

スマート金型の応用展開に関する研究（第3報）

企業連携

西嶋隆*、山田俊郎*、松原早苗**、岩田英司†、奥田智裕†、林達彦†

Application development of smart mold system (III)

NISHIJIMA Takashi, YAMADA Toshio, MATSUBARA Sanae, IWATA Eiji, OKUDA tomohiro and HAYASHI Tatsuhiko

県内の金型によるものづくり産業の高品質化や効率化を支援するため、当センターでは県内企業と連携し、スマート金型（情報技術を活用した金型）の開発に取り組んでいる。本年度は金属プレスによる精密深絞り加工を対象とし、ワーク形状の機上検査を行うスマート金型の開発を行った。本報告では、昨年度より開発を進めているスマート金型の製作と評価実験について報告する。評価実験においては、昨年度報告したシングルボードコンピュータによるオンライン判定システムを用いて、マハラノビス距離の評価による適合品と不適合品の分類について試み、本スマート金型の有効性を確認した。

1. はじめに

県では平成28年度より県内製造業のものづくりスマート化プロジェクトを推進しており、本年度は、その最終年度となる。本研究はそのプロジェクトの一環として、金型産業を対象としたモノづくり現場における情報技術の導入を支援した。

本プロジェクトの前中期には、プラスチック製品の射出成形を対象に、金型内部の各種の状態を可視化するスマート金型の開発¹⁾に取り組み、後期には、金属プレスへの展開を図り、精密深絞り加工に関するスマート金型を企業と連携して開発した。

本報では、昨年度より開発してきた精密深絞り加工によるワークの品質（同軸度）を評価するスマート金型の開発²⁾について、金型本体の製作並びに評価実験について報告する。評価実験においては、昨年度報告したシングルボードコンピュータによるオンライン判定システムを用い、マハラノビス距離の評価による不適合品の判別について試みた。

2. スマート金型の製作

2.1 スマート金型に要求される機能

本研究の課題は、多段深絞り加工で成形されるワークの同軸度を生産ライン上で把握し、不適合品を精密に（ばらつきを少なく）分別することである。

現用の分別においては、ワークの同軸度をプレス周期に間に合う時間で精密測定（真円度測定機に匹敵する精度）することは困難であるため、プレス加工機上に設けた通止治具を用いて、全数検査を実施している。

通止検査では、生産ラインへの不良品混入を確実に避けるため、仕様より厳しい検査閾値を設け、通止治具に

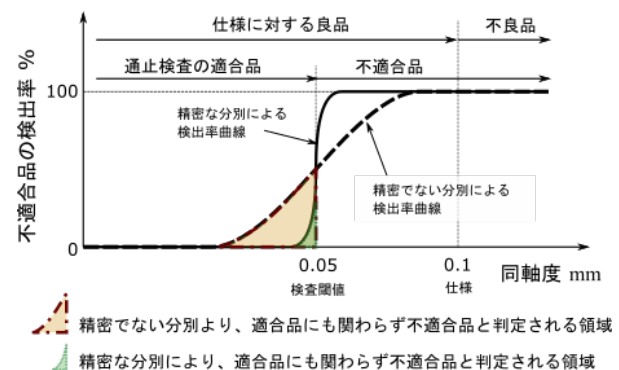


図1 不適合品の過検出抑制の概要図

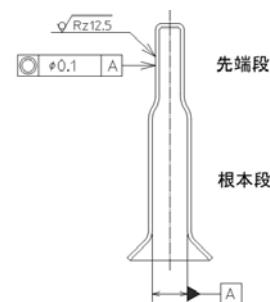


図2 ワークの測定図面

よる適合品・不適合品の分別を行う。しかしながら、不適合品の閾値の設定には、通止治具とワークの擦り合わせによる実験的な調整が必要であることや、通止治具の構造上の理由により、精密な分別が困難となっている。

図1に、精密な分別による不適合品の過検出抑制について図示する。図中の「精密でない分別による検出率曲線」（点線）で示すように、不適合品の検出にばらつきが大きい場合、適合品にも関わらず不適合品として検出される量が増え、過剰な廃棄が発生する。大量生産の場合は、特に問題となる。

