。すなわち、測定対象の樹脂が変わればその都度校正関係の調査を行わなければならないという煩雑な作業の必要が生じる。また、赤外線放射温度計測法および超音波温度計測法では、被測定位置を細かく限定できないために、キャビティ厚さ方向等の樹脂温度分布の詳細な計測には適用が困難である。さらに、蛍光法では、可視化ガラスに接する面上での樹脂温度分布は計測できるが、樹脂内層部の温度分布計測は不可能であった。

素線熱電対等の接触式センサは、比較的簡単な計測原理に基づいているため計測値から温度への変換過程が明解であり、一度校正関係を調査すれば、測定対象の樹脂が変わっても同じ校正関係が利用できるという長所を有している。



表4 樹脂温度計測法の比較

	接 触 / 非 接 触	校正作業	応答性	熱 伝 導 誤 差	粘性摩擦 による 発熱誤差	樹脂温度分布計測 への適用性	コ ス ト	用 途
赤外線放射温度計測法	非接触式	要	優	無	無	不可 (平均温度のみ)	高	研究用/モニタ用
超音波温度計測法	非接触式	要	良	無	無	困難 (原理的には可)	高	研究用/モニタ用
賞 光 法	非接触式	要	優	無	無	可(樹脂内部部 の温度分布計測 には不可)	高	研究用
熱 電 対 法	接触式	不要	良	有	有	低 密 度 多点計測可	低	研究用
集積熱電対センサ法	接触式	不要	良	流動方向に沿った素 線部長さを長くする ことにより低減	有	高 密 度 多点計測可	中 (量産が可能とな ればさらに低下)	研究用

\*) 一度校正後における計測毎の校正作業  
\*\*) センサ本体、アンプ、その他必要な周辺機器を含んだ価格

しかしその一方で、接触式なるが故の応答性の低さ、および熱伝導誤差、粘性摩擦による発熱誤差等の誤差要因排除の困難さを伴っている。したがってその研究動向も、上記誤差要因をいかに排除しつつその適用範囲を拡張するかの工夫に力点が置かれている。本研究で提案した集積熱電対センサは、センサ部を薄膜化し熱容量を小さくすることで応答性の向上をはかり、素線部を流動方向に沿わせ、かつその素線長さを極力長くした配線パターンにより熱伝導誤差を小さく抑える等の工夫が施されており、古い原理に基づく新しい形態のセンサとして位置づけられる。そして、集積熱電対センサの最も大きな特長は、素線熱電対で行われたカップリング部を流路内に細かく位置決めする煩雑な作業を必要とせず、測定点間隔0.3mmの高集積度と、高位置決め精度でキャビティ厚さ方向の樹脂温度分布計測を可能とした点にあると言える。

本センサは、試作段階であるため、現状ではコスト面で素線熱電対には劣るが、その応用範囲を広げることで大量生産が可能となれば、大幅なコストダウンが見込める。カップリング部集積度の更なる向上、センサ耐久性の改善により、今後、本センサの利用範囲が広がるものと期待できる。

### 3. 各種実験解析法を用いて得られた解析結果の活用法

本研究では、従来にない新しい実験解析法の確立を目的として研究を進めてきた。そして、さらに本実験解析法の完成度を実証するために行った各種型内成形現象の実験解析結果からは、従来法では得ることができなかった重要な知見が得られた。本節では、これら実験解析結果の理論面および実用面における活用法について述べる。

第3章では、汎用ガラスインサート金型を用いて、ランナー分岐部における樹脂流動挙動の解析を行った。ここで得られた結果は、多数個取り金型のランナー設計を行う場合に、ランナー分岐部での樹脂飛び出し形状を十分に考慮する必要があることを示唆するものである。特にフィラー充填材の場合において、フィラー形状(アスペクト比等)・充填率を十分に考慮した上で、ランナーバランス、およびゲートバランスを行うことが、成形品の重量バラツキ等の発生防止に対して重要と言える。具体的には、成形材料が大きく飛び出す方向に位



置するランナー、ゲートの断面積を他よりも小さくする等の対策によりバラツキの抑止が期待できる。また、理論解析の面からは、ランナー分岐部におけるフィラー配向状態を考慮した数値解析モデルの提案により、樹脂流動パターン等の予測精度向上が期待される。

第4章では、汎用ガラスインサート金型を用いてウェルドラインの生成現象を直接観察することにより、一定範囲内のフローフロント会合角においてウェルドラインが消失するという現象を見い出した。この結果は、(1)ウェルドライン生成箇所の予測、および(2)フローフロント会合角制御によるウェルドライン抑制の、2つの可能性を示唆しているものと考えられる。すなわち、理論解析の面では、フローフロント会合角 $150^\circ$ 以上をウェルドライン消失点の具体的な基準値としてウェルドライン生成箇所の予測数値シミュレータの開発に、また、実用面では、ウェルドレス金型の設計にそれぞれ反映できるものと考えられる。なお、このウェルドライン消失会合角の理論は、世界中ですでに認められており、例えば、国内では、東レ㈱のTIMON<sup>130)</sup>、海外では、AC Technology社(米国)のC-Flow<sup>131)</sup>等の市販流動シミュレーションソフトの中に導入されている。また、現在導入を検討している数値シミュレーションソフト<sup>132)</sup>もあり、今後、ウェルドライン生成箇所の予測に対して効果を発揮するものと期待される。

第5章、第6章で得られたガラス繊維配向分布およびスキン層、コア層のガラス繊維配向モデルは、実用面では、成形品内におけるガラス繊維配向構造の制御に対して基礎的な指針を与えるものである。例えば、ゲート・キャビティ形状等の調整による繊維配向制御技術、あるいはSCORIM (Shear Controlled Orientation in Injection Molding)<sup>133)</sup>や回転コア<sup>134)</sup>を利用した繊維配向制御技術等に対して理論的根拠を与え、これら技術のさらなる発展に寄与するものと考えられる。また、理論解析の面では、現行の数値解析モデルの妥当性検証、およびスキン層における繊維配向の数値解析モデルの提案に対して大きく寄与するものと期待される。

第7章、第8章で得られたキャビティ面圧分布およびキャビティ厚さ方向の樹脂温度分布計測結果は、新しい数値解析モデルの提案に対して大きく寄与するものと期待され、また、数値解析結果の貴重な検証データとなるものと考えられる。また、第9章で得られたノズル流路内の樹脂温度分布計測結果は、理論解

析の面では、ノズルから射出される樹脂の温度が均一であると仮定していた従来の数値シミュレーションに対して、入力データの取り扱い方法の具体的な指針を与えるものと考えられ、今後、予測精度の向上に対して寄与するものと期待される。さらに、実用面では、加熱シリンダ内で樹脂を均一に可塑化するための、最適条件の検討および新しいスクリュ形状、スクリュヘッド・チェックリング形状の設計に対する重要な指針となるものと期待される。

#### 4. 各種実験解析法の今後の展望

本研究では、型内樹脂流動挙動および型内ガラス繊維配向挙動、樹脂圧力・温度分布の各種実験解析法の確立を行った。前節で述べたように、本研究で確立された各種手法は、ウェルドライン生成メカニズムおよびガラス繊維配向メカニズム、樹脂圧力・温度分布等の解明に大きく寄与した。本研究では、各種手法の完成度を示すための、数件の成形現象の実験解析例にとどまっているが、これら手法は、フローマーク生成過程等のその他の型内成形現象解明に対しても十分に適用できるものと考えられ、その波及効果は今後益々拡大するものと期待できる。射出成形が抱える問題は無数にあり、本研究で確立した各種実験解析法が、成形プロセスおよび成形不良現象の系統的、定量的な解明、および成形理論の体系化に本格的に寄与するのはむしろこれから先であると言える。

図1、図2は、本手法により今後解明が期待できる各種成形プロセスおよび成形不良現象をそれぞれ一括して示したものである。本研究では、確立した各種実験解析法をそれぞれ個別に使用して成形プロセスおよび成形不良現象の解析を行ってきた。しかしながらこれらの図が示すように、各課題の解明には、1つの手法を用いているだけでは困難なものが多く、2つ以上の手法を組み合わせる必要があり、取り組まざるを得ない状況にあると言える。例えば、低圧射出成形法、ガスアシスト射出成形法等の新成形法は、樹脂の流動・圧力分布状態等を能動的に制御し、高品質の成形品の完成を目指したものである。したがって、その成形プロセスを把握するためには、当然、樹脂の流動・圧力分布状態、および両者と深く関わりのある樹脂温度分布状態を同時に観測する必要があるものと考えられる。また、成形不良現象であるフローマークは、フローフロントでのファウ



