

射出成形における温度計測技術

Temperature Measurement Technologies for Injection Molding

村田 泰彦*・横井 秀俊*

Yasuhiko MURATA and Hidetoshi YOKOI

射出成形機の加熱シリンダ内における溶融樹脂温度計測手法として赤外線放射温度計測法、シース熱電対を応用した方法、また金型内樹脂の温度計測手法として超音波計測法、熱電対法、蛍光法を取り上げ、原理と事例、問題点について解説を行い、併せて著者らの開発による集積熱電対センサについて、前記手法と比較しながらその可能性を紹介した。

1. はじめに

射出成形は、最も重要なプラスチック成形法の一つである。金属の代替品として家電製品・自動車等の構成部品が、また最近では、樹脂の多機能化、金型加工技術の進歩によりレンズ・光ディスク等の精密製品も射出成形によって生産されるに至っている。

射出成形は、樹脂を①加熱シリンダとスクリュにより溶かす、②金型内に流し込む、③金型内で冷却固化させるという一連の工程からなっている。ホッパに投入された粒状樹脂(ペレット)は、厚肉鋼鉄製の加熱シリンダ内をスクリュで送られる過程で溶融し、続くスクリュによる射出動作で、金型内に移送される。全工程は厚い金属壁内で短時間に行われ、この間に樹脂温度は常温から融点以上、そして常温近傍へと加熱・冷却される。一方樹脂圧も、大気圧から数100気圧、場合によっては1000気圧以上に加圧されて大気圧に戻される。すなわち、射出成形は、汎用加工法の中で最も極限的な環境下で行われる成形加工法の一つとみなすことができる。

本成形法は、圧倒的に実用が先行する中で用途開発がなされてきた。そのため成形現象の解明は着手が遅れるとともに、上記の厳しい加工環境から既存の計測技術適用にも大きな困難が伴ってきた。現在でもなお、日常的な成形不良現象、たとえばフローマーク等の生成メカニズムは解明できておらず、また、ひけ・そり等の固化過程の成形不良も定量解析がほとんどなされていないのが実状である。こうした成形現象の定量解析と、それによる物理モデルの記述、さらには予測技術としてのCAEへの展開をはかるために、計測技術の担うべき役割は非常に大きい。一方、生産現場に目を転ずれば、成形状態のモニタ技術として、あるいは精密成形におけるフィード

バック信号用センサ技術として、計測技術はすでに高品質を実現する基礎技術を構成している。このように現象解明用および成形過程モニタ用では、明らかに目的を異にするため、計測技術を語る場合、両者を明確に区別する必要がある。

計測対象には(a)温度、(b)圧力、(c)内部状態が挙げられる。温度計測には主に熱電対、赤外線放射温度計等が、圧力計測にはひずみゲージ式、圧電式圧力変換器¹⁾が、また内部状態の可視化にはガラス等の透明窓組み込み方式^{2)~5)}が一般に用いられている。ただし、可視化による内部状態の抽出は、温度・圧力のスポット計測に比べて情報量が多く、主に現象解明のための研究用ツールとしてのみ用いられている。

本稿では、圧力とともに広範に用いられている温度計測技術に焦点を絞り、成形過程のモニタ用から研究用に至るまでの加熱シリンダ内、ノズル内、金型内の最新温度計測技術について以下に順を追って解説し、最後に著者らの開発による集積熱電対センサの新しい可能性を紹介する。

2. シリンダ・ノズル内樹脂の温度計測技術

2.1 赤外線放射温度計測法

赤外線放射温度計測法⁶⁾は、溶融樹脂の発する赤外線放射エネルギーを検出部の壁面に挿入されたサファイヤファイバを介して検出し、温度に変換するもので、現在シリンダ・ノズル・金型内温度のスポット計測に用いられている(図1参照)。赤外線放射のエネルギーは、その物体の温度に依存し、物体が完全放射体(黒体)の場合には、その放射の発散度 Me は、ステファンボルツマンの法則により、

$$Me(T) = \sigma T^4$$

$$\sigma = 5.6696 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$$

*東京大学生産技術研究所 第2部

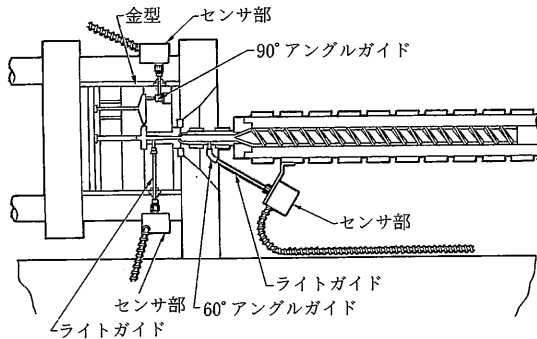


図1 赤外線放射温度計の装着例⁷⁾

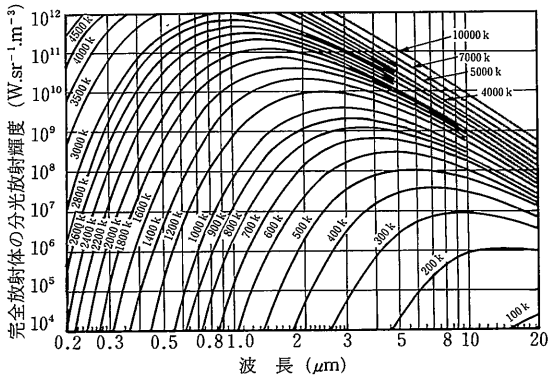


図2 完全放射体の分光放射輝度⁷⁾

で表される。ここでTは完全放射体の絶対温度で、 σ はステファンボルツマン定数である。図2は完全放射体の放射輝度と各波長との関係を示している。センサ素子・プローブ・ケーブルの特性により、赤外線放射温度計の測定波長帯域には一般に制限があり、図2の例では約1~3 μm の範囲の放射エネルギーを測定して温度に換算している。溶融樹脂の放射率は、0.90~0.98の間の値とされるが、樹脂の種類は無数にあり、そのつど放射率を設定するのは不可能である。実際は完全放射体(放射率1)仮定して簡略化して計測しているのが現状である。図3は、ポリカーボネート(PC)の温度計測例である⁷⁾。シリング設定温度280°Cに対して、射出圧力による断熱圧縮および樹脂の流動による分子間摩擦に起因すると考えられる20°Cの温度上昇をとらえている。

