

# 生産性向上に資する射出成形スマート金型の開発(第3報)

## — 金型搭載小型ロギングシステムの設計と試作 —

山田 俊郎, 坂東 直行, 平湯 秀和, 棚橋 英樹,  
丹羽 厚至\*, 窪田 直樹\*, 多田 憲生\*\*

### A study on a smart injection mold (3<sup>rd</sup> Report)

- The design of a mold appendable small logging system and an experiment with a prototype -

Toshio Yamada, Naoyuki Bando, Hidekazu Hirayu, Hideki Tanahashi,  
Atsushi Niwa, Naoki Kubota, Norio Tada

**あらまし** プラスチック射出成形における生産立ち上げ時間の短縮化, 不良成形品の発見を目的に, 複数のセンサを取り付けた金型システム(スマート金型)を開発している。成形時に変化する型内の圧力や温度など時系列データを取得し, ビッグデータ解析することで現在のショットが良品と異なるのかを判別することが可能となる。本報では, 金型に搭載できる小型のデータ収集システムの開発と測定データの妥当性について報告する。昨年度の測定に用いた汎用システムで得られたデータとの比較から, 提案システムで得られるデータも成形状態の同一性を確認するための指標となり得ることを確認した。

**キーワード** 射出成形, 金型, センシング, ビッグデータ

## 1. はじめに

プラスチック射出成形の成形条件決定の迅速化や製品の不良発見, さらには流動解析シミュレーションとの比較検証を行うため, 金型内にセンサを取り付け, 成形状態の監視ができるスマート金型の開発を進めている。昨年度の研究<sup>[1]</sup>において, JISの引張り試験片が成形できる金型に各種のセンサを取り付けた金型を試作し, データ取得の検証を行った。取り付けたセンサは, 型表面の樹脂圧力を測定する型内圧力センサ, 型表面の樹脂温度を測定する型表面温度センサ, 型の奥の温度を測定する型内部温度センサ, 可動型の振動を測定する振動センサである。この金型でデータ取得実験を行ったところ, 同一成形条件下でのデータ再現性, 不具合時の異常データ検知の可能性が確認でき, 生産現場で有効なシステムとなり得ることを確認した。また, 流動解析シミュレーションとの比較検証においても, モデルの詳細度を高くするとシミュレーション結果が測定データに近くなる傾向が確認でき, シミュレーションの精度向上にも有効であることがわかった。

昨年度は, センサシステムの有効性を検証することが目的であったため, 汎用のアンプやロガーを組み合わせ

てシステムを構築した。汎用システムの組み合わせであることから, 全体にシステムが大がかりであり, セットアップに時間を要する。生産現場において日常的にセンシングシステムを用いるには, システムの小型化や容易な取り扱いが求められるため, 本年度は金型に搭載できるサイズの小型ロギングシステム(図1)を開発した。

本報告では, スマート金型のデータ収集に特化した小型のデータロガーの開発とデータ検証について報告する。データロガーは, 必要な機能を絞り込み, 必要最小限の回路構成とすることで小型化を図った。また, 開発ロガーで取得したデータと汎用システムで取得したデータを比較し, 開発システムで得られるデータの妥当性について検証した。

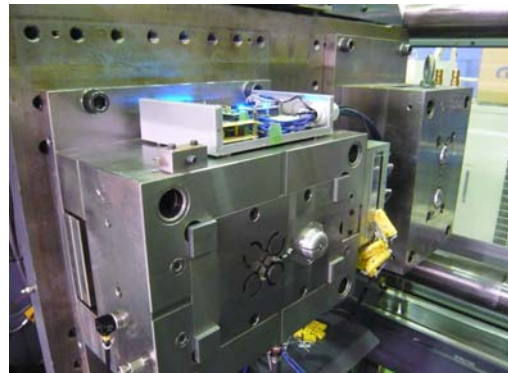


図1 金型搭載データロガー

\* 岐阜県産業技術センター 環境・化学部

\*\* 株式会社 岐阜多田精機

## 2. データロガーの設計

昨年度に構築した汎用のアンプやロガーを用いたシステムは図2に示す構成であり、圧力センサ4点、型表面温度センサ8点、型内部温度センサ4点、加速度センサ3軸の測定が可能であった。小型ロガーの開発にあたってなるべく多くの入力数を確保することが望ましいが、採用したマイコン(mbed : LPC1768)の制限から、圧力センサ2点、型表面温度センサ4点、型内部温度センサ4点の構成とし、図3に示すブロック構成とした。高い応答性が求められるセンサ（圧力、型表面温度）はアナログ信号での入力となることから、マイコンのA/Dコンバータの入力数（6ch）が上限となる。なお、加速度センサはデジタル信号で接続することが可能であるが、本システムでは搭載していない。