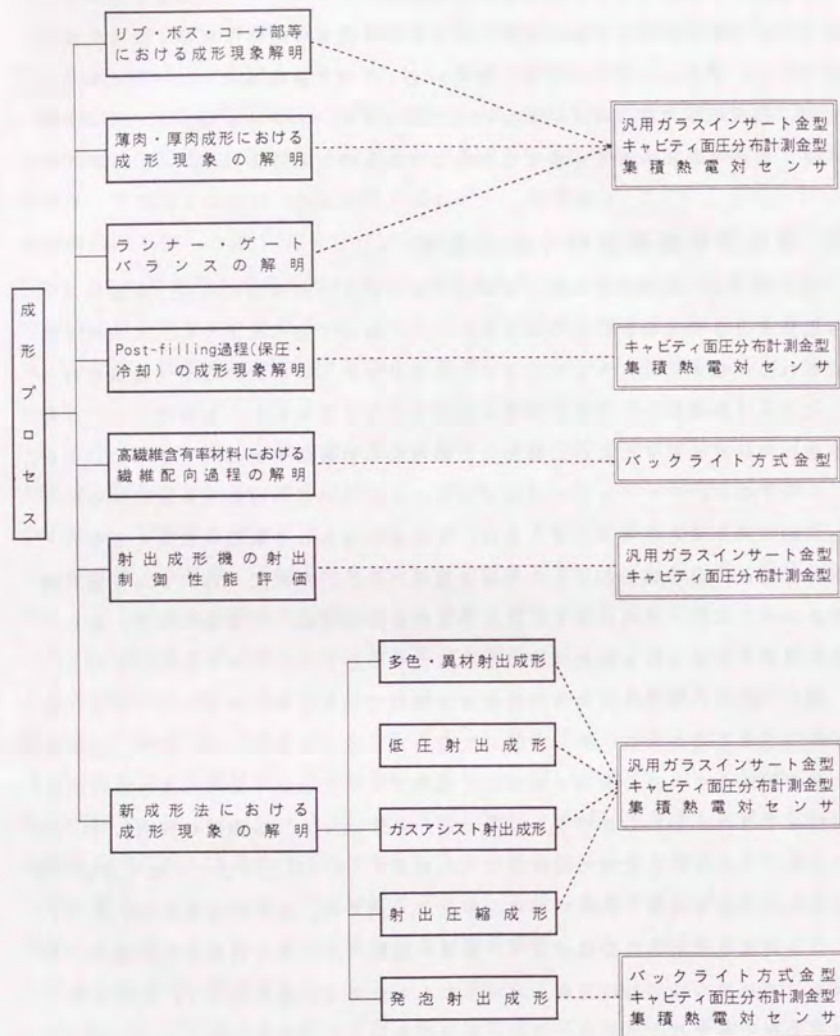


図1 今後説明が求められる成形プロセス

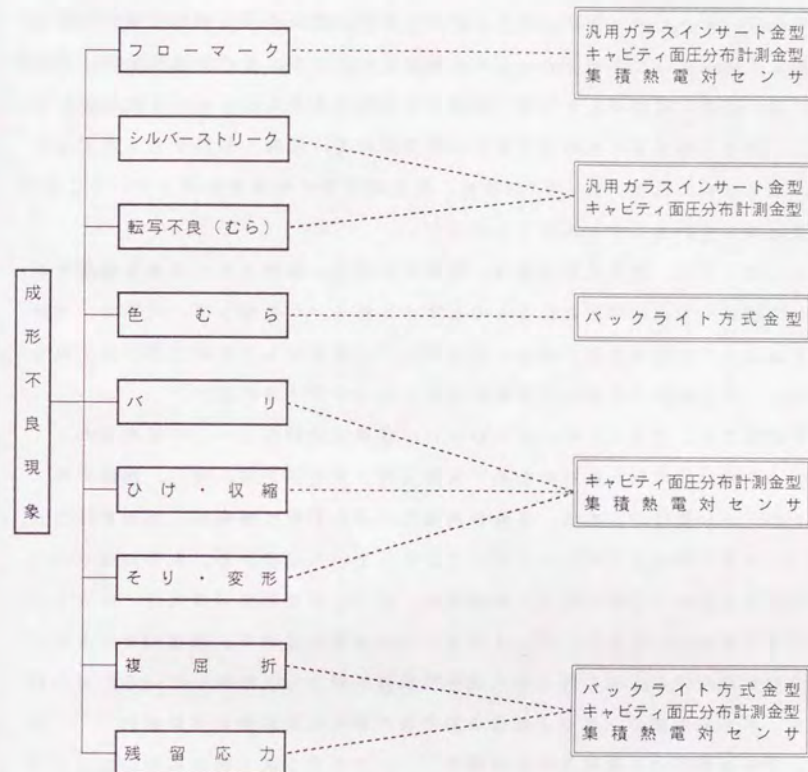


図2 今後説明が求められる成形不良現象



ンテンフロー挙動、樹脂圧力・温度の局所的な不安定によって生成されるものと推察されており、流動および圧力、温度をすべて観測しなければその生成メカニズムは解明できないものと考えることができる。さらに、最近、成形不良現象のひけ、そり等の数値シミュレーションの開発が盛んに行われている。上記現象は、キャビティ面圧分布およびキャビティ厚さ方向の樹脂温度分布の局所的な不均一によって生成されるものと推察されており、その物理現象のモデル化には、圧力・温度分布を同時に観測する必要があるものと考えられる。ただし、これら手法を組み合わせるだけで、問題が解決するものでもない。成形材料の粘度、およびPVT特性、熱伝導率等の物性を把握していることが前提となっていることも忘れてはならない。

以上のように、型内成形現象は、樹脂流動挙動、樹脂圧力・温度を複眼で観測して初めて完全に解明されるものと考えられる。したがって、今後は、本研究で確立した各種実験解析法を、さらに一つに統合化した総合計測システムを構築し、多方面からの総合的な解析を行うことが要求されよう。

本研究では、従来にはない高いレベルの各種実験解析ツールの開発を行うことにより型内成形現象解明のための貴重な第一歩を築いた。特に、汎用ガラスインサート金型については、各種型内成形現象の解析に積極的に活用することで、これまで単なるプロトタイプにとどまっていた段階から、実用的なレベルまで引き上げることができた。本金型は、すでに実用的な可視化ツールとして世界中で認められており、バックライト方式金型も含めて、現在10セット以上の金型が国内外の企業の間で型内成形現象解析用として稼働している。具体的には、射出成形機のスクリュ前進挙動と型内樹脂流動挙動の相関解析<sup>135)</sup>、および型内樹脂圧力と流動長の相関解析<sup>136)</sup>、ガスアシスト射出成形におけるガス注入プロセスの可視化解析<sup>137), 138)</sup>に利用されている。さらに本金型は、射出成形の分野だけでなく、現在では熱硬化性樹脂のトランスファ成形過程（半導体部品パッケージング過程）の可視化解析にも応用されており<sup>139)</sup>、その利用分野をさらに拡大している。

集積熱電対センサについては、すでに民間企業5社以上が研究開発用として樹脂温度分布計測に活用している<sup>140)</sup>。また、本センサは、流動樹脂の温度分布計測だけでなく、成形品の型内離型プロセスの解析<sup>141)</sup>、キャビティ壁

面と熔融樹脂表面間の熱抵抗の同定<sup>142)</sup>等に適用されており、さらに、最近では、光造型法における紫外線硬化樹脂の温度分布計測にも利用されており<sup>143)</sup>、今後さらなる用途拡大が期待される。

射出成形の分野には解明されないままに残された課題がまだまだ多く存在する。本研究で確立した各種実験解析法が今後さらに普及し、型内成形現象の系統的、定量的な解明、さらには成形理論の体系化につながることを期待しながら、本論文を終えることとしたい。



