

スマート金型の応用展開に関する研究

山田俊郎*、窪田直樹*、松原早苗**、多田憲生†

Application development of smart mold system

YAMADA Toshio*, KUBOTA Naoki*, MATSUBARA Sanae** and TADA Norio†

金型によるものづくりの高品質化・効率化を支援する技術として、スマート金型の開発を進めている。スマート金型は、金型にセンサを組み込み、成形時の型内状態を監視・記録するとともに、成形の良否を判断する機能を搭載した金型である。本年度の研究開発では、スマート金型の機能拡張として改良型ガスベントセンサとひずみゲージ式圧力センサの対応を実装するとともに、大型製品の試験型にスマート金型システムを取付け、システムの有効性を検証した。

1. はじめに

ものづくり産業の現場では、機械装置から得られる各種データを分析して、生産の効率化や製品の設計に活かす取り組みが進められている。NC加工機等の制御装置が組み込まれた工作機械では、すでに機械制御で使われているデータを取り出すだけであるため、データ収集や分析にコストはかかるものの、技術的には容易に実現が可能である。しかし、金型や手動の加工機など、デジタル制御装置を持たない生産設備からのデータ収集は困難であり、特に金型では収集する物理量の多様さや使用環境の過酷さから、技術的な困難を伴う。

一方で、金型による部品加工は年々高度化しており、プラスチック射出成形の分野では、自動車産業における金属部品の置き換えによる耐熱性樹脂の成形や、電子産業における部品の微細化など、高度な樹脂成形が求められている。また、プレス加工の分野においても、切削加工の置き換えによる高精度化、鋳物部品の置き換えによる複雑形状化など、高度な加工が求められている。

このような背景のもと、プラスチック射出成形の生産立ち上げの効率化や成形不良の発見を目的に、成形中の金型内の圧力や温度を監視するスマート金型の開発を進めている^{1,2)}。昨年までの研究において、金型に搭載して圧力・温度・振動を記録する小型測定モジュールを開発し、そのデータ解析からスマート金型の有用性を示すことができた。本年度は、新たなセンサに対応するモジュールを開発し、プレス金型にも対応できるシステムに拡張するとともに、大型成形品の金型にシステムを取付け、成形状態のデータ取得を行った。

2. 試験型の製作と新規センサの検証

2.1 CHC試験型の製作

本研究開発の実証のため、共同研究企業によって製作

した大型射出成形品の試作型にスマート金型システムを実装した。試作型は、自動車エンジンのシリンダヘッドカバー（CHC）を模擬した形状（図1）であり、そのサイズは565×257×45(mm)、成形品重量は650gほどである。樹脂材料はガラスフィラーを含んだナイロン樹脂（PA66-GF30）を用いた。現在、多くのCHCはアルミダイキャストで製造されているが、高級車では軽量化のため同材料で生産されているものもある。しかし、同材料製CHCは成形品の反りが大きく、歩留まりが悪いことが課題となっている。

成形品の外形とセンサ等の配置を図1に示す。大型の成形品であるため、成形は4点のゲートを用い、ゲートを開くタイミングを制御するリレー成形で成形した。図1のG1～G4（▲）がゲートの位置である。型内圧力センサはゲートの近傍および末端の可動側に6点取り付けた（P1～P6：■）。型表面温度センサは、固定側4点（T1～T4）および、可動側5点（T5～T9）の9点（●）に取り付け、T2とT5は製品を挟んでほぼ対象の位置に設置した。型開きセンサは可動側入れ子型のすぐ外側の側板に取り付け、ガスベントは成形末端に近いP5、T9の外側のベント溝から取った。なお、図1において表側（見えている側）が固定型側であり、裏側が可動型側である。