この手法の優れた特徴として、①応答性が良いこと、②伝熱でなく、輻射による計測であるため、加熱シリング壁面などの周辺部の熱の影響を受けないこと、③樹脂の流路に測温部を突出させる必要がないので流れを阻害せず計測できること、④耐摩耗性に優れ繰り返し計測が可能であることが挙げられる。しかし、課題として①樹脂の種類・充填材の混合によって放射率が変化するため、正確な計測を行うには補正が必要であること、②測

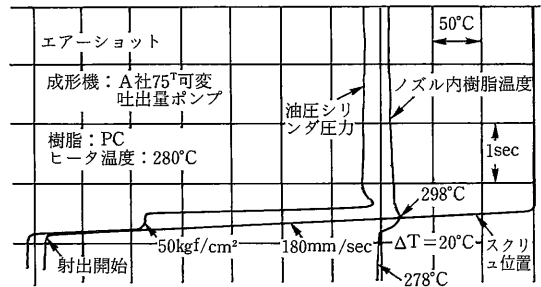


図3 赤外線放射温度計によるノズル内樹脂温度変化計測例⁷⁾

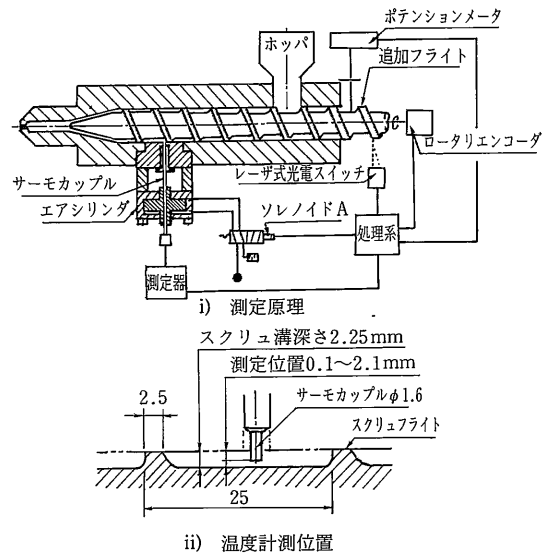
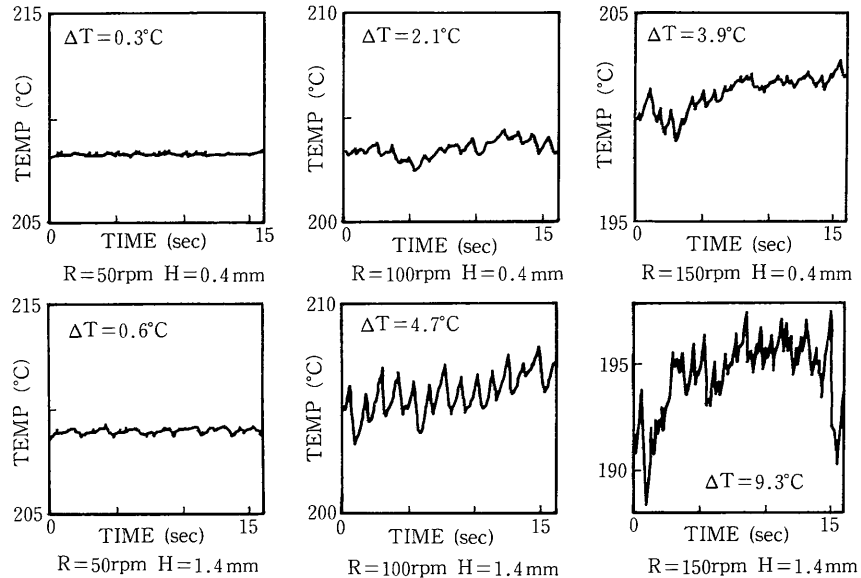


図4 シース熱電対によるスクリュウ溝内温度分布の測定方法⁹⁾

定深度がGalskoyらの報告⁸⁾にあるように、樹脂の種類・色・充填材により変化し、流路のどの深さまでの平均温度を検出しているかが不明であること、③平均温度を計測するため、深さ方向の温度分布が計測できないこと、④高価であることが挙げられる。

2.2 シース熱電対によるスクリュウ溝内樹脂温度分布計測法

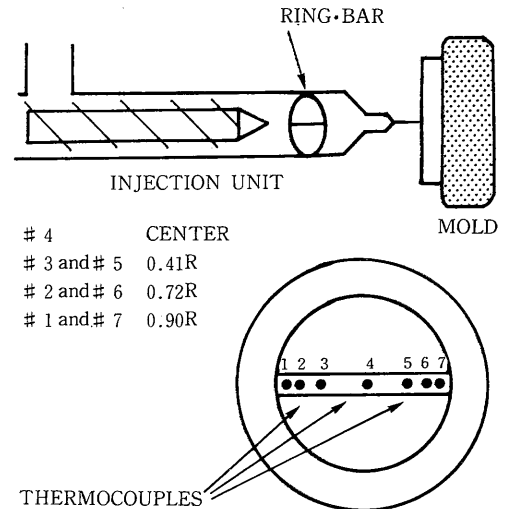
スクリュウ溝内の樹脂温度変化は、ほかの箇所に比べて複雑である。ホッパ投入樹脂は、加熱シリングからの伝熱およびスクリュウ回転によるせん断発熱により溝内で溶かされ、スクリュウ計量部へたどり着くまでに固体から溶融体へと状態を変える。特にスクリュウ圧縮部およびその前後の溝内は、固体と液体が3次的に共存し温度分布状態はきわめて複雑である。スクリュウ溝内樹脂の温度計測には、前項の赤外線放射温度計が一般に用いられているが、測定深度までの平均温度を検出しているため、温度分布の解明には利用できない。このため盛田らは、シース熱電対を用いた図4の装置を開発した⁹⁾。この装置は、