— 参考文献 —



- 1) 田口玄一：第3版実験計画法（上）（1976），丸善
- 2) 田口玄一：品質工学応用講座 転写性の技術開発，（1992），日本規格協会
- 3) 多田和美：プラスチックCAEの現状と展開，成形加工，7，177（1995）
- 4) Hieber, C. A. Socha, L. S., Shen, S. F., Wang, K. K. and Isayev, A. I.:  
Filling Thin Cavities of Variable Gap Thickness; A Numerical and  
Experimental Investigation, Polym. Eng. Sci., 23, 20 (1983)
- 5) 服部 剛, 堀口晶夫, 天岩照夫：ガラス繊維強化樹脂成形品のそり変形，  
成形加工'94, 253 (1994)
- 6) 横井秀俊：射出成形型内現象の可視化解析法，成形加工，6，157 (1994)
- 7) Krueger, W. L. and Tadmor, Z.: Injection Molding into Rectangular  
Cavity with Inserts, SPE ANTEC'78, 87, (1978)
- 8) 後藤輝正, 飯塚邦彦, 宮本雅之, 久保 登, 逢坂正義, 佐原謙一, 馬渡恭三郎,  
西岡郁夫：射出成形における金型内の樹脂流動シミュレーション，シャープ  
技報，34, 63 (1986)
- 9) 松岡孝明, 高島淳一, 井上良徳, 高橋秀郎：射出成形充填・保圧・冷却過程  
における樹脂流動挙動のシミュレーション，高分子論文集，48, 137  
(1991)
- 10) Lautenbach, S., Wang, K. K. Chiang, H. H. and Jong, W. R.: Automatic  
Interpretation of Weld/Weld Lines in Injection Molding;  
Experimental Verification, SPE ANTEC'91, 372 (1991)
- 11) Ballenger, T. F. and White, J. L.: An Experimental Study of Flow  
Patterns in Polymer Fluids in the Reservoir of a Capillary  
Rheometer, Chem., Eng., Sci., 25, 1191 (1970)
- 12) Bagley, E. B. and Birks, A. M.: Flow of Polyethylene into a Capillary,  
J. Apply. Phys., 31, 556 (1960)
- 13) Schmidt, L. R.: A Special Mold and Tracer Technique for Studying  
Shear and Extensional Flows in a Mold Cavity during Injection  
Molding, Polym. Eng. Sci., 14, 797 (1974)
- 14) 加藤和典, 陳 仁浩：セラミックスの射出成形におけるウェルド欠陥に関  
する研究，成形加工'92, 33 (1992)



- 15) 杉本吉弘, 西村敬一, 野村賀寿雄: 射出成形における溶融樹脂の流動挙動に関する研究, 奈良県工業試験場研究報告, 12, 1 (1986)
- 16) Vos, E., Meijer, H.E.H. and Peters, G.W.M.: Multilayer Injection Molding, Int'l Polym. Process., 6, 42 (1991)
- 17) 中川泰忠: 海外研究機関の紹介⑩ アイントホーヘン大学, 成形加工, 5, 462 (1993)
- 18) 泊 清隆, 澤田 聡, 中野 亮, 濱田泰以, 前川善一郎: 同時複合射出成形法における樹脂接合強度と界面形状制御, 成形加工, 5, 197 (1993)
- 19) 横井秀俊, 鎌田重人: ゲート着磁法による型内3次元流動分布計測, 生産研究, 40, 532 (1988)
- 20) 横井秀俊, 金松俊宏, 鎌田重人, 稲垣幸秀: ゲート着磁法による型内3次元流動パターンの可視化, 成形加工'89, 43 (1989)
- 21) 横井秀俊, 増田範通, 山田政行: ゲート着磁法によるキャビティ内微小段差部の樹脂流動解析, 1994年度精密工学会春季大会学術講演論文集, 753 (1994)
- 22) 横井秀俊, 平野彰士, 原田浩次, 仁木康博, 植田幸治: ゲート着磁法による型内3次元流動の解析Ⅱ, 成形加工'92, 27 (1992)
- 23) 横井秀俊, 松本 準, 江本敦史: ゲート着磁法による型内3次元流動の解析Ⅰ, 成形加工'91, 217 (1991)
- 24) 横井秀俊, 伊藤義一: ゲート着磁法による型内補償流動の解析Ⅰー補償流動の定量化手法ー, 成形加工'94, 45 (1994)
- 25) 伊藤義一, 横井秀俊: ゲート着磁法による型内補償流動の解析Ⅱー結晶性/非晶性樹脂による流入パターンの比較ー, 成形加工'94, 49 (1994)
- 26) Koster, W. and Hohring, K.: Study of the Flowing and Filling Process in Die Casting by Means of Motion Pictures, Die Giesserei, 3, 521 (1941)
- 27) Spencer, R.S. and Gilmore, G.D.: Some Flow Phenomena in the Injection Molding of Polystyrene, J. Colloid, Sci., 6, 118 (1951)
- 28) Gilmore, G.D. and Spencer, R.S.: Photographic Study of the Polymer Cycle in Injection Molding, Mod. Plastics, 28, 117 (1951)

- 29) Villamizar, C.A. and Han, C.D.: Studies on Structural Foam Processing II. Bubble Dynamics in Foam Injection Molding, Polym. Eng. Sci., 18, 699 (1978)
- 30) Han, C.D. and Villamizar, C.A.: Development of Stress Birefringence and Flow Patterns during Mold Filling and Cooling, Polym. Eng. Sci., 18, 173 (1978)
- 31) 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, 504 (1990)
- 32) 黒崎晏夫, 龍腰健太郎, 佐藤 勲: 射出成形品の「ひけ」発生位置に対する金型壁の冷却条件の影響, 成形加工, 2, 505 (1990)
- 33) White, J.L. and Dee, H.B.: Flow Visualization for Injection Molding of Polyethylene and Polystyrene Melts, Polym. Eng. Sci., 14, 212 (1974)
- 34) Oda, K., White, J.L. and Clark, E.S.: Jetting Phenomena in Injection Mold Filling, Polym. Eng. Sci., 16, 585 (1976)
- 35) White, J.L. and Lee, B.L.: An Experimental Study of Sandwich Injection Molding Two Polymer Melts Using Simultaneous Injection, Polym. Eng. Sci., 15, 481 (1975)
- 36) Young, S.S., White, J.L., Clark, E.S. and Oyanagi, Y.: A Basic Experimental Study of Sandwich Injection Molding with Sequential Injection, Polym. Eng. Sci., 20, 798 (1980)
- 37) Kamal, M.R. and Kenig, S.: The Injection Molding of Thermoplastics Part II. Experimental Test of the Model, Polym. Eng. Sci., 12, 302 (1972)
- 38) 高橋秀郎: 射出成形技術の高度化, 豊田中央研究所R&Dレビュー, 15, 43 (1980)
- 39) 横井秀俊, 林 高樹, 平岡弘之: 射出成形における型内樹脂挙動の直接観察, 生産研究, 39, 306 (1987)



- 40) Menges, G. and Leibfried, D.: Beitrag zur Analyse der Stromungsverhältnisse beim Spritzgießen mit Hilfe eines Sichtwerkzeuges, *Plastverarbeiten*, 21, 951 (1970)
- 41) 横井秀俊, 稲垣幸秀, 中西博之: レーザによる金型内樹脂流動の可視化, 成形加工'90, 143 (1990)
- 42) Coyle, D. J., Blake, J. W. and Macosko, C. W.: The Kinematics of Fountain Flow in Molding-filling, *AIChE J.*, 33, 1168 (1987)
- 43) Bright, P. F., Crowson, R. J., Folkes, M. J.: A Study of the Effect of Injection Speed on Fibre Orientation in Simple Mouldings of Short Glass Fibre-filled Polypropylene, *J. Mater. Sci.*, 13, 2497 (1978)
- 44) Bright, P. F. and Darlington, M. W.: Factors Influencing Fibre Orientation and Mechanical Properties in Fibre Reinforced Thermoplastics Injection Mouldings, *Plast. Rubber Process. Appl.*, 1, 139 (1981)
- 45) Goettler, L. A.: Controlling Flow Orientation in Molding of Short-fiber Compounds, *Mod. Plast.*, 140 (1970)
- 46) 竹田 啓, 情野康男: チタン酸カリウム繊維/ポリスチレン複合材成形における繊維の流動配向, 成形加工, 1, 197 (1989)
- 47) Fakirov, S. and Fakirova, C.: Direct Determination of the Orientation of Short Glass Fibers in an Injection-molded Poly(ethylene terephthalate) System, *Polym. Compos.*, 6, 41 (1985)
- 48) Vaxman, A. and Narkis, M.: Short Fiber Reinforced Thermoplastics. II. Interrelation Between Fiber Orientation and Rheological Properties of Glass Fiber-reinforced Noryl, *Polym. Compos.*, 10, 84 (1989)
- 49) 大柳 康, 山口章三郎, 北川道也, 寺尾賢司, 望月正彦: ガラスおよびカーボン繊維充てん射出成形品における繊維配向, 高分子論文集, 38, 285 (1981)
- 50) Nicolais, L., Nicodemo, L., Masi, P. and DiBenedetto, T.: The Effect of Hot Drawing on the Properties of Short Fiber Reinforced Extruded Sheets, *Polym. Eng. Sci.*, 19, 1046 (1979)
- 51) 泊 清隆, 原田敏彦, 殿谷三郎, 濱田泰以, 前川善一郎: FRTPのウェルドライン強度とその改善, SPE The 6th Regional Technical Conference, Technical Paper, 56 (1988)
- 52) 大久保昌典: 射出成形に於ける繊維配向解析, 成形加工'89, 267 (1989)
- 53) 竹田 啓, 小山清人: 充填系の射出成形における繊維とマトリックスの配向, 成形加工'89, 271 (1989)
- 54) Darlington, M. W. and McGinley, P. L.: Fibre Orientation Distribution in Short Fibre Reinforced Plastics, *J. Mater. Sci.*, 10, 906 (1975)
- 55) Darlington, M. W., Smith, G. R.: Voiding in Glass Fibre Reinforced Thermoplastics Mouldings, *Polymer*, 16, 459 (1975)
- 56) 泊 清隆, 濱田泰以, 前川善一郎: 短繊維強化ナイロン射出成形品のウェルドライン強度に関する研究, 成形加工, 1, 71 (1989)
- 57) 木天泰弘, 阿部一登, 児玉明德, 稲葉 允: ガラス短繊維強化ナイロンの配向解析, 成形加工, 5, 741 (1993)
- 58) 吉田邦夫, Budiman, G., 岡山芳道, 北尾敏男: グラファイト繊維とポリスチレンとからなる複合材料の配向について, 繊維学会誌, 31, T335 (1975)
- 59) 竹田 啓: 繊維複合材における繊維配向度評価, 繊維学会誌, 47, 52 (1989)
- 60) Bell, J. P.: Flow Orientation of Short Fiber Composites, *J. Compos. Mater.*, 3, 244 (1969)
- 61) Lee, W. K. and George, H. H.: Flow Visualization of Fiber Suspensions, *Polym. Eng. Sci.*, 18, 146 (1978)
- 62) Crowson, R. J., Folkes, M. J. and Bright, P. F.: Rheology of Short Glass Fiber-reinforced Thermoplastics and its Application to Injection Molding I. Fiber Motion and Viscosity Measurement, *Polym. Eng. Sci.*, 20, 925 (1980)