不適合品を精密に分別可能となれば、不適合品の過検出の削減がされるとともに、不適合品の閾値も仕様に近

* 技術支援部

** 情報技術部

† 株式会社加藤製作所

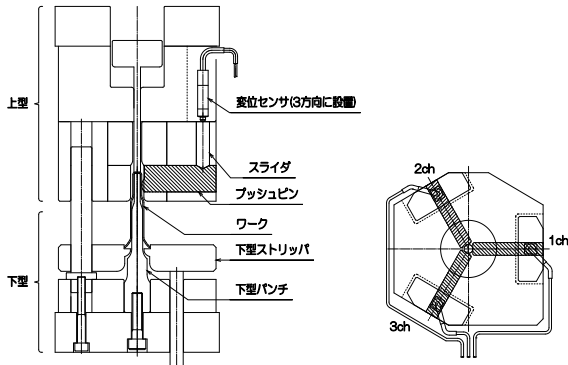
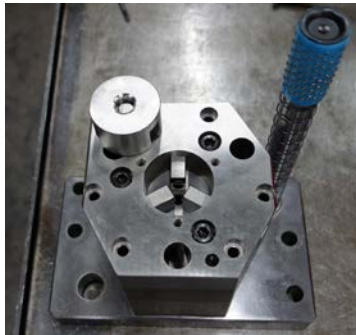


図3 スマート金型の概要図



(上型のプッシュピンを撮影)

図4 スマート金型の内部写真

づけることができ、生産性の向上が期待できる。

検査対象のワークは、ブランク材の平板が多工程の深絞り加工を経て、最終形状として段付きの中空シャフトとなる。図2にワークの同軸度の測定図面を示す。同図に示すように、根本段の内径軸に対する先端段の外径軸の同軸度を測定する。同軸度の仕様は 0.1mm であり、検査閾値（適合／不適合の閾値）は仕様を満たす 0.05mm に設定している。

本スマート金型は、ワーク全数に対しリアルタイム（プレスショットサイクル）で分別をすることとし、深絞り成形後のワークを機上検査する。

2.2 スマート金型の設計

昨年度までに試作してきたスマート金型では、絞り工程でワークの成形と同時に特徴量データを取得することを試みたが、ワークの同軸度の良否に関連する良好な特徴量を得ることが困難であった。そのため、本年度は成形と測定を同時に行うのではなく、トランスファープレスの最終工程にワーク測定用の工程を設ける方式とした。

図3に、開発したスマート金型の概要図を示す。ワークの測定は次のように行う。まず、前工程から移されたワークは、下型パンチに載せられ、ワークの根本段の内径にフィットして固定される。次に、上型がストロークすることにより、上型に設けた3本のプッシュピンがワーク先端段の外周3点に接触する。プッシュピンの変位は、スライダを介して差動トランス式変位センサ

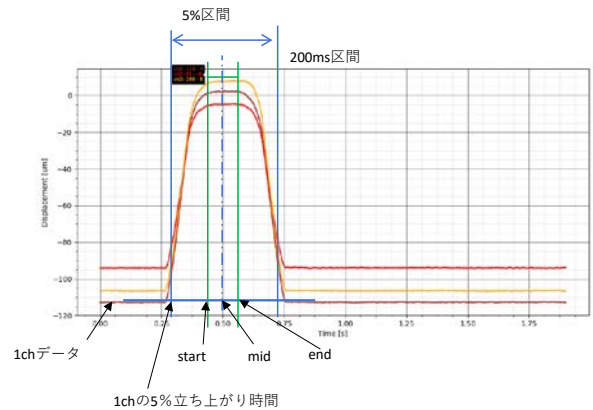


図5 時系列データ

（GT2:キーエンス）で検出する。変位センサから得られた3本のプッシュピンの先端位置から、ワーク中心位置を計算する。

なお、以上の測定方法では、下型に対する上型の位置関係が把握できないため、ワーク測定前には、既知の寸法で十分な精度の同軸度を有する基準ワークをスマート金型にセットし、変位センサをリセットする。これにより、以降のワーク先端段の中心位置の測定は、ワーク根本段内径を原点として計測することができる。図4に製作したスマート金型の上型の内部写真を示す。

変位センサの出力は、シングルボードコンピュータで構成したスマート金型のデータ収集部²⁾に入力され、プレス加工機のプレス動作に同期してサンプリングされる。サンプリング速度は毎秒 1k とした。また、データ収集部では、変位センサの時系列波形やストローク中のワーク中心位置の軌跡を表示、時系列データの保存、後述する特徴量データの計算などを行う。