図5 シース熱電対によるスクリュ溝内の樹脂温度変化測定結果(GPPS)⁹⁾

スクリュフライトが回転時に熱電対に干渉しないよう回転に同期して熱電対を挿入・抜き出しする点に特徴がある。その動作は、スクリュ供給部の後に増設されたスクリュピッチと等しいフライトを、回転中にレーザ式光電スイッチにより検出し、その信号によりエアシリンダを駆動させることで達成される。海外においては、Essegghirらがモータによるカム駆動方式にて単軸押出機のスクリュ溝内の温度計測を行っており¹⁰⁾、商用の計測装置としても販売されるに至っている。

図5は、ポリスチレン(GPPS)を異なるスクリュ回転数で押出した状態の計測結果⁹⁾で、上が熱電対挿入深さ0.4mm(加熱シリンダ内壁からの距離)、下が1.4mmの場合である。回転数が増加すると、計測開始時と終了時の温度差 ΔT が増加し、加熱シリンダ付近(0.4mm)よりも中央付近(1.4mm)で ΔT が増加する。また回転数が増加すると加熱シリンダ設定温度220°Cよりも温度が低下する傾向が読み取れる。

同手法は、スクリュ溝深さ方向温度分布を抽出できる可能性を示した点で画期的であるが、①スクリュ回転数が増加し熱電対の挿入・抜き出しサイクル時間が短くなった場合、熱容量の大きいシース熱電対では必然的に十分応答しきれないこと、②熱電対と周囲環境(加熱シリンダおよび温度勾配をもった樹脂)との間の熱伝導による熱電対温度の変動、すなわち熱伝導誤差が熱電対挿入長さや時間の関数であることから、挿入長さや時間がほとんど不可能であること、また③熱電対と流動樹脂との摩擦発熱による熱電対の温度変動をいかに定量化し補正す

図6 リングバーの形状と測定方法¹²⁾

るかなど、技術的課題も多く残されている。

2.3 シース熱電対によるリザーバ内温度分布計測法
リザーバ(シリンダ先端の樹脂溜り)内で樹脂のスクリュ半径方向の温度分布を熱電対によって計測する方法は、BrukerおよびPeischlによって試みられている^{11),12)}。図6に示すように、リング(半径 $R=22.5\text{mm}$)の中に直径0.8mmのシース熱電対を7対固定したバーを設けたリングバーを、射出成形機のスクリュヘッドとノズルとの間に挿入し計測を行うものである。国内でも、同方式のセンサユニットが福井らにより開発されており、計測結果が紹介されている^{13),14)}。図7は、リングバーの7つの

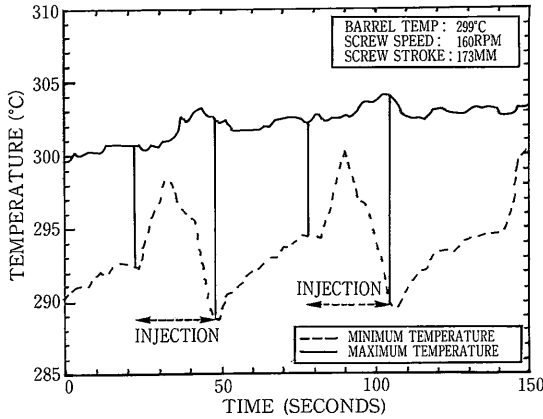


図7 リングバー方式による温度変化計測例
(スクリュ溝体積/射出量比1.32の場合)¹²⁾

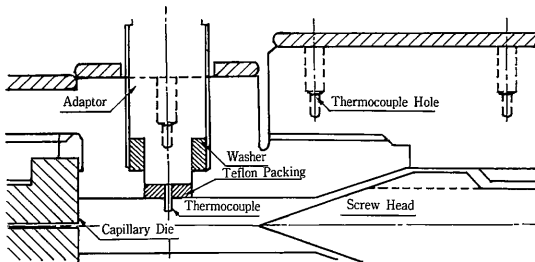


図8 シース熱電対によるノズル内温度計測装置の断面図²¹⁾

熱電対から出力される最大温度と最小温度の経時変化を示したものである。Peischlらは、スクリュ溝体積と射出量の比を変化させた場合の温度の計測を行い、同比が図7の温度差に最も影響を与えていること、すなわち樹脂の均一温度状態に対して最も影響を及ぼすパラメータであることを導き出した。リザーバ内のその他の温度計測例としては、スクリュヘッド先端にシース熱電対を埋設し、射出成形の動力学を樹脂温度から検討した結果がKamalおよびGomesらによって報告されている^{15),16)}。

同手法は、スクリュ先端に最も近い箇所での計測するため、ノズル内での計測と違い、流路断面形状の変化による流動圧損失の発熱の影響を受けずに、各種スクリュの可塑性・混練状況の評価ができる。しかし技術的な課題としては、①シース熱電対およびバーの熱容量が大きく応答性が悪いこと、②熱伝導誤差および摩擦発熱も大きいこと、③リングバーを挿入する分だけクッション量すなわち滞留部が生じ、実成形と条件が異なってくることから金型内での成形性との関連調査ができないなどの問題点も指摘される。

2.4 シース熱電対によるノズル内温度計測法

これまで述べた方法のほかに、加熱シリング内の樹脂の可塑化混練状況を評価する目的で、ノズル内に突き

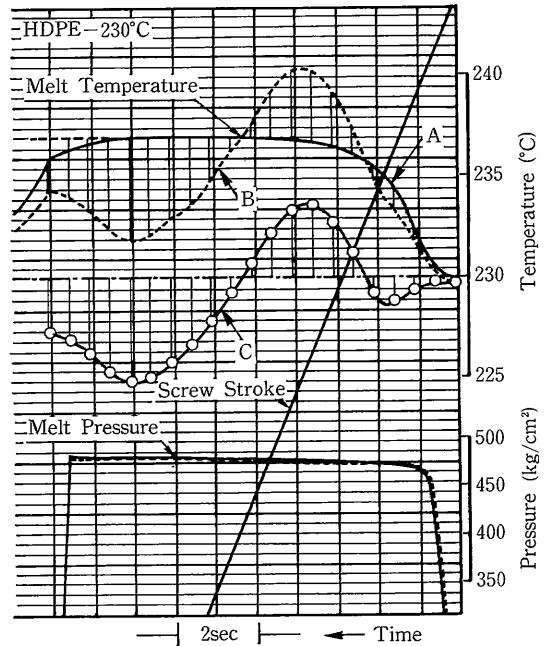


図9 シース熱電対によるノズル内温度および圧力変化 (HDPE)²⁰⁾

出して埋設されたシース熱電対によりその部分を通ずる樹脂温度を計測しようとする試みが、Huxham¹⁷⁾, Tycheoen¹⁸⁾, Verbraak¹⁹⁾, 天野ら^{20),21)}によって行われてきた。なかでも天野らは、図8に示す計測装置を製作し、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、これまででも度々問題となっていた以下の誤差を補正し、高精度の計測を行うことに成功している。