- 63) 堀川 明, 寺岡文雄, 木村 博: 短繊維含有高分子溶液のスリット内流れにおける繊維配向, 繊維機械学会誌, 36, 97 (1983)
- 64) 稲垣幸秀, 原田浩次, 西 芳夫, 横井秀俊: レーザによる金型内樹脂挙動の可視化Ⅱ—繊維配向過程の解析—, 成形加工'93, 235 (1993)
- 65) 青地保光, 奥山和彦: 水晶圧電式センサの射出成形加工への利用技術, 成形加工, 1, 415 (1989)
- 66) 林 博己: 金型内圧・温度の測定技術・装置の進歩, プラスチックス, 31(9), 99 (1980)
- 67) 西脇信彦, 今野政昭, 崔 愛玲, 堀 三計: 超音波による金型内圧力の測定, 成形加工, 5, 779 (1993)
- 68) 林 博己: 熔融樹脂温度の測定, プラスチック成形技術, 1(4), 46 (1984)
- 69) Galskoy, A. and Wang, K.K.: Measuring Melt Temperatures; Thermocouples or Pyrometers?, Plast. Eng., 34(11), 42 (1978)
- 70) 西脇信彦, 堀 三計, 堤 正臣: 超音波による金型内熔融プラスチックの成形過程監視, 精密工学誌, 52, 507 (1986)
- 71) 堀 三計, 西脇信彦: 超音波による金型内プラスチックの温度計測, 成形加工'89, 109 (1989)
- 72) 西脇信彦, 堀 三計, 堤 正臣: 超音波による金型内熔融プラスチックの成形過程監視, 型技術者会議'87, 30 (1987)
- 73) 西脇信彦, 今野政昭, 崔 愛玲, 堀 三計: 超音波による熔融樹脂温度の測定, 成形加工, 5, 772 (1993)
- 74) Nakatani, N., et al.: Measurement of Velocity and Temperature Distributions in Gas Flow by the laser Induced Luminescence Methods, Proc. 4th Int. Symp. on Flow Visualization, 179 (1986)
- 75) 黒崎晏夫, 佐藤 勲, 谷 秀久: 蛍光法による熔融樹脂の非接触温度測定, 成形加工'92, 311 (1992)

- 76) Thienel, P. and Menges, G.: Mathematical and Experimental Determination of Temperature, Velocity, and Pressure Fields in Flat Molds during the Filling Process in Injection Molding Thermoplastics, Polym. Eng. Sci., 18, 314 (1978)
- 77) 林 高樹: 射出成形における型内樹脂流動の画像計測, 東京大学大学院工学研究科精密機械工学専攻昭和62年修士論文, (1988)
- 78) 東芝セラミックス㈱: 石英ガラス製品カタログ
- 79) ㈱ナック: HSV-400製品カタログ
- 80) 国立天文台編 理科年表, 487 (1993), 丸善㈱
- 81) 大柳 康: エンジニアリングプラスチック—その特性と成形加工—, 47 (1985), 森北出版㈱
- 82) Michaeli, W. and Galuschka, S.: New Developments in the Simulation of Injection Moulding and Special Processes, SPE ANTEC'94, 565 (1994)
- 83) 前田光秋, 植田俊弘, 山田清寿, 銭 力克: ガスアシスト射出成形におけるコンピュータシミュレーションと検証実験, 成形加工'94, 11 (1994)
- 84) 相野谷慶太, 大柳 康: 射出成形金型内のシミュレーション, 成形加工'94, 29 (1994)
- 85) 松浦好宏, 米原敏文, 藤井昌弘浩, 平尾雅彦: CAEを用いたガスチャネル生成状態の予測, 成形加工'95, 37 (1995)
- 86) 昭和電工㈱: ショウアロマー製品カタログ
- 87) ポリプラスチック㈱: ジュラコン製品カタログ
- 88) 住友化学工業㈱: エスブライト製品カタログ
- 89) 三菱化学㈱: ノバテック製品カタログ
- 90) Tadmor, Z. and Gogos, C.G.: Principles of Polymer Processing, 629 (1979), A Wiley-Interscience Publication
- 91) 鈴木治男, 永江勝利, 夏目 宏: 多数個取り成形品のランナーバランスと流れの均一化, 成形加工'91, 313 (1991)
- 92) 横井秀俊, 植田幸治, 岡 克典, 平野彰士, 村田泰彦: ガラスインサート金型によるランナー内樹脂流動挙動の解析, 成形加工'92, 207 (1992)



- 93) 中谷善一, 松川俊雄: 多数個取り成形品のCAEを用いたランナー設計に関する研究, 成形加工'89, 287 (1989)
- 94) 井上良徳, 松岡孝明: 樹脂射出成形ランナーの3次元流れシミュレーション, 第5回高分子加工技術討論会講演要旨集, 9 (1993)
- 95) 横山教士, 佐々木正俊, 新木 豊, 安武健司, 後藤輝正, 濱田泰以: 射出成形シミュレータを用いた最適化設計法に関する研究—多変数設計条件の場合—, 成形加工'94, 25 (1994)
- 96) 相野谷慶太, 上野寿幸, 張 志栄, 関口 勇, 大柳 康: 射出成形における多数個取り金型の分岐ランナー設計について, 成形加工シンポジウム'95, 201 (1995)
- 97) 黒田英夫, 下平勝義: 射出成形ウェルドラインの定量化と成形要因の定量評価, 成形加工, 2, 159 (1990)
- 98) Malguarnera, S. C., Manisali, A. I. and Riggs, D. C.: Weld Line Structures and Properties in Injection Molded Polypropylene, Polym. Eng. Sci., 21, 1149 (1981)
- 99) Criens, R. W. and Mosle, H. G.: The Influence of Knit-Lines on the Tensile Properties of Injection Molded Parts, Polym. Eng. Sci., 23, 591 (1983)
- 100) 足立達彦, 久保田依秀: 射出成形CAEシステムによるウェルド外観不良予測技術の確立, 成形加工'94, 31 (1994)
- 101) 泊 清隆, 原田敏彦, 前川善一郎, 濱田泰以: 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, 成形加工, 4, 374 (1992)
- 102) 割野孝一, 田村 弘, 松丸重雄: ウェルド溝深さに対する射出成形条件の影響, 成形加工'90, 207 (1990)
- 103) 田中秀雄, 館山弘文, 鈴木淳広: 金型急加熱・冷却システムとその適用事例, 成形加工, 5, 107 (1993)
- 104) 宇高 靖, 小倉信宏, 吉田秀樹: 局所加振・加圧装置「プレス $\alpha$ 」, 成形加工, 5, 712 (1993)