データのサンプリングレートは、データの詳細度とデータ量を考慮して500Hzとした。昨年度のシステムでは1kHzでサンプリングしていたが、測定する圧力・温度の変化スピードに対してオーバースペックのサンプリングであると見受けられた。昨年度の測定データを間引き、疑似的に500Hz, 250Hz, 125Hzのサンプリングデータを作

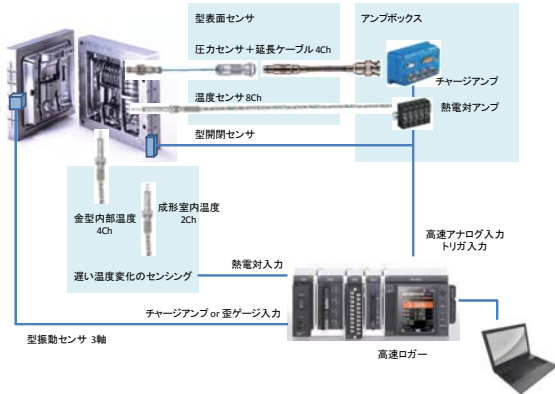


図2 汎用アンプ・ロガーを用いたシステム

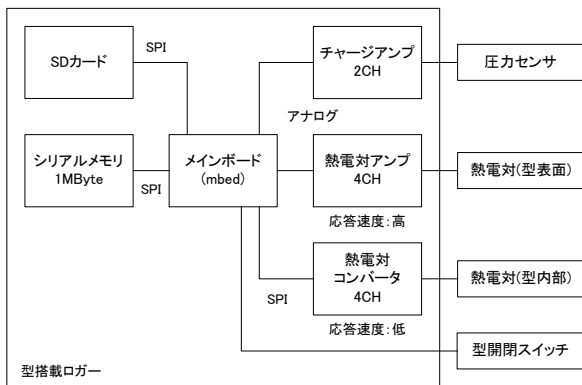


図3 金型搭載ロガーの構成

成し、変化の特徴が維持できているかを調べたところ、250Hz以上のサンプリングであれば1kHzサンプリングのデータと大差ないことを確認した。今回はチャンネル数が少ないことと、サンプリングの余裕をみて、500Hzサンプルとした。

### 2. 1 チャージアンプ（圧力センサアンプ）

型内圧力の測定に用いる圧力センサは、水晶の圧電効果を利用したものであり、今回用いたセンサ（KISTLER 6157BA）では圧力1(MPa)に対して $-94.0 \times 10^{-12}$ (C)の電荷が発生する<sup>[2]</sup>。つまり、圧力の変化に応じて電荷量に変化し、センサの外部と電流の入出力が発生する。この電流の入出力を積分することでその時点の圧力を知ることができ、一般に図4に示すチャージアンプと呼ばれる回路を用いる。回路の原理は一般的な積分アンプであるが、積分誤差(C1の残留電荷)をリセットするためのスイッチSWが設けてある。射出成形の1サイクルごとにリセットをかけることで、誤差の蓄積を防ぐことができる。

この回路を作成する場合、微小な電荷量を扱うことから、入力インピーダンスが高くオフセットの少ないOPアンプを選定することはもちろんであるが、OPアンプの－入力の絶縁に配慮する必要がある。基盤に部品をはんだ付けする通常の実装では、基盤を通して電荷のリークが起こるため、OPアンプの－入力、RおよびC1のセンサ側のリードを空中配線として絶縁を確保した。