- (a) 加熱筒からノズルに至る樹脂流路の断面変化による流動圧損失に伴う樹脂温度の上昇
- (b) 断熱圧縮による樹脂温度の上昇
- (c) 熱電対と樹脂との摩擦発熱による熱電対の温度上昇
- (d) 熱電対と周囲環境との間の熱伝導による熱電対温度の変動 (熱伝導誤差)
- (e) 熱電対の応答速度による遅れ

図9の実線Aは、加熱シリング温度を精度よく制御して滞留時間30分を与え、樹脂温度を加熱シリング設定温度と等しくかつ均一にした後に射出した場合に得られたスクリュ軸方向の温度である。射出樹脂の温度が均一であるので、この温度変動は、(a)~(e)の誤差が加算されたものと見ることができる。一方破線Bは、実線Aと同一の成形条件下で、約30秒のサイクル時間にて連続射出を行った場合の第4ショット目の温度変化を示す。この破線には、(a)~(e)の誤差に加えて求めたい樹脂の温度変動が含まれる。(d)の熱伝導誤差の影響は1

ショットと4ショットで多少異なるが、同一の装置で計測を行い、ほぼ同一のスクリュ前進挙動と圧力変化が得られているので、破線Bから実線Aを差引き加熱シリング温度230°Cに加算することで、真の樹脂温度が実線Cのように求められる。

図10に本手法による計測結果の一例を示す。同図は形状の異なる12種類のスクリュを用いた場合の影響を調査したもので²²⁾、スクリュ溝内でのせん断発熱による樹脂温度の上昇をスクリュ溝を深くすることで防止し、また深溝化による予熱不足から発生する未熔融樹脂をバリアフライトで排除したNo.9のスクリュが1ショットの温度変動幅を最小(4°C)に抑える結果となっている。天野らは、さらにノズル流路内への熱電対の挿入深さを順次変化させ、ノズル半径方向の各位置での温度変化を計測し、その結果よりリザーバ内に計量される樹脂の3次元温度分布状態の推察も試みている²³⁾。本計測法はシース熱電対の本来の計測上の問題点をうまく排除し、

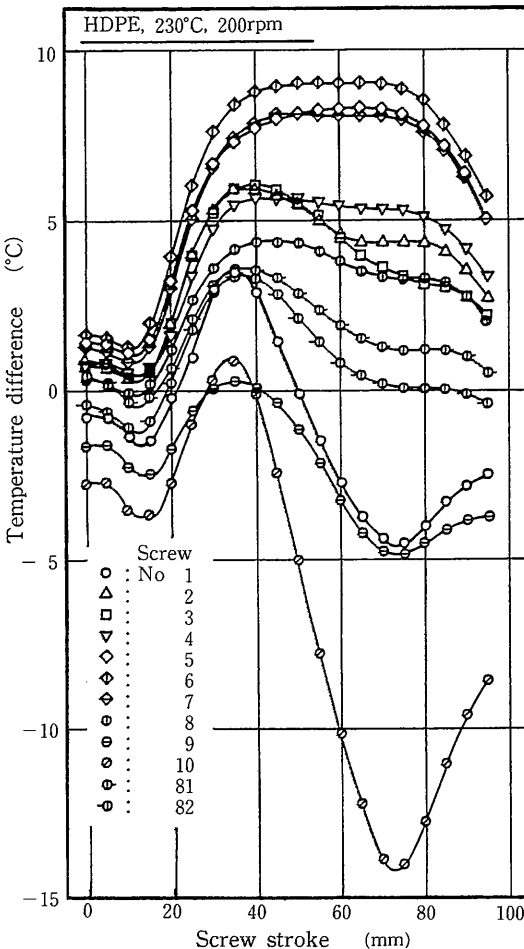


図10 スクリューデザインが樹脂温度に及ぼす影響 (HDPE)²²⁾

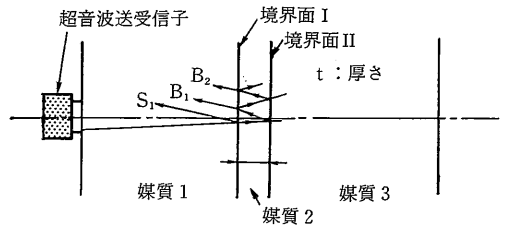
高精度の計測を行えることを初めて提示した方法と言える。ただし計測手順の煩雑さ、温度分布計測への適用性等には課題を残している。

3. 金型内樹脂の温度計測技術

3.1 超音波温度計測法

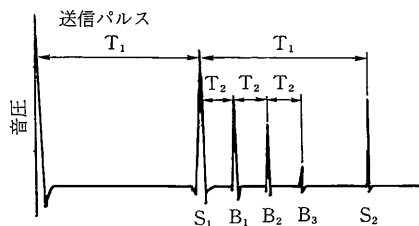
本計測法は、西脇らが超音波厚さ計の原理を応用して開発したものである²⁴⁾。その原理を図11(1)により説明する。媒質1の外側から超音波を投射すると、音響インピーダンスが異なる媒質1、2の境界面Iでその一部の超音波が反射して超音波送受信子の方へ戻る。その残りの超音波は境界面Iを透過して境界面IIで一部反射し、同送受信子の方へ戻る。戻ってくる超音波の強度は、各境界面における音響インピーダンスの値により変化し、両境界面からの反射波が戻る時間間隔は、媒質2の厚さとその音速により変化する。この超音波の反射波形を模式的に示すと(2)のようになる。金型に応用した場合、媒質1、3が金型に、媒質2がキャビティ内の樹脂に相当する。金型内に樹脂が充填されていない場合には、超音波は境界面Iでほとんど反射する。一方充填された後は樹脂へ透過するため境界面IIからの反射波が現れ、逆に境界面Iからの反射波の幅は減少する。さらに充填された樹脂が固化するとヤング率が変化し、音速が変わるため、 T_2 が変化する。このように反射波の時間間隔 T_2 および振幅を測定することによって、金型内樹脂温度や充填・固化状態を検出することができる²⁵⁾。上下方向から樹脂を挟み温度調節のできる簡易型を用いた実験結果、