- 105) 岩瀬英裕: 導電性プラスチックとその成形加工, 成形加工, 2, 378 (1990)
- 106) Jeffery, G. B.: The Motion of Ellipsoidal Particles Immersed in a Viscous Fluid, Proc. Roy. Soc., A102, 161 (1922)
- 107) Folgar, F. and Tucker III, C. L.: Orientation Behavior of Fibers in Concentrated Suspensions, J. of Reinf. Plast. and Compos., 3, 98 (1984)
- 108) 松岡孝明, 井上良徳: 射出成形品の繊維配向シミュレーション, 化学工学, 53, 345 (1989)
- 109) 横井秀俊, 中野和良, 渡辺広三, 村田泰彦: ガラスインサート金型による繊維配向過程の解析, 成形加工'90, 17 (1990)
- 110) 林 博己: 金型内圧センサーによる精密センシング技術, プラスチック成形技術, 10(6), 30 (1993)
- 111) 林 雅和: 射出成形圧力(温度)センサー, プラスチック成形技術, 10(6), 36 (1993)
- 112) 平野達夫: 射出成形用の型内圧センサーおよびノズル圧力センサー, プラスチック成形技術, 10(6), 26 (1993)
- 113) 黒川靖也: 低圧成形理論, プラスチック成形技術, 8(3), 9 (1991)
- 114) 公開特許公報昭 48-41264, 旭ダウ
- 115) 公開特許公報昭 57-14968, 旭ダウ
- 116) 木村 護: 低圧成形のための射出成形技術, 成形加工, 5, 839 (1993)
- 117) 多田和美, 新藤和美: 射出成形における残留応力の予測, 成形加工, 2, 317 (1990)
- 118) Bushko, W. C. and Stokes, V. K.: The Effects of Differential Mold-Surface Temperatures on the Warpage of Packed Injection-Molded Parts, SPE ANTEC'94, 506 (1994)
- 119) 横井秀俊, 高橋重晶, 村田泰彦: 金型キャビティ面に作用する面圧分布計測の試み, 成形加工'94, 181 (1994)
- 120) ニック株式会社: I-SCAN100製品カタログ
- 121) 日本機械学会編: 計測法シリーズ8 熱計測技術, 16 (1986), 朝倉書店



- 122) Kamal, M.R., Mutei, A.T., Salloum, G. and Garcia-Rejon, A.: Heat Transfer Measurement at the Mold Surface during Injection Molding of Thermoplastic Melts, SPE ANTEC'91, 483 (1991)
- 123) Reddy, V.N. and Schott, N.R.: In-Situ Real Time Monitoring of the Transient Melt Temperatures in the Nozzle during Injection Molding via IR Pyrometry, SPE ANTEC'95, 399 (1995)
- 124) Czazasty, J., 林 雅和: 赤外線式樹脂温度センサーの射出成形への適用, 成形加工, 7, 437 (1995)
- 125) 西脇信彦, 今野政昭, 崔 愛玲, 橋本展明, 堀 三計: 成形品へ及ぼすノズル通過樹脂温度挙動の影響, 成形加工, 5, 800 (1993)
- 126) 天野 修, 宇津木史郎: 成形中の樹脂温度および圧力の測定, 成形加工, 1, 364 (1989)
- 127) Amano, O. and Utsugi, S.: Temperature Measurements of Polymer Melts in the Heating Barrel during Injection Molding. Part 2: Three-Dimensional Temperature Distribution in the Reservoir, Polym. Eng. Sci., 29, 171 (1989)
- 128) Amano, O. and Utsugi, S.: Temperature Measurement of Polymer Melts in the Heating Barrel during Injection Molding. Part 3: Effects of Screw Geometry, Polym. Eng. Sci., 30, 385 (1990)
- 129) 横井秀俊, 黒田章公: ガラスインサート方式によるスクリュヘッド近傍の樹脂挙動解析, 成形加工'94, 185 (1994)
- 130) 東レ㈱: プラスチック成形CAEシステムTIMON製品カタログ
- 131) AC-Technology・菱化システム: C-Flow製品カタログ
- 132) 石田敏和, 安沢孝久: プラスチック成形品の不良対策とCAE(特にウェルドラインの特性解析について), 成形加工'91, 329 (1991)
- 133) British Technology Group: SCORTEC製品カタログ
- 134) 荒井貞夫, 森 直樹: 射出成形品の配向制御による物性改良, 成形加工シンポジア'93, 22 (1993)
- 135) 宇高 靖: 射出成形におけるスクリュ前進挙動と型内樹脂流動の関係, 成形加工'93, 33 (1993)

- 136) 宇高 靖: 射出成形における流動中の圧力と流動長の関係, 成形加工'93, 37 (1993)
- 137) 山本一喜, 原田康平: ガラスインサート金型によるガス注入射出成形プロセスの可視化, 成形加工'94, 193 (1994)
- 138) Yamamoto, K., Harada, K. and Okada, Y.: The Visualization and Analysis of Gas Assisted Injection Molding Process, Abstracts for the Pacific Conference on Rheology and Polymer Processing, 218 (1994)
- 139) 横井秀俊, 村田泰彦, 山口龍善: 半導体パッケージング過程の可視化解析 I - 多ピンリードフレームにおける充填パターンの画像計測 -, 成形加工'95, 175 (1995)
- 140) 松井祐次, 森田 聡, 宮本 玲, 橋本寿正, 丹 淳二: 金型内樹脂温度の測定及びシミュレーションとの比較, 成形加工'94, 27 (1994)
- 141) 横井秀俊, 西内 進: 集積熱電対センサによる型内離型プロセスの計測, 成形加工シンポジア'93, 130 (1993)
- 142) 横井秀俊, 河村達次: 溶融樹脂と金属面との熱抵抗の同定, 成形加工シンポジア'94, 150 (1994)
- 143) 徐 毅, 花岡正浩, 今村正人, 中川威雄: 硬化過程での液体樹脂の流動について - 第二報 反応熱による樹脂温度の変化 -, 1996年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, 971 (1996)



## 【本論文に関する公表文献】

(\*印は、正論文を示す)

### 序論に関するもの

- 1) 村田泰彦, 横井秀俊: 射出成形における温度分布計測技術, 生産研究, 43, 537 (1991)
- 2) 村田泰彦, 横井秀俊: 射出成形における金型内繊維配向過程の実験解析法, 生産研究, 46, 619 (1994)
- 3) 村田泰彦: 成形加工工程における計測技術の基礎—金型内樹脂流動挙動・温度・圧力分布計測技術の基礎—, プラスチック成形加工学会第6回基礎セミナーテキスト, 46 (1995)

### 第1章に関するもの

- \*1) 横井秀俊, 村田泰彦, 坂本一郎: ガラスインサート金型におけるガラスキャビティ面の充填特性評価, 成形加工, 6, 349 (1994)

### 第2章に関するもの

- 1) 村田泰彦, 横井秀俊, 林 高樹: ガラスインサート金型によるショートショット法の精度検証, 生産研究, 40, 528 (1988)
- 2) 村田泰彦, 宇高 靖, 曾布川敦, 横井秀俊: ガラスインサート金型によるショートショット時のフローフロント挙動観察, 成形加工'90, 13 (1990)
- \*3) 村田泰彦, 横井秀俊, 宇高 靖: ガラスインサート金型によるショートショット時のフローフロント挙動解析, 成形加工, 6, 703 (1994)

### 第3章に関するもの

- 1) 横井秀俊, 長谷元弘, 村田泰彦: ガラスインサート金型によるランナー分岐部流れの解析, 成形加工'90, 21 (1990)
- \*2) 横井秀俊, 村田泰彦, 長谷元弘: ガラスインサート金型によるランナー分岐部流動挙動の解析, 成形加工, (投稿予定)



#### 第4章に関するもの

- 1) 横井秀俊, 村田泰彦, 織山俊雄, 戸田清登, 森北信夫: 射出成形における型内樹脂流動の画像計測 (第2報 - ウェルドラインの解析 -), 1989年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, 933 (1989)
- 2) 横井秀俊, 村田泰彦, 織山俊雄, 戸田清登: ガラスインサート金型によるウェルドライン形成過程の解析, 成形加工'89, 245 (1989)
- 3) 村田泰彦, 岡 克典, 渡辺広三, 横井秀俊: ガラスインサート金型によるウェルドライン形成過程の解析II, 成形加工'90, 209 (1990)
- 4) Yokoi, H., Murata, Y., Oka, K. and Watanabe, H.: Visual Analysis of Weld Line Vanishing Process by Glass-Inserted Mold, Proceedings of the 49th Annual Technical Conference ANTEC'91, 367 (1991)
- \*5) 横井秀俊, 村田泰彦, 岡 克典, 渡辺広三: ガラスインサート金型によるウェルドライン生成過程の解析, 成形加工, (投稿予定)