さらに、今回の回路では残留電荷によるドリフトをリセットするスイッチを設けたため、ここでの電荷漏れ対策も必要となった。SWはマイコンからの制御でON/OFFできる半導体のアナログスイッチである。汎用的に用いられているアナログスイッチ(C-MOSファミリーの4066)では、一定の圧力でセンサを保持しても出力電圧は一定とならず、徐々に下がる傾向があった。これは、電荷が漏れていることを示している。しかしながら、アナログスイッチのデータシートには、スイッチの2極間(IN-COM間)の漏れ電流の記載はあるものの、GNDへの回り込み等を含む漏れの総量の記載はされていない。複数のアナログスイッチで試した結果、Analog Devices ADG751が条件を満たすことがわかった。一般的なアナログスイッチは単一のスイッチ構造であるのに対して、ADG751はT型のスイッチ構造であり、この内部構造の違いが電荷漏れに効果があったと考えられる。

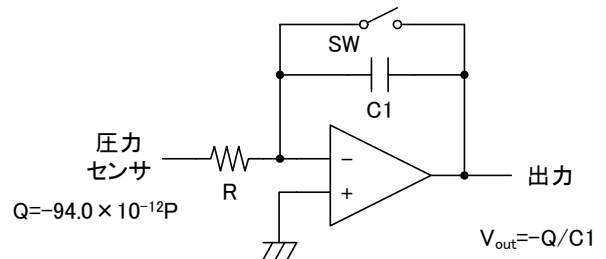


図4 チャージアンプの基本構成

## 2. 2 熱電対コンバータ・アンプ

型の表面および内部の温度測定には熱電対を用いている。熱電対は冷点と温点の温度差が電圧で出力されるセンサであり、電圧をA/D変換してマイコンに取り込む。熱電対の種類による特性の補正や冷点の温度測定機能を組み込み、デジタルデータとして温度を出力するコンバータICが市販されているが、変換速度が速いものでも100msであり、500Hzサンプリングの測定はできない。比較的变化が遅い型内部温度の測定にはコンバータIC(MAXIM MAX31855)を用い、型表面のセンサについては熱電対向けのアナログアンプ(Analog Devices AD8495)で増幅し、マイコンのA/Dコンバータでデジタルデータとして取得した。

熱電対は起電力が小さいため、その出力は入力インピーダンスの高いアンプで受けることとなり、ノイズの影響を受けやすくなる。後のデジタル処理でもノイズの処理は可能であるが、できるだけアナログ信号の段階でフィルタ処理を行うほうが望ましい。汎用測定器による測定では、樹脂注入ノズルに最も近いセンサの温度変化が最も急峻であり、その変化曲線を図5に示す。この変化が測定でき、かつ高周波ノイズをカットするフィルタをオシロスコープの測定帯域評価の方法<sup>[3]</sup>を参考に設計した。

参考資料では、

- ・20%→80%の立ち上がり時間=0.4/信号帯域
  - ・測定誤差が3%の周波数帯域=信号帯域×1.9
- の指標が示されており、20%→80%の変化時間が0.012秒の立ち上がりを測定誤差3%で測定するには63.3Hz以上の周波数帯域が必要であることがわかった。つまり、

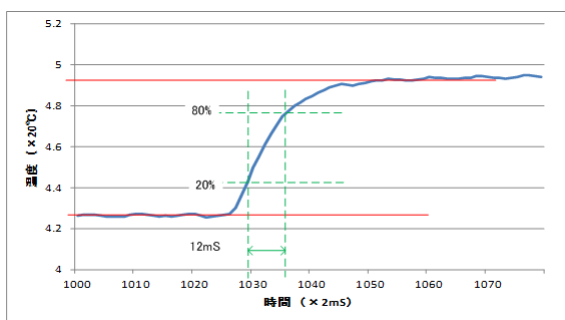


図5 型表面温度センサの立ち上がり波形

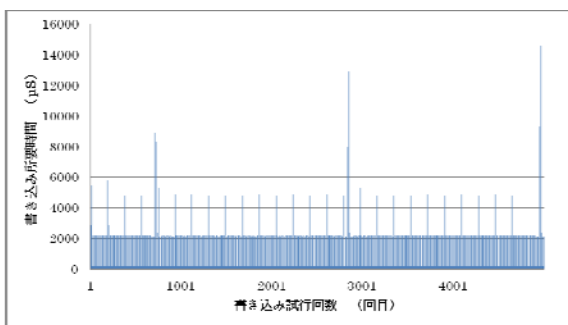


図6 SDカードへの書き込みにかかる時間

63.3Hz以上の信号はノイズとしてカットしても目的とする測定への影響は小さい。この結果を基に 入手性の良いE6系列の抵抗・コンデンサ値でフィルタを設計し、カットオフ周波数71.6Hzの2次のローパスフィルタを採用した。