3. スマート金型のデータ取得実験

3.1 時系列データの取得と特徴量の定義

図5に、スマート金型のデータ収集部で得られた変位センサの時系列データ（一例）を示す。同図に示すように、3つの変位センサの波形は、プッシュピンがワークに接触する際に立ち上がり、離れる際に立ち下がる。立ち上がった波形の中央は、およそプレス下死点となる。

データ収集部では、波形の最大値の5%時点の立ち上りと立ち下りの中央をプレス下死点とし、中央の前後100ms間（前を start、中央（下死点）を mid、後を end とする）におけるワーク中心位置を計算することとした。

図6に、start から end までのワーク中心位置を表示した、データ収集部の出力画面（一例）を示す。計測の開始と終了がわかるように、start から end に向かって青色から赤色へのグラデーションで表示する。なお、同図はワーク根本段の内径を原点とした、ワーク先端段の外形中心位置（ワーク中心位置）の軌跡を示している。

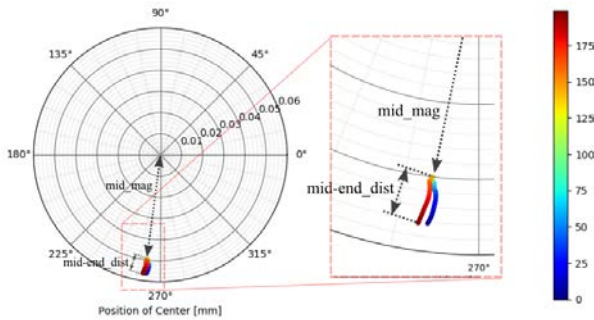


図6 スマート金型データ収集システムの出力画面

表1 定義した特徴量

start_mag	: start 時のワーク中心位置	mm
mid_mag	: mid 時のワーク中心位置	mm
end_mag	: end 時のワーク中心位置	mm
start-mid_dist	: start-mid 間のワーク中心位置の変化量	mm
mid-end_dist	: mid-end 間のワーク中心位置の変化量	mm
end-start_dist	: end-start 間のワーク中心位置の変化量	mm

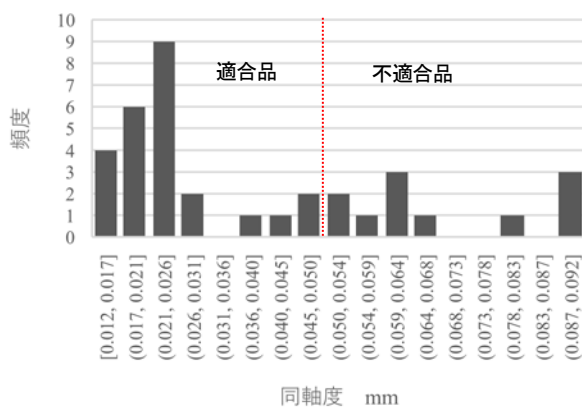


図7 ワークの同軸度の分布 (N=36)

本実験では、同軸度の良否を判定するための特徴量として start 時、mid 時、end 時のワーク中心位置（原点からの距離）ならびに、start-mid 間、mid-end 間、end-start 間のワーク中心位置の変化量を採用した。

start、mid、end 時のワーク中心位置は、ワーク根本段の内径中心とワーク先端段の外径中心のズレを示しているため、同軸度と対応し、start-mid_dist と mid-end_dist は、ワーク先端段の真直度に対応し、end-start_dist はワーク測定中にワークの動きが無い場合はゼロになると考えられるため、ワーク保持のガタつき具合の指標になると考えられる。

表1に特徴量の名称とその内容を示す。なお、図6には説明のため、定義した特徴量の mid_mag、mid-end_dist について図示する。

3. 2 同軸度測定

真円度測定機（RONDCOM NEX RS 300）を用いて同軸度の精密測定を行い、スマート金型にて得られた各

表2 特徴量と同軸度の相関係数

start_mag	0.984
mid_mag	0.986
end_mag	0.986
start-mid_dist	0.605
mid-end_dist	0.876
end-start_dist	-0.795