注) 文献4)は、米国Society of Plastic Engineersの1991年度年次大会 Injection Molding DivisionにてBest Paper Awardを受賞した。

#### 第5章に関するもの

- 1) 村田泰彦, 西 芳夫, 横井秀俊: ガラスインサート金型による繊維配向過程の解析II - バックライト方式による可視化 -, 成形加工'92, 199 (1992)
- 2) 村田泰彦, 関 武邦, 坂井秀敏, 横井秀俊: ガラスインサート金型による繊維配向過程の解析III - 繊維配向に及ぼす成形条件の影響 -, 成形加工'93, 227 (1993)
- 3) Yokoi, H., Murata, Y., Nishi, Y. and Seki, T.: Visual Analysis of Fiber Orientation Process by Glass-Inserted Mold (Part I: Analysis Using a Back-Lighting Method), Proceedings of the 52nd Annual Technical Conference ANTEC'94, 392 (1994)

- \*4) 横井秀俊, 村田泰彦, 西 芳夫, 関 武邦: ガラスインサート金型による繊維配向過程の可視化解析 (第1報) - バックライト金型方式による解析 -, 成形加工, 7, 600 (1995)

#### 第6章に関するもの

- 1) 村田泰彦, 長谷元弘, 原田浩次, 横井秀俊: ガラスインサート金型による繊維配向過程の解析IV - 繊維追跡撮影による解析 -, 成形加工'93, 231 (1993)
- 2) Yokoi, H., Murata, Y., Nagaya, M. and Harada, H.: Visual Analysis of Fiber Orientation Process by Glass-Inserted Mold (Part II: Analysis Using a Fiber Tracing Method), Proceedings of the 52nd Annual Technical Conference ANTEC'94, 824 (1994)
- \*3) 村田泰彦, 横井秀俊, 長谷元弘, 原田浩次: ガラスインサート金型による繊維配向過程の可視化解析 (第2報) - 繊維追跡撮影装置による解析 -, 成形加工, 7, 663 (1995)

注) 文献3)は、社団法人プラスチック成形加工学会の平成7年度論文賞を受賞した。

#### 第7章に関するもの

- 1) 村田泰彦, 横井秀俊, 河崎浩志: 金型キャビティ面に作用する樹脂圧力分布計測, 成形加工'95, 149 (1995)
- \*2) 村田泰彦, 横井秀俊, 河崎浩志: キャビティ面圧分布計測への触覚センサの応用, 成形加工, 8, 249 (1996)

#### 第8章に関するもの

- 1) 横井秀俊, 村田泰彦, 塚越 洋: パターン形成による熱電対温度センサの開発, 昭和62年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, 533 (1987)



- 2) 村田泰彦, 横井秀俊, 根本 悟, 塚越 洋: パターン形成による熱電対温度センサの開発 (第2報-めっきによるパターン形成の検討-), 昭和63年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, 605 (1988)
- 3) 村田泰彦, 川崎 篤, 澤田 聡, 横井秀俊: 集積熱電対センサによる流動樹脂内部の温度分布計測 I - 性能評価試験 -, 成形加工'90, 223 (1990)
- 4) Yokoi, H., Murata, Y. and Tsukakoshi, H.: Measurement of Melt Temperature Profiles during Filling and Packing Processes Using a New Integrated Thermocouple Sensor, Proceedings of the 50th Annual Technical Conference ANTEC'92, 1875 (1992)
- \*5) 横井秀俊, 村田泰彦, 塚越 洋: 集積熱電対センサによる型内樹脂内部の温度分布計測, 成形加工, 8, 107 (1996)

#### 第9章に関するもの

- 1) 村田泰彦, 曾布川敦, 内藤貴弘, 中野和良, 横井秀俊: 集積熱電対センサによるノズル内部温度分布計測, 成形加工'90, 221 (1990)
- 2) 村田泰彦, 植田幸治, 西 芳夫, 平野彰士, 坂井秀敏, 横井秀俊: 集積熱電対センサによるノズル内部温度分布計測 II, 成形加工'91, 39 (1991)
- \*3) 村田泰彦, 横井秀俊, 植田幸治: 集積熱電対センサによるノズル流路内流動樹脂温度分布計測, 成形加工, 8, 115 (1996)

— 付 録 —



表1 本研究で使用した樹脂の熱物性値および適用成形条件範囲

樹 脂	樹 脂	グレード (メーカー)	結晶化温度 T <sub>c</sub> (°C)	ガラス転移 温度 T <sub>g</sub> (°C)	適用成形条件範囲	
					樹脂温度 (°C)	金型温度 (°C)
結 晶 性	低密度ポリエチレン LDPE	ノバテックス L-330 (三菱化学㈱)	87	—	180~280	30~50
		ミラソン 68 (三井石油化学工業㈱)	88	—	180~280	30~50
性	ポリプロピレン PP	ショアロマー MK-511 (昭和電工㈱)	120	—	190~260	30~70
		ハイポール J700 (三井石油化学工業㈱)	115	—	180~280	30~50
樹 脂	ポリセタール POM	ハイポール J900 (三井石油化学工業㈱)	115	—	180~280	30~50
		ジュラコン M270-02 (ポリプラスチックス㈱)	148	—	190~210	60~80
非 晶 性	汎用ポリスチレン GPPS	エスブライト 2V (住友化学工業㈱)	—	82	190~230	20~50
樹 脂	耐衝撃性ポリスチレン HIPS	エスブライト HH-501 (住友化学工業㈱)	—	94	210~260	40~60
		アクリル PMMA	—	105	210~260	50~90
	アクリロニトリル ABS	トヨラック 500 (東レ㈱)	—	105	200~240	40~60

注) T<sub>c</sub>, T<sub>g</sub>は、示差走査熱量計による測定値。



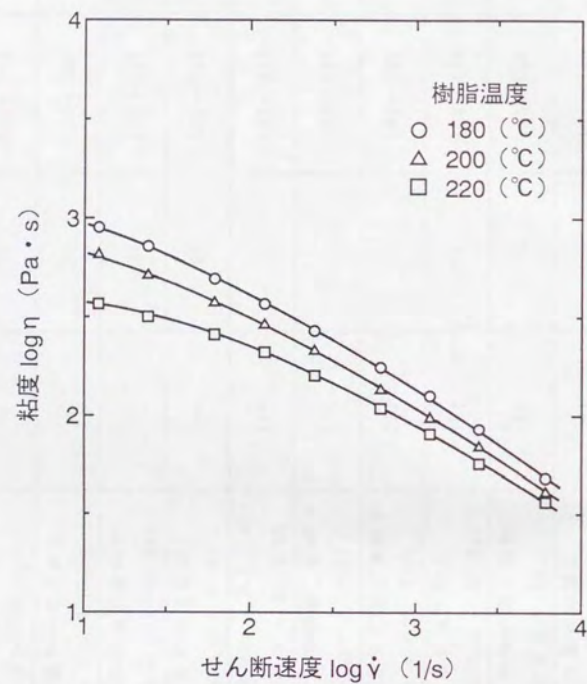


図1 LDPE(ノバテックスL-330)の粘度特性  
(株東洋精機製作所：キャピログラフ1B,  
キャピラリ  $L/D=20$ ,  $L=20\text{mm}$ ,  $D=\phi 1.0\text{mm}$ )