## 2. 3 ロギングメモリ

センサから取得したデータはSDカードに記録することとしたが、SDカードを高速に読み書きするネイティブモードの技術仕様は公開されておらず、SDアソシエーションのメンバー以外は技術仕様が開示されているSPIモードの利用に限定される。

SPIモードでSDカードに16KByteサイズの連続書き込みを行い、書き込み試行ごとに要した時間を図6に示す。ほとんどの書き込みは0.2msで完了したものの、12回の書き込みごとに2.2msを要し、136回の書き込みごとに4.8msを要した。さらに10ms以上の時間を要する場合もあり、書き込み時間が一定でないことがわかった。このような現象はSDメモリを変えても発生し、CLASS10の高速モデルであっても不定期に10ms以上の時間を要する結果となった。さらに、書き込みのサイズを32Byteと小さくしても同様に10ms以上の時間を要することがあり、SDカードの内部処理が書き込み時間に影響していると考えられた。

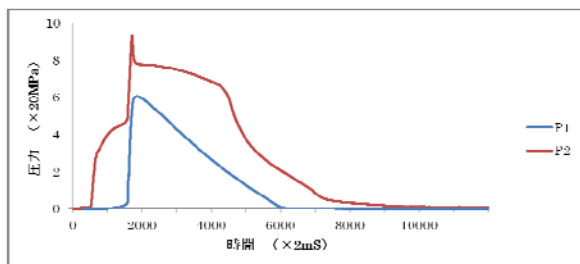
500Hzのサンプリングに合わせてデータをSDカードに書き込むには、遅くとも書き込みが1ms以下となる必要がある。ほとんどの書き込みが1ms以下で完了するとしても、サンプリング時間以上の書き込みが途中に入ることによってサンプリングの抜けが生じる。そのため、ロギングデータはマイコンのメモリ上に一旦保存し、ロギング完了後にSDカードへ書き出すこととした。しかし、採用したマイコンのRAMのサイズは64kByteであり、500Hz×30秒(成形にかかる時間)の測定データを保存することができない。そのため、SPI接続のSRAM(1Mbit×8個)をマイコンに接続し、一時記憶領域とした。

## 3. 試作データロガーによるデータ取得

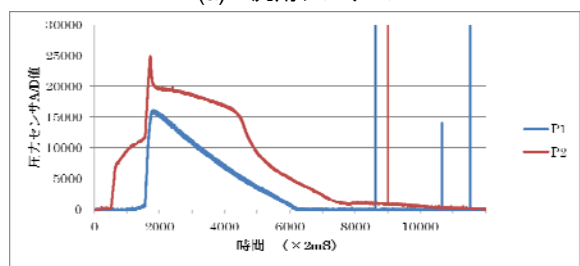
試作したデータロガーで得られるデータの妥当性を、汎用システムとの比較で評価した。同一の成形機パラメータにおいて、それぞれのシステムを用いて測定した型内の2点の圧力変化のグラフを図7に示す。試作ロガーにおいては、圧力値の校正ができなかったため、縦軸は無単位(A/Dコンバータの変換値)となっているが、システムの目的が値の測定ではなく、他のショットとの差異の発見であるため、無単位であっても異常検出等の目的は達成できる。図7(b)のグラフを見ると、試作ロガーでは測定期間の終盤にインパルス状のノイズが入っている。この例では測定の終盤に現れているが、圧力変化のある部分で発生することもある。これらのノイズはA/D変換で発生したと考えられるが、このような単発ノイズはデ