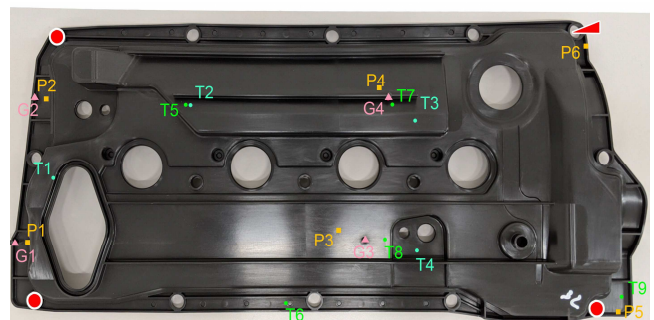


図1 CHC形状試作品とセンサ位置

* 技術支援部、** 情報技術部

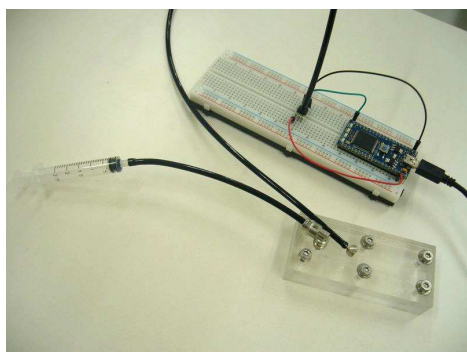
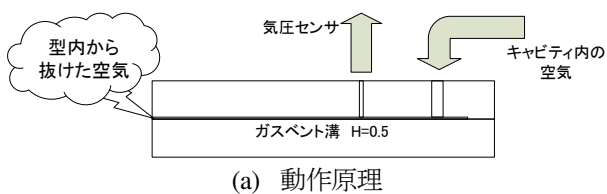
† 株式会社岐阜多田精機

2. 2 ガスベントセンサの改良

一昨年度の研究において、極細熱電対を用いてその温度変化から金型内の空気の抜け状態を検出するガスベントセンサを提案し、昨年度の試験型において効果を検証した。このセンサによってガスの抜け状態を検出することができたが、センサの感度が低いこと、極細熱電対が金型のメンテナンス時に切れやすいことが課題となっていた。ガスの抜けの状態は、ベント溝に圧力センサを設置して空気圧の変化で検出することが考えられるが、金型内に設置できる小型の圧力センサでは金型の温度に耐えられない。そのため、ベント溝から空圧パイプを通して金型外の圧力センサに空気を導き、ベント圧の検出が可能か検証を行った。

ガスベント検出の原理は、図2(a)に示のようにガスベント溝を通して外に抜ける空気を型外の圧力センサまで導出して圧力を測定する。ただし、ベント溝内の圧力がどの程度であるか、ベント溝の体積に対して大きな体積を持つ空圧パイプで圧力が伝搬するか、という不明点があったため、図2(b)の検証モデルを作成して検出状況の確認を行った。検証モデルによって十分な反応が得られることが確認できたため、試験型に組み込んだ。

試験型は、CHC形状のキャビティを取り囲むように周囲にベント溝が切られており、型外に空気を抜けやすくしている。複数あるベント溝のうち、最終末端部に近いベント溝から圧力を導出することとし、図3のように空圧パイプを接続する型の改修を行った。空圧パイプは金型の上に設置されたスマート金型の記録モジュールに接続され、記録モジュール内の気圧センサによって圧力変化が測定される。この圧力センサは、型表面温度セン



(b) 機能検証モデル
図2 外部導出型ガスベントセンサ

サと電氣的に互換性のある設計とし、温度センサと入れ替えて利用することができるようにした。

成形試験によって得られたガスベント検出例を図4(a)に示す。縦軸はA/Dコンバータ(12bit)による検出値であり、物理的な単位には変換できないが、ガスの抜けに対してデジタル量で1200の変化が見て取れる。図4(b)の一番下の線は前年度に検証した極細熱電対型ガスベントセンサの反応（熱電対であるため他の温度センサと同じ扱いとしている）であるが、デジタル量の変化は10程度である。検証に用いた金型のキャビティ形状が異なっているが、改良したガスベントセンサの感度が良いことが確認できた。また、金型内に電氣的な機構が無いため、耐久性も高いと考えられる。

2. 3 ひずみゲージ式型内圧力センサへの対応

型内圧力センサには、圧電素子を用いたセンサと、ひずみゲージを用いたセンサがあり、これまでスマート金型システムでは圧電式のセンサを採用していた。採用理由は、電氣的な調整を行わなくても比較的精度の高い結果が得られ、製造現場での扱いが容易になるためである。その反面、価格が高いため共同研究先企業の川下企業から、ひずみゲージ式センサへの対応を求められた。圧力センサの形状は図5に示すものであり、ひずみゲージ式のセンサは成形品の押し出しピンと一体となっている。