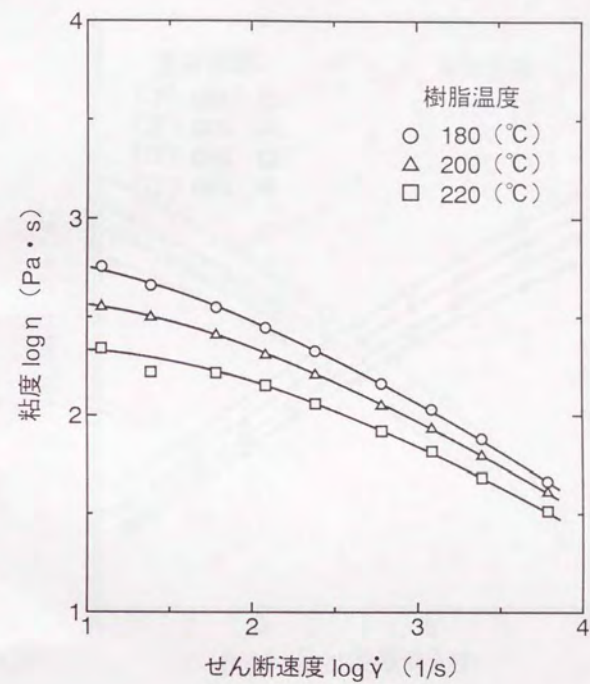


図2 LDPE(ミラソン68)の粘度特性  
(株東洋精機製作所：キャピログラフ1B,  
キャピラリ  $L/D=20$ ,  $L=20\text{mm}$ ,  $D=\phi 1.0\text{mm}$ )



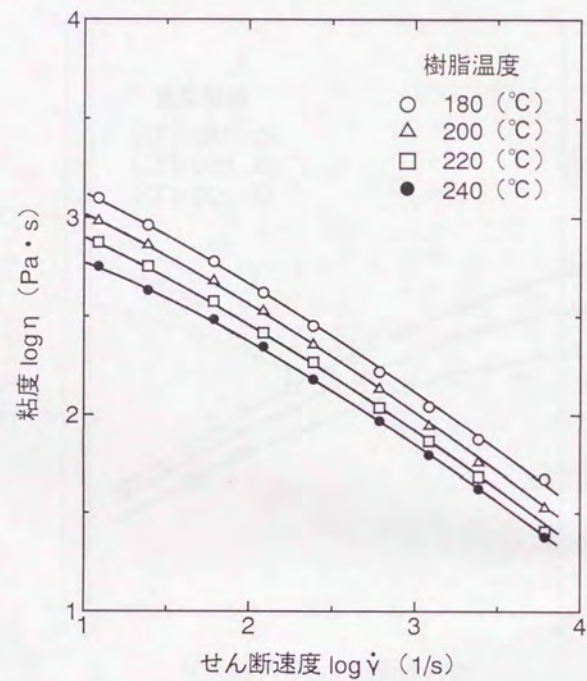


図3 PP(ショアロマーMK-511)の粘度特性  
(株)東洋精機製作所：キャピログラフ1B,  
キャピラリ  $L/D=20$ ,  $L=20\text{mm}$ ,  $D=\phi 1.0\text{mm}$ )

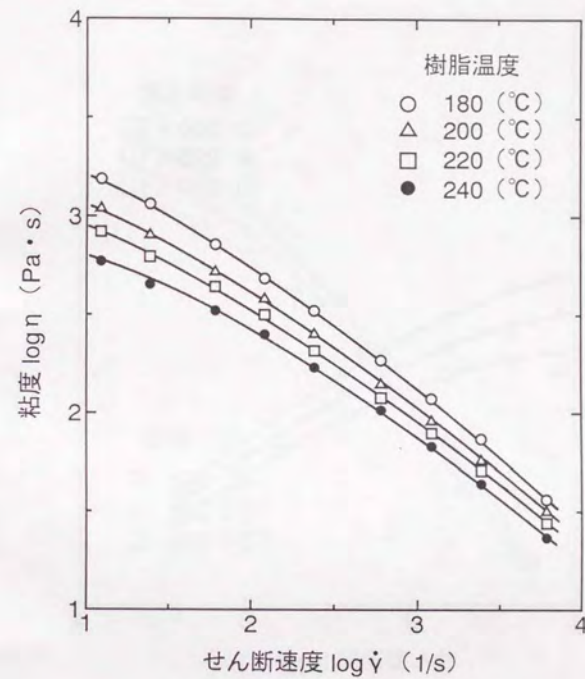


図4 PP(ハイボールJ700)の粘度特性  
(株)東洋精機製作所：キャピログラフ1B,  
キャピラリ  $L/D=20$ ,  $L=20\text{mm}$ ,  $D=\phi 1.0\text{mm}$ )



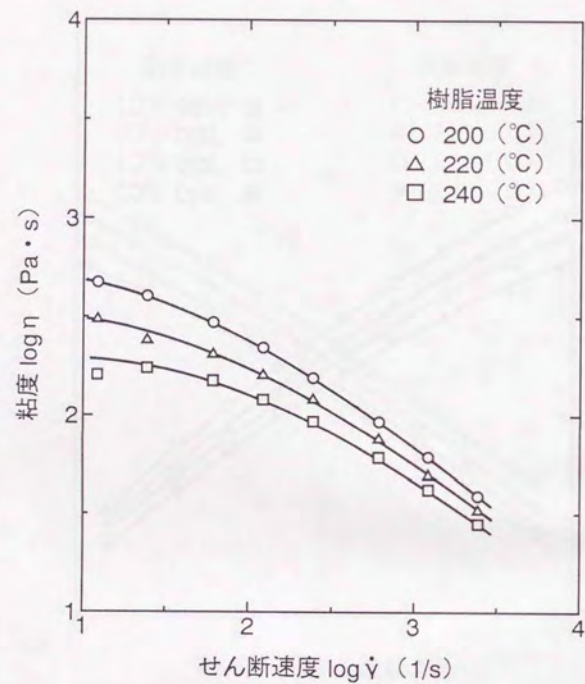


図5 PP(ハイボールJ900)の粘度特性  
(株)東洋精機製作所：キャピログラフ1B,  
キャピラリ  $L/D=30$ ,  $L=30\text{mm}$ ,  $D=\phi 1.0\text{mm}$ )

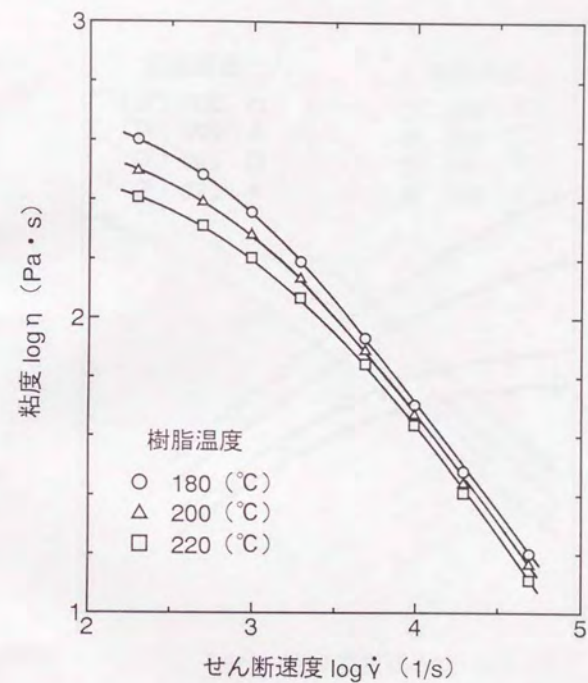


図6 POM(ジュラコンM270-02)の粘度特性  
(株)東洋精機製作所：キャピログラフ1B,  
キャピラリ  $L/D=30$ ,  $L=15\text{mm}$ ,  $D=\phi 0.5\text{mm}$ )



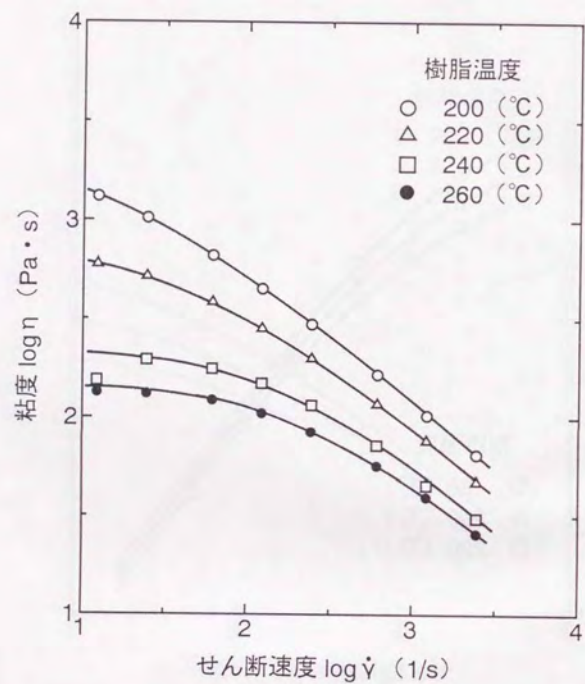


図7 GPPS(エスブライト2V)の粘度特性  
(株)東洋精機製作所: キャピログラフ1B,  
キャピラリ  $L/D=30$ ,  $L=30\text{mm}$ ,  $D=\phi 1.0\text{mm}$ )