デジタル処理で除去することができるため、大きな問題とはならない。また、全体的に試作ロガーのグラフの線が太く見えるのもノイズの影響で測定値にふらつきがあるためである。このノイズはアナログ回路部分で発生していると考えられるが、測定レンジに対して小さな値であり、波形の概形が変わるほどのものではないため、差異判定への影響は小さいと考えられる。これらノイズに起因する測定値の劣化はあるものの、2つのシステムの測定グラフの比較から、試作ロガーの応答性、リニアリティは汎用ロガーと同等の性能であることが確認できた。

型表面温度センサについては、温度の立ち上がり状態の取得が重要であるため、立ち上がり部分に注目して比較を行った。型表面の4点を2つのシステムで測定した結

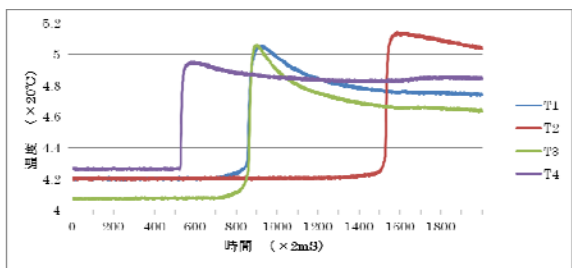


(a) 汎用システム

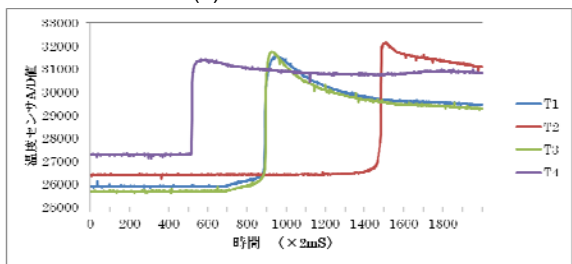


(b) 試作ロガー

図7 測定データ波形の比較（型内圧力）



(a) 汎用システム



(b) 試作ロガー

図8 測定データ波形の比較（型表面温度）

果を図8に示す。温度においても試作システムは校正ができなかったが、圧力と同様に縦軸が無単位であっても問題は無い。波形を比較すると、試作ロガーでは多少ノイズがある波形となっているが、立ち上がりの応答特性は汎用システムと同等となっており、樹脂到達のタイミング測定に使えることが確認できた。

測定の再現性はショット間での差異が比較的小さい圧力センサの測定値で検証した。図9は10ショット分の測定データを重ね書きしたグラフである。このグラフでは、測定データを3近傍メジアンフィルタで平滑化し、インパルス状のノイズを除去している。すべての測定グラフが重なって描画されていることから、試作システムにおいても測定の再現性は十分な性能があることを確認した。

#### 4. まとめ

プラスチック射出成形の製品製造現場で使用することを目的として、金型に搭載可能な小型のデータ収集装置を開発した。汎用システムの組み合わせで構築したデータ収集装置で取得したデータとの比較から、提案システムで得られるデータが成形状態の同一性を確認するための指標となり得ることが示唆された。

今後は、大量の成形データを収集し、データ解析によって不良品等の不具合を検出する手法について開発を進める。

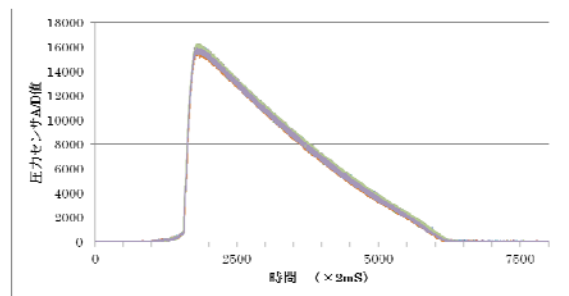


図9 圧力センサの波形（10ショット重ね書き）

#### 文献

- [1] 山田, 坂東, 平湯, 棚橋, 丹羽, 窪田, 多田, “生産性向上に資する射出成形スマート金型の開発”, 岐阜県情報技術研究所研究報告 第15号, pp. 21-29, 2014
- [2] “キスラー プラスチックブック”, 日本キスラー株式会社, 2012.
- [3] “オシロスコープの周波数応答とその立ち上がり時間精度への影響について”, Application Note 1420, Agilent Technology, 2003.