Si (i=1,2,...): 表面エコー
Bi (i=1,2,...): 底面エコー



T_1 : 送信パルスと第1表面波との間の時間間隔
 T_2 : 第1表面波と第1底面波との間の時間間隔

(1) 超音波の伝播挙動



(2) CRT上の反射波形

図11 超音波温度計測の原理²⁵⁾

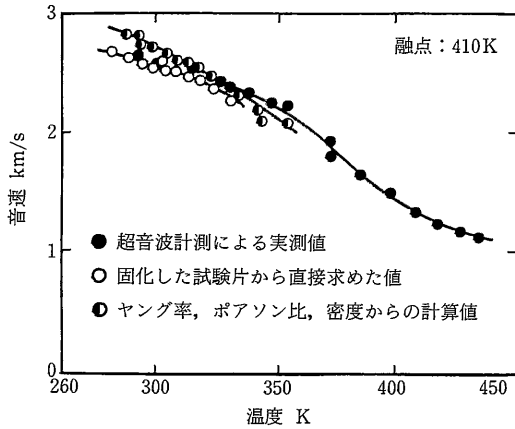


図12 音速と温度の関係 (HDPE)²⁶⁾

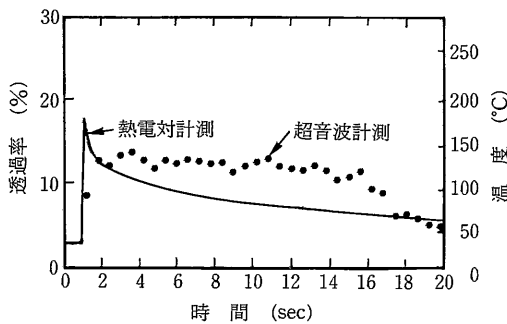


図13 超音波計測によるキャビティ内樹脂温度変化 (HDPE)²⁵⁾

および樹脂の固化状態におけるヤング率，ポアソン比，密度の計測結果より，図12に示す音速と温度の校正関係が得られる²⁶⁾。これは高密度ポリエチレン (HDPE) の場合であるが，具体的には，音速 $C = 2t / T_2$ (t ；キャビティ厚) を計算することにより金型内温度の計測が可能となる。図13は，HDPEを矩形キャビティに射出した場合の同手法により得られた温度変化である²⁵⁾。比較のために熱電対の出力を併記しているが，熱電対とほぼ同等の出力および応答性が得られている。

この計測法の特長として，①金型の外から計測できるため，キャビティ内や壁面にセンサを露出させる必要がなく，そのため流動を阻害しないこと，②センサ埋め込みなどの複雑な加工を必要としないことが挙げられる。しかし課題として，①樹脂が変わると音響インピーダンスが変化するため，そのつど音速と温度の校正関係を調査する必要があること，②キャビティ板厚方向温度分布の計測が困難であること，③高価であることが挙げられる。

3.2 素線熱電対による温度計測法

最も一般的な温度計測法でかつ，キャビティ板厚方向

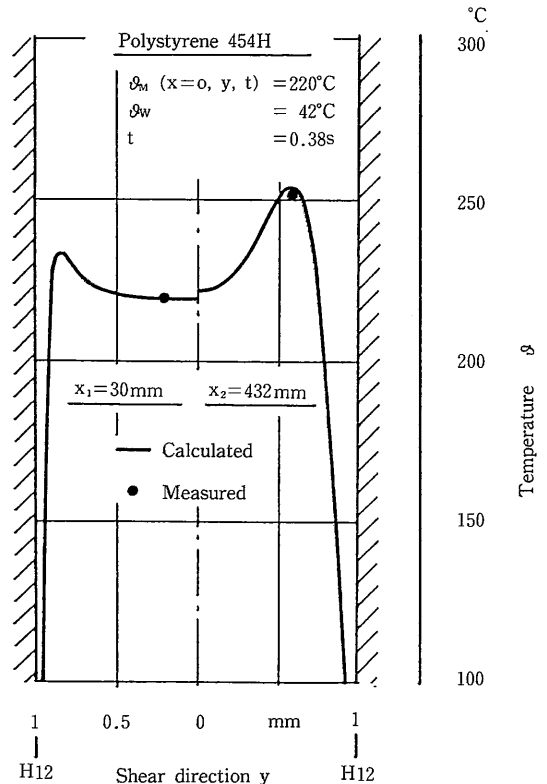


図14 素線熱電対によるキャビティ内温度計測例²⁷⁾

の温度分布計測を可能とする方法として，裸素線熱電対を用いた計測が，古くから行われている。Thienelらは，流動シミュレーション解の検証のために，矩形キャビティ内に1対の素線熱電対を樹脂流動方向に沿って流し，図14に示す結果を得ている²⁷⁾。図中の黒丸印が実際に計測された温度で，キャビティ壁面近傍におけるせん断発熱による温度ピークをとらえた例である。また最近では，黒崎らが，流動シミュレーションの検証および樹脂の固化過程の解析を目的として， $\phi 0.1\text{mm}$ の銅-コンスタンタン熱電対を3本貼り付けたアクリル板 ($0.5 \times 4 \times 15\text{mm}$) をキャビティ内に垂直に設置し，また同時にキャビティ壁面にも貫通穴を開けて熱電対を挿入し，キャビティ板厚方向および金型壁面の温度分布の同時計測を行っている⁹⁾。図15に射出・冷却過程における温度分布計測結果の一例を示す。熱電対の応答遅れ，ゲート・ランナー部を樹脂が通過する際に冷却を受けることなどによって，射出開始後0.25秒までは温度が低く出力されるものの，その後は，信頼性のあるデータが得られている。