また、ひずみゲージは圧力のみでなく力の計測にも広く用いられているセンサであり、スマート金型システム

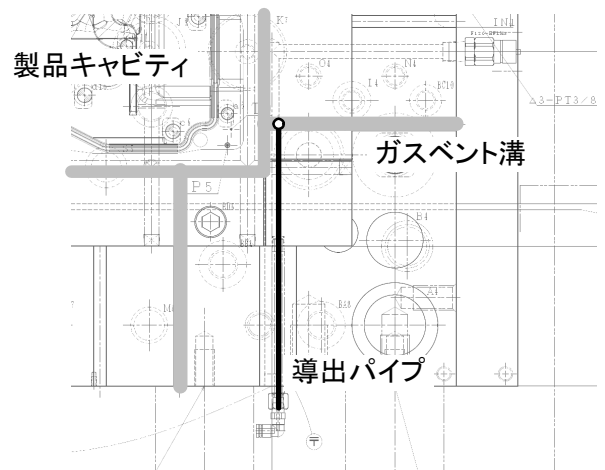
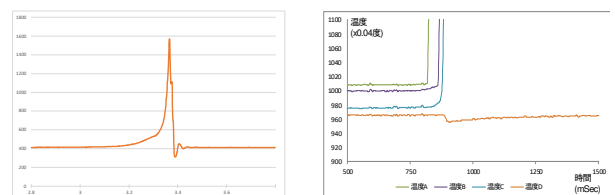


図3 外部導出型ガスベントセンサに対応する型の改修(成型品の右下部分)



(a) 外部導出型 (b) 極細熱電対型
図4 ガスベントセンサの反応例

をプレス金型に適用するためにも対応が求められた。プレス金型では、振動、温度、潤滑油など、射出成形金型以上に使用条件が過酷であり、センシングには構造が簡単で堅牢なひずみゲージが適していると考えられる。

ひずみゲージ式の圧力センサは、個体差が大きいこと、温度で値が変化することなどから、電気的な調整が必要であり、これに対応した入力回路を設計・製作した。試作した回路基板を図6(a)に示す。この基板1枚で4点のセンサが接続でき、基板からの出力は圧電式の圧力センサと互換性のあるものとしている。そのため、図6(b)に示すように、スマート金型システム内で基板を入れ替えて使用することが可能である。

スマート金型システムでは、これまでも多様なセンサに対応したモジュール基板を開発してきており、図7に示すセンサの利用が可能である。例えば、図6(b)のモジュールの例では、手前からメイン基板、ひずみゲージ式型内圧力センサ基板、型表面温度センサ基板、圧電式型内圧力センサ基板、型開きセンサ基板の5枚が収められており、基板とは別にガスベントを検出する気圧センサも実装されている。スマート金型システムはメイン

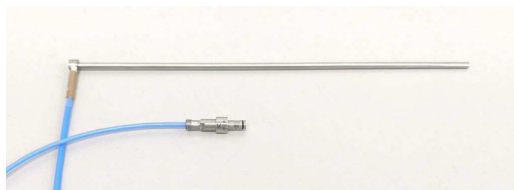
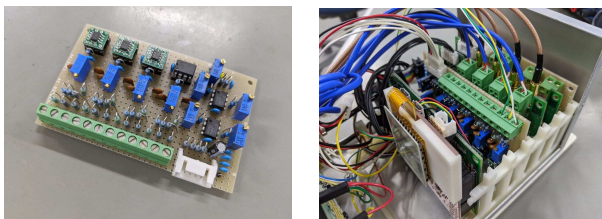