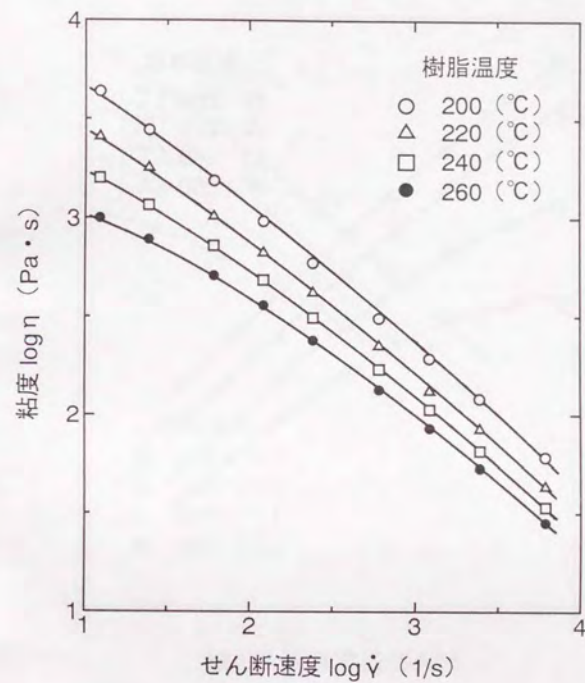


図8 HIPS(エスブライトHH-501)の粘度特性  
(株)東洋精機製作所: キャピログラフ1B,  
キャピラリ  $L/D=20$ ,  $L=20\text{mm}$ ,  $D=\phi 1.0\text{mm}$ )



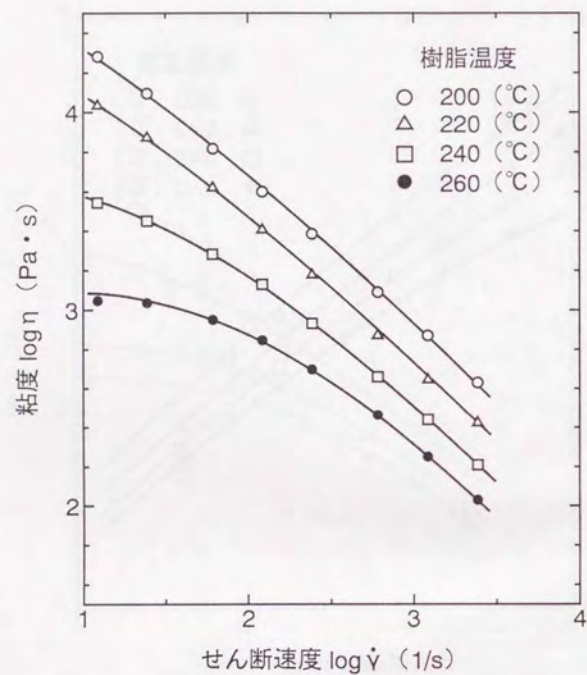


図9 PMMA(アクリペットVH)の粘度特性  
(例東洋精機製作所：キャピログラフ1B,  
キャピラリ  $L/D=30$ ,  $L=30\text{mm}$ ,  $D=\phi 1.0\text{mm}$ )

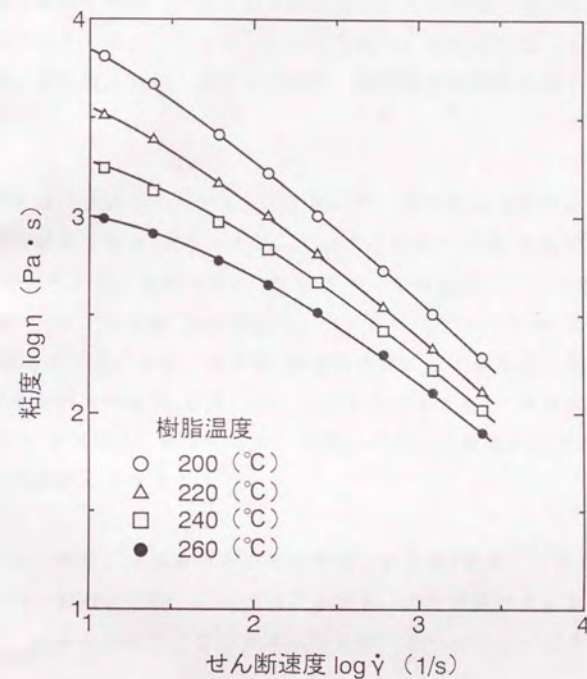


図10 ABS(トヨラック500)の粘度特性  
(例東洋精機製作所：キャピログラフ1B,  
キャピラリ  $L/D=30$ ,  $L=30\text{mm}$ ,  $D=\phi 1.0\text{mm}$ )



## 【謝 辞】

本研究は、東京大学生産技術研究所 助教授横井秀俊先生の御指導の下で行われたものである。本研究テーマを遂行する機会を与えてくださり、終始熱心な御指導と御教示を賜った横井秀俊助教授に心より感謝の意を表します。

また本論文をご査読いただき、有益な御教示と御助言を賜った東京大学 中川威雄教授、増沢隆久教授、高増潔助教授、加藤隆史助教授に深く感謝申し上げます。

本研究を遂行するに当たって、下記民間等との共同研究員として御協力を賜った住友重機械工業㈱ 坂本一郎氏、元住友重機械工業㈱ 宇高靖氏、積水化学工業㈱ 原田浩次氏、凸版印刷㈱ 関 武邦氏、河崎浩志氏、元東洋機械金属㈱ 岡克典氏、ファナック㈱ 長谷元弘氏、ポリプラスチックス㈱ 西芳夫氏、ムネカタ㈱ 渡辺広三氏、元ムネカタ㈱ 植田幸治氏、以上の各氏（社名五十音順）、ならびにヤマハ発動機㈱ 塚越洋氏、元東京大学大学院生 林高樹氏、元芝浦工業大学学生 根本悟氏、米澤和弘氏、田尻好彦氏、元東海大学学生 織山俊雄氏に心より感謝申し上げます。

本研究の一部は、文部省の平成元年度および平成2年度、平成4年度民間等との共同研究-V'89、V'90、V'93プロジェクトの中で遂行されたものであることを記し、文部省および下記の民間参加企業22社に対して、心より謝意を表します。

宇 部 興 産 ㈱	日 産 自 動 車 ㈱
住 友 化 学 工 業 ㈱	日 精 樹 脂 工 業 ㈱
住 友 重 機 械 工 業 ㈱	日 本 合 成 ゴ ム ㈱
3 M ( 米 国 企 業 )	フ ァ ナ ッ ク ㈱
積 水 化 学 工 業 ㈱	ポ リ プ ラ ス チ ッ ク ス ㈱
帝 人 ㈱	三 井 石 油 化 学 工 業 ㈱
東 芝 機 械 ㈱	三 菱 油 化 ㈱
東 洋 イ ン キ 製 造 ㈱	三 菱 重 工 業 ㈱
東 洋 機 械 金 属 ㈱	ム ネ カ タ ㈱
東 レ ㈱	ヤ マ ハ 発 動 機 ㈱
凸 版 印 刷 ㈱	㈱ リ コ ー

（社名五十音順、\*現三菱化学㈱）



本研究の遂行に当たり、各種計測金型およびセンサの製作に御協力を賜った住友重機械工業㈱、ヤマハ発動機㈱、射出成形機および金型温調器、圧力センサを貸与下さった住友重機械工業㈱、ファナック㈱、㈱松井製作所、日本キスラー㈱、樹脂の供与を賜った住友化学工業㈱、三井石油化学工業㈱、ポリプラスチック㈱、東レ㈱、さらに、ガラス繊維の供与およびめっき処理に御協力を賜った日本電気硝子㈱、三菱マテリアル㈱の各社に深くお礼を申し上げます。

また、高速ビデオシステム、触覚センサシステムの技術指導を賜った㈱ナック、ニッタ㈱に深くお礼を申し上げます。

本研究の遂行に関わる様々な便宜をはかって下さった、東京大学生産技術研究所 映像技術室および試作工場、図書掛の皆様に厚くお礼申し上げます。

日頃の研究生活を支え励まして下さった東京大学生産技術研究所 横井研究室の増田範通技術官、綾戸朋恵秘書、同研究室に在籍した皆様に深く感謝の意を表します。

最後に、本研究の指導だけにとどまらず、未熟な著者が一人前の研究者、また社会人となるよう教育して下さいった横井秀俊助教授に再度感謝の意を表して謝辞の結びとします。