これらの方法は，原理が単純で簡単に計測ができ，特に素線のみを用いる場合は，熱容量を極力小さくできるため，高応答性を引き出せる。しかし①キャビティ板厚

方向の詳細な温度分布を計測するには多数の熱電対を狭いキャビティ内で樹脂の流れに対し、精度よく設置する必要があり困難を伴うこと、②カップリング部の集積度およびその位置決め精度に限界があること、また③強度が低く、繰り返し計測ができないことなどに問題を残している。

3.3 その他の温度計測法

赤外線放射温度計も金型キャビティ内温度の計測に広く利用されているが、すでに2.1にてシリング内温度計測例により解説を加えているのでここでは割愛する。現在開発が進められている興味深い方法に蛍光法がある。図16に示すように蛍光物質の燐光時間および燐光強度は、温度に依存することが知られている²⁸⁾。黒崎らはこの現象に着目し、樹脂に蛍光物質 (ZnCd) S:AG を添加し、アクリル窓を有する可視化金型内の流動樹脂にストロボ光を照射して、その燐光時間による温度分布の計測を試みている²⁹⁾。同手法は、カメラ・発光装置に精度が要求され、また板厚方向温度分布の計測には、なお技術課題を残すものの、型内樹脂温度分布を非接触で、かつ面情報としてとらえることができる点で今後が期待される手法と言えよう。

4. 集積熱電対による温度分布計測法

著者らは、3.2項で述べた素線熱電対法の欠点を補い、金型キャビティ板厚方向温度分布を、高集積度・高精度・高位置決め精度・低コストで計測できることを目指して、めっきにより多数の熱電対パターンを薄いポリイミドフィルム上に集積形成した集積熱電対センサ³⁰⁾を、新たに提案・開発した。本センサは、ノズル内温度分布計測にも適用することができる³¹⁾。図17にセンサ外観を示す。本センサのカップリング部は、8.4mmの測定範囲内に0.3mm

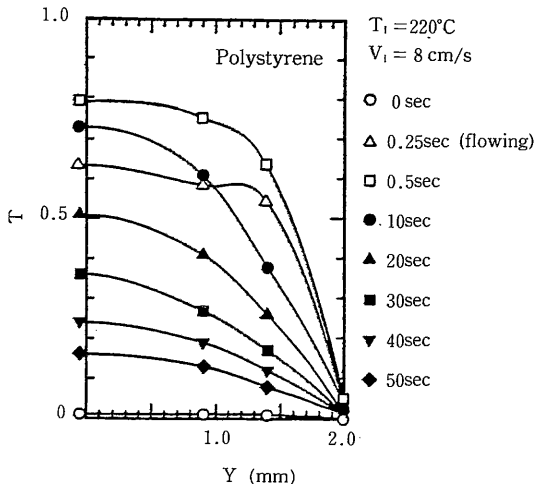


図15 素線熱電対によるキャビティ内板厚方向樹脂温度分布計測例⁹⁾

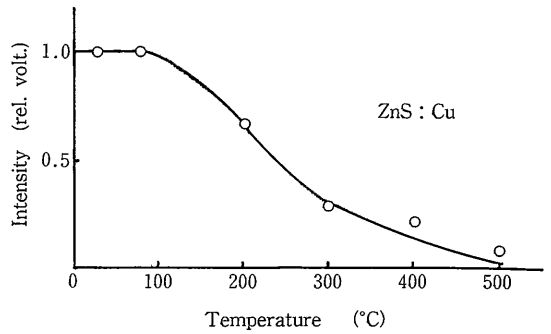


図16 蛍光強度の温度依存性²⁸⁾

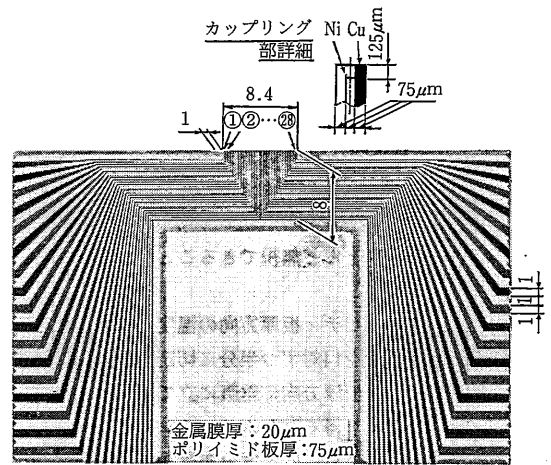


図17 集積熱電対センサの外観・寸法³²⁾

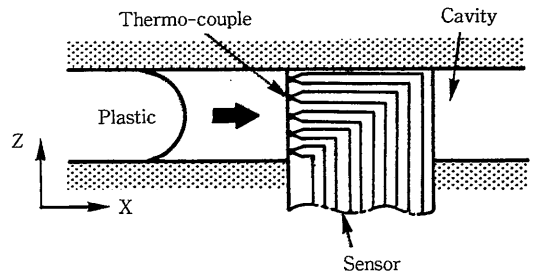


図18 集積熱電対センサによるキャビティ板厚方向樹脂温度分布の測定原理³³⁾

間隔で28対配されている。合金組成差により熱起電力に誤差が生じないように銅とニッケルによりパターン形成されている。応答性は、シリコンオイル使用時において時定数 τ (63.2%応答に要する時間) が70msと非常に小さく、熱伝導誤差については、樹脂流れに平行な部分の素線長さを6mm以上とすることで、 $\pm 3^\circ\text{C}$ 以内に抑えられることが確認されている。またセンサと流動樹脂との間の摩擦発熱による温度誤差は、本センサの使用射出速