図5 型内圧力センサ
上：ひずみゲージ式(押し出しピン形状)、
下：圧電式



(a) ひずみゲージ式 圧力センサ基板
(b) スマート金型 システムへの実装

図6 センサ基板モジュール

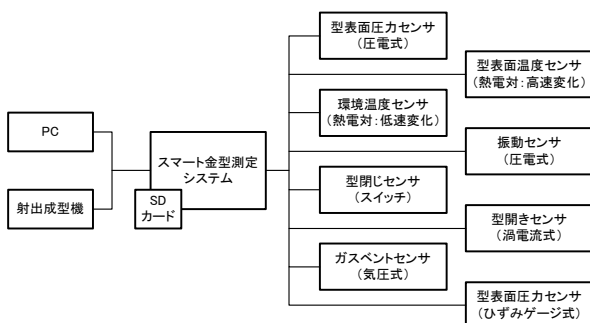
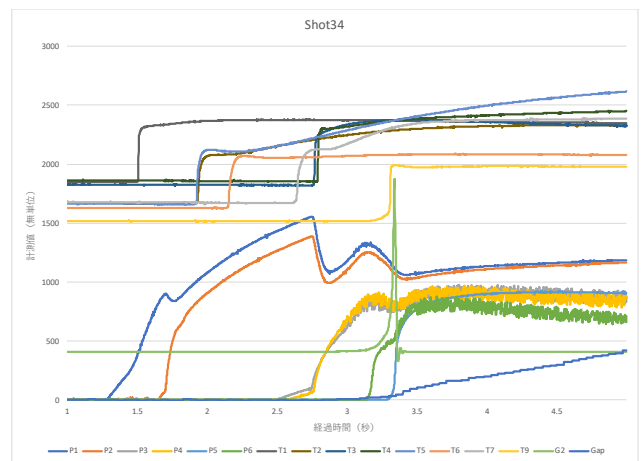


図7 スマート金型システムの構成

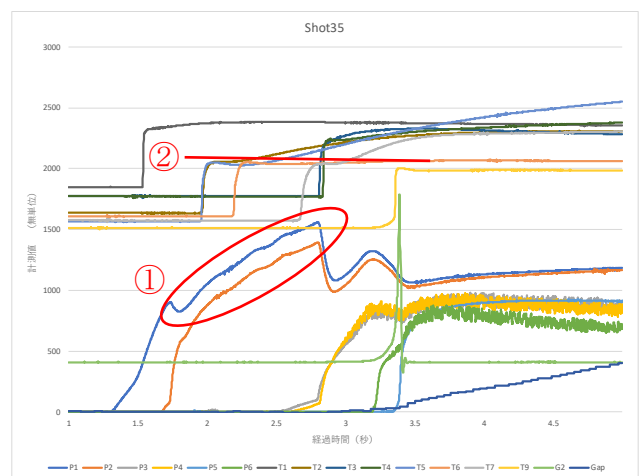
基板の入力点数（アナログ 20 点、デジタルの点数はサンプリングレートによる、合計 32 点）の範囲内でセンサモジュールを差し替えて使うことができる設計であるため、射出成形金型、プレス金型に必要な種類のセンサおよび点数に対応が可能である。柔軟性とコストパフォーマンスを両立させたシステムとなっている。

3. CHC 試験型における測定データの検証

大型成形品の成形におけるスマート金型システムの検証を目的に、CHC 型でデータ取得の成形実験を行った。図1で示す点の型内圧力および型表面温度、ガスベントセンサ、型開きセンサのデータを 20 ショット分取得してシステムの検証を行ったところ、今年度に提案したガスベントセンサの有効性が確認できたが、一部の型表面圧力センサ (P3,4,6) のデータに発振が見られた。センサの取り付け方や接続に問題がある可能性があり、対策が必要である。取得したデータの時系列波形の一例（ショット番号 34,35）を図8に示す。横軸は型が閉じてからの時間経過であり、型閉じ1秒後から5秒後までの4



(a) ショット番号 34



(b) ショット番号 35

図8 測定波形の例

秒間(射出開始から、充填、保圧の途中まで)の変化を表示している(成形サイクルは約45秒)。縦軸は測定値であり、複数の種類のセンサを同一グラフで示しているため、センサデータのデジタル値(無単位)としている。グラフの各ラインは、圧力(P1~6:測定値0から立ち上がる6本のライン)、温度(T1~9,T8は欠番:測定値1500よりも上から立ち上がる8本のライン)、ガスベント(G2:測定値450あたりから立ち上がるライン)、型開き(Gap:3秒過ぎから緩やかに立ち上がるライン)であり、物理量への変換は、圧力が×0.05MPa、温度が×0.04°Cである。