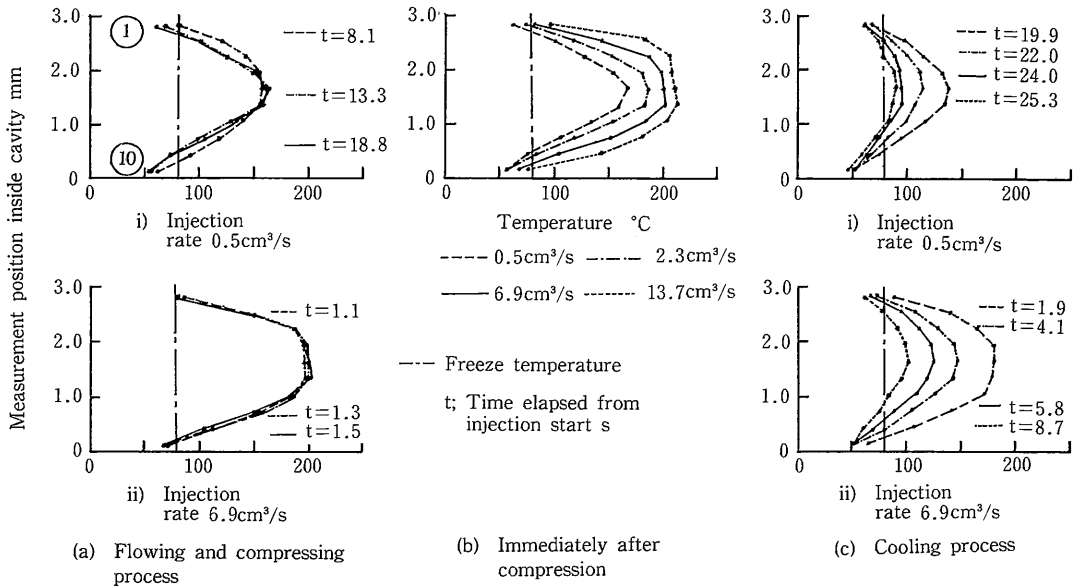


図19 集積熱電対センサにより得られたキャビティ板厚方向樹脂温度分布 (GPPS)³³⁾

度限界においてほとんど無視できることが明らかにされている³²⁾。

本センサをキャビティ板厚方向の温度分布計測に使用する場合、センサを14対ずつ半分に切断し、図18に示すようにキャビティ板厚方向に垂直に立てて設置する。図19に同センサにより得られたポリスチレン (GPPS) の射出開始後の各時間における温度分布計測結果を示す³³⁾。(a)の射出率0.5cm³/sでは、流動初期の放物線状温度分布が、流動後期では、中央部は昇温しかつ壁面近傍で温度降下した尖鋭化傾向を呈する。これに対し6.9cm³/sでは、流動過程を通してほぼ定常的な温度分布が示される。(b)は圧縮過程直後の各速度の温度分布比較である。速度の増加とともに温度は上昇し、中央部形状は平坦となり、栓流に近づくと考えられる。特に13.7cm³/sでは完全な台形状分布となる。(c)の冷却過程では、急激に均熱化と冷却がなされるが、両者の冷却速度に大きな差は、認められない。著者らは、このほかに赤外線放射温度計測との比較実験³⁴⁾や、流動シミュレーション結果との比較実験³⁵⁾も行っている。

本センサをノズル内温度分布計測に適用する場合、図20に示すノズル内温度計測ユニットを使用する。図21は連続40ショット射出した場合の20から35ショット間の射出開始7.0秒後における温度偏差 (標準偏差) 分布を示したものである³⁶⁾。流路中央ではなく、中央と壁面のほぼ中間の2mm位置において温度偏差のピークが見られ、また回転数が増加するほどその値が増加する傾向を明瞭に映し出している。

本手法の特長は、狭いキャビティおよびノズル流路内

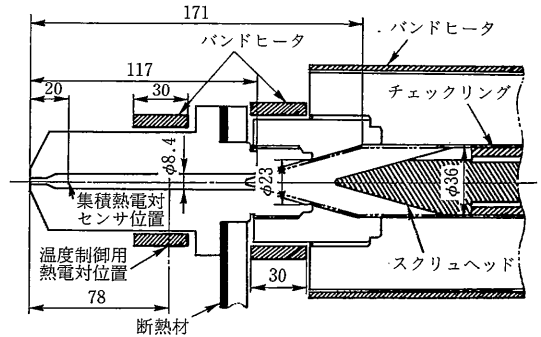


図20 ノズル内温度計測装置の断面図³⁶⁾

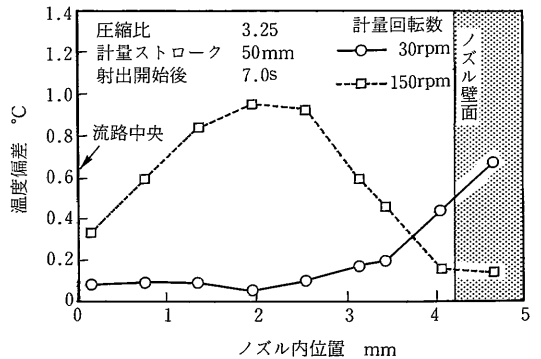


図21 ノズル内温度偏差分布 (PP)³⁶⁾

の詳細な温度分布を一度に計測できることのほか、①センサが薄膜で熱容量がシース熱電対に比べて小さいため、応答性が良いこと、②流動方向に平行な部分を設けたパ

ターン配線をしているので熱伝導誤差も小さいこと, ③安価であることなどが挙げられる。市販射出成形機へのノズル温度計測ユニットの装着が簡単であることも, 本センサの計測作業上の利点と考えられる。

以上のように, 集積熱電対センサは, 前項までに解説したほかの計測法には見られなかった優れた特長を有している。現在, キャピティ内温度計測時において約10ショット, またノズル内温度計測時において樹脂PP・回転数150rpmの条件下で40回以上の連続射出に耐えることを確認しているが, 今後さらにその用途を拡大するためには, 高出率・高スクリュ回転数の条件下で連続成形に耐えられるセンサ強度の確保, 集積度のさらなる向上が課題となる。

5. おわりに

本解説を終えるにあたり, まとめて以上各種温度計測技術を相互に比較しながら表1に一括して掲げることとしたい。

一般に接触式温度計測センサは熱電対あるいは測温抵抗体を軸に用いられているが, 射出成形の分野では研究用と成形モニタ用, スポット計測用と分布計測用を問わず, 上述のように圧倒的に熱電対が主流となっている。これに対して, 非接触式温度計測センサは, 特に成形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。