ショット番号31から38の8ショット分の成形品に対して、成形品の反り量と成形データの比較検討を行った。反り量は図1の丸印の個所(下側両端の2点と左上)を平面に固定し、固定した平面と三角の点(右上)の隙間を測定した。その結果を図9に示す。ショット31はチョコ停後の最初のショットであったため反り量が多くなったと考えられ、図10に示す圧力センサP1の波形の重ね合わせからも他のショットとは型内状態が異なっていたことが分かる。しかし、これまでに行ってきた特徴量分析(波形のピーク値やピーク到達時間、立ち上がり時間などを特徴量とする分析)では、他の7ショット間の差異をこの圧力波形から説明することが困難であり、他の型内圧力センサ波形や型表面温度センサ波形についても明らかな違いは見られなかった。今回の成形が大型成型品のリレー成形であったため、圧力の変化が単調で

はなくゲートの開きに伴って変動していること、型表面温度が樹脂フローの先端が到達した立ち上がりした後でさらに上昇することなど、これまで実証試験を行ってきた単一ゲートの射出成形とは型内の状況が異なっており、従来の特徴量では分析できなかったものと考えられる。

センサ波形全体を見て、反り量が最も少なかったショット35と他の波形を比較検討したところ、ショット35には、圧力の上昇中にぶれが見られる(図8(b)①)、温度センサT2,5,6,7の立ち上がりピーク値がほぼ同じ(図8(b)②)、といった特徴が見られた。サンプル数が少ないため、これらの特徴が反り量に関係していると確定はできないが、これまで特徴量としていた量以外の部分で成形の判断が必要であることが示唆された。

4. まとめ

スマート金型システムを大型成型型に搭載し、改良したガスベントセンサを含むシステムの機能の有効性を検証した。改良したガスベントセンサは、従来のガスベントセンサよりも感度が高く、耐久性も優れていることが確認できた。また、スマート金型システムをひずみゲージ式の圧力センサにも対応させ、同形式のセンサを使用している川下企業のニーズに応えるとともに、プレス型への展開を視野に入れた機能拡張を行った。

テスト成形から得られたデータ分析においては、大型品の成形であることによる波形の違いから、従来の特徴量分析が有効に機能しなかった。今後はAIを活用して波形全体を見た分析の導入が必要であると考えられる。

【参考文献】

- 1) 山田ら, "生産性向上に資する射出成形スマート金型の開発(第5報)", 岐阜県情報技術研究所研究報告 第17号, pp. 16-19, 2016
- 2) 山田ら, "インサート成形の生産性向上のための高機能金型に関する研究(第5報)", 岐阜県情報技術研究所研究報告 第20号, pp. 11-14, 2019

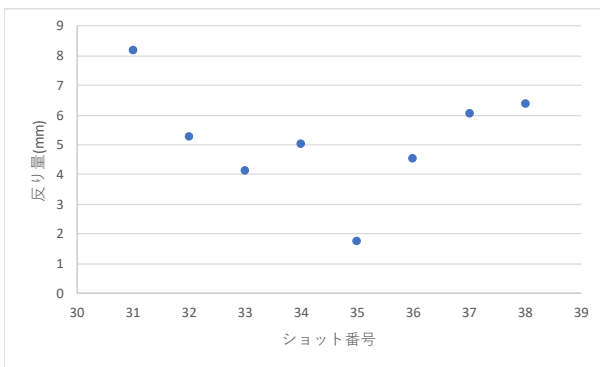


図9 ショットごとの反り量

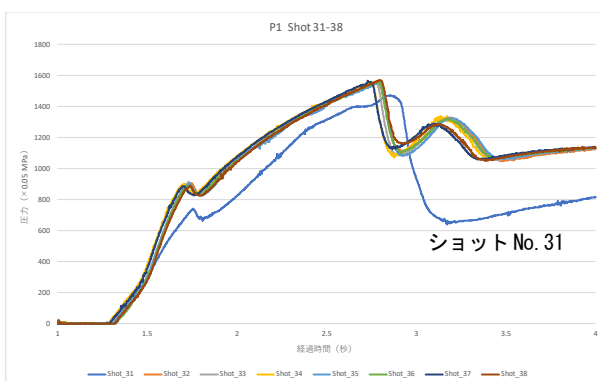


図10 ショットごとの型内圧力センサP1の波形