前者の熱電対などの接触式センサは, 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る利点と, その一方で接触式なるがゆえ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, 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。集積熱電対センサは, まさにこの過程で開発された原理的には古くて形態の新しいセンサと位置づけられよう。また後者の非接触式センサは, 放射エネルギー, 超音波, 蛍光とさまざまな原理に基づく可能性が探索され, 概して間接的な計測ゆえ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。いずれも基礎的な研究課題を多く残しているが, 今後基礎実験データの蓄積とともに信頼性を確立し, 前記熱電対センサの限界を補完するセンサ技術として発展することが期待される。

新しい技術的な工夫・新しい原理に基づく計測技術の開発は, 未知の成形現象解明に大きな力となるとともに, 新しい成形技術開発への可能性を秘めています。著者らの解説がそのため一助となれば幸いである。

(1991年8月30日受理)

参考文献

- 1) 青地保光, 奥山和彦: 成形加工, 1-4, (1989), 415.
- 2) 横井秀俊, 早崎 進, 高橋 博: 高分子学会予稿集, 37-9, (1988), 2703.
- 3) 小山洋典, 盛田良三, 宮本博文, 飯田 高: 成形加工, '89, (1989), 101.
- 4) 横井秀俊, 林 高樹, 平岡弘之: 生産研究, 39-7, (1987), 20.
- 5) 黒崎晏夫, 佐藤 勲, 石井浩一郎: 日本機械学会論文集 (C編), 56-522, (1990), 248.
- 6) 林 博己: プラスチックス, 31-9, (1980), 99.
- 7) 林 博己: プラスチック成形技術, 1-4, (1984), 46.
- 8) Galskoy, A., and Wang, K.K.: Plast. Eng., 34-11, (1978), 42.

表1 各種温度計測法の評価

計 測 法	接 触 / 非 接 触	校 正 の 要 / 不 要**	応 答 性	熱伝導・摩擦 発熱誤差	温度分布計測 適用性***	研 究 用 / モ ニ タ 用	価 格	
熱 電 対 法	シース熱電対*	接 触 式	不 要	悪	大	低 密 度 多 点 計 測 可	両 用	低
	素線熱電対	接 触 式	不 要	良	小	低 密 度 多 点 計 測 可	研 究 用	低
	集積熱電対	接 触 式	不 要	良	小	高 密 度 多 点 計 測 可	研 究 用	中
赤外線放射 温度計測法	非 接 触 式	要	優	/	不 可 (平均温度のみ)	両 用	高	
超音波温度 計 測 法	非 接 触 式	要	良	/	困 難 (原理的には可)	両 用 (研究段階)	高	
蛍 光 法	非 接 触 式	要	優	/	可(面情報としての抽出も可)	研 究 用	—	

*リングバー方式・挿入抜き出し方式を含む

**一度校正後における計測毎の校正の要/不要

***樹脂内部の温度分布計測への適用性

- 9) 盛田良三, 石川善孝, 宮本博文, 桑野 理: 成形加工'91, (1991), 373.
- 10) Esseghir, M., and Sernas, V.: SPE Tech. Papers, (1991), 54.
- 11) Bruker, I., Miaw, C., Hasson, A., and Balch, G.: Polym. Eng. Sci., 27-7, (1987), 504.
- 12) Peischl, G.C., and Bruker, I.: Polym. Eng. Sci., 29-3, (1989), 202.
- 13) 福井雅彦, 中村伸之: 型技術, 6-8, (1991), 112.
- 14) 福井雅彦, 佐藤 功: 成形加工'91, (1991), 43.
- 15) Kamal, M., R., Patterson, W., I., and Gomes, V., G.: Polym. Eng. Sci., 26-12, (1986), 854.
- 16) Gomes, V., G., Patterson, W., I., and Kamal, M., R.: Polym. Eng. Sci., 26-12, (1986), 867.
- 17) Huxham, T., S.: SPE. J., 18-8, (1962), 899.
- 18) Tychesen, W., and Georgi, W.: SPE. J., 18-12, (1962), 1509.
- 19) Verbraak, C., P., M., Janssen, J., M., H. and Meijer, H., E., H.: J. of Reology, (1990).
- 20) 天野 修, 宇津木史郎: 成形加工, 1-4, (1989), 364.
- 21) Amano, O., and Utsugi, S.: Polym. Eng. Sci., 28-23, (1988), 1565.
- 22) 天野 修: 成形加工'91, (1991), 5.
- 23) Amano, O., and Utsugi, S.: Polym. Eng. Sci., 29-3, (1989), 171.
- 24) 西脇信彦, 堀 三計, 堤 正臣: 精密工学誌, 52-3, (1986), 111.
- 25) 堀 三計, 西脇信彦: 成形加工'89, (1989), 109.
- 26) 西脇信彦, 堀 三計, 堤 正臣: 型技術, 2-7, (1987), 46.
- 27) Thienel, P., and Menges, G.: Polym. Eng. Sci., 18-4, (1978), 314.
- 28) Nakatani, N., et al.: Proc. 4th Int. Symp. on Flow Visualization, (1986), 179.
- 29) 黒崎晏夫, 佐藤 勲: 第38回塑性加工研修会資料, (1990)
- 30) 横井秀俊, 村田泰彦, 塚越 洋: 昭和62年精密工学会秋季大会講演論文集, (1987), 533.
- 31) 村田泰彦, 曾布川敦, 内藤貴弘, 中野和良, 横井秀俊: 成形加工'90, (1990), 221.
- 32) 村田泰彦, 川崎 篤, 澤田 聡, 横井秀俊: 成形加工'90, (1990), 223.
- 33) 村田泰彦, 横井秀俊, 塚越 洋: 高分子学会予稿集, 37-9, (1988), 2709.
- 34) 村田泰彦, 横井秀俊, 塚越 洋: 昭和63年度精密工学会秋季大会講演論文集, (1988), 285.
- 35) 村田泰彦, 渡辺浩史, 岡 克典, 横井秀俊: 成形加工'90, (1990), 227.
- 36) 村田泰彦, 植田幸治, 西 芳夫, 平野彰士, 坂井秀敏, 横井秀俊: 成形加工'91, (1991), 39.