表3 特徴量の主成分分析結果

主成分	寄与率	累積寄与率
PC1	0.656	0.656
PC2	0.186	0.842
PC3	0.108	0.950
PC4	0.049	0.999

特徴量との相関を調べた。なお、本実験においては、不適合品を用意するため、特別な絞り金型を製作してワークを成形した（実生産で用いる金型で成形した場合、不適合品の発生が非常に少ないため）。本実験では、適合品と不適合品を合わせて36個準備した。

図7に同軸度の分布、表2に同軸度と各特徴量の相関係数をそれぞれ示す。

同軸度は0.012mmから0.092mmの範囲に分布し、特徴量の start_mag、mid_mag、end_mag は同軸度と強い相関がある。

4. スマート金型のデータ解析部による不適合品判別

4. 1 適合品の特徴量の主成分分析

今回のスマート金型では、特徴量と同軸度の相関が高いデータが得られたため、同軸度の良否判定は特徴量の閾値を設定するのみで可能であると考えられるが、以下では、必ずしも高い相関が得られない場合を想定して昨年度に開発したスマート金型のデータ解析部²⁾を用い、適合品の特徴量の主成分分析を行い、主成分を変数としたマハラノビス距離の評価による良否判定を行った。

同軸度0.05mm以下の適合品の特徴量を主成分分析し、得られた累積寄与率を表3に示す。この結果から、第2主成分までで84%以上の情報が得られた。

4. 2 マハラノビス距離と同軸度の関係

3. 2節にて同軸度測定を行った各ワークの同軸度とマハラノビス距離（2乗値）の関係を調べた。なお、ここでは第2主成分まで、第3主成分まで、第4主成分までの変数を用いた3種類の場合について計算し比較した。

全ワークのうち25個は適合品（マハラノビス空間を定義するワーク）であり、残りの11個は同軸度が不適合品（同軸度0.05mmを超えるもの）である。結果を図8に示す。

この結果より、不適合品の同軸度が悪い程、マハラノビス距離も増加し、閾値付近においては、正確な分別は困難であるが、同軸度の悪い不適合品は容易に分別がで

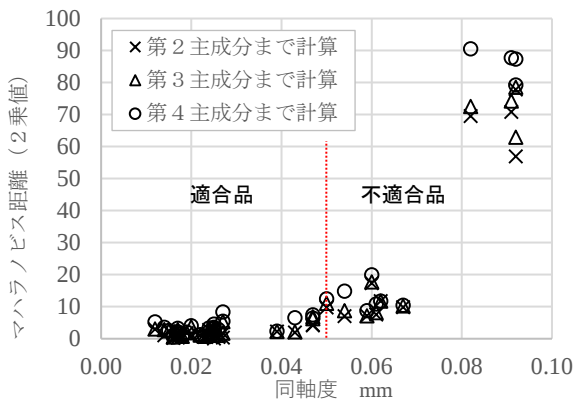


図8 同軸度とマハラノビス距離の関係 (N=36)

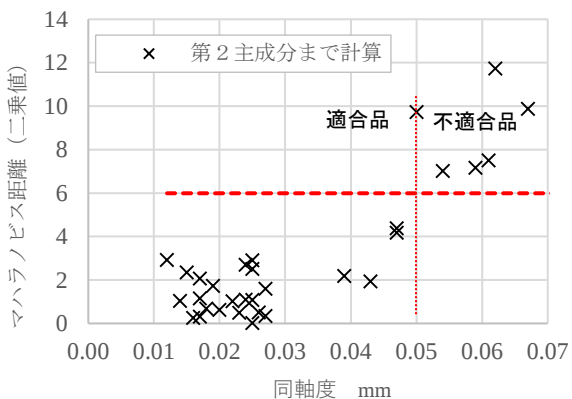


図9 マハラノビス距離の閾値による分別

きると考えられる。また、今回のデータにおいては、第2主成分までの情報で分別は可能と考えられる。

4. 3 不適合品の分別

サンプルの不適合判定は、マハラノビス距離の閾値を設定することで行った。

4. 1節の主成分分析した結果から、第2主成分までの2変数のみを用いて分別を試みた。マハラノビス距離の分布は変数の数を自由度とするカイ2乗分布に従うため、ここでは不適合品の閾値として、カイ2乗分布の累積分布関数が95%となるカイ2乗値とした。この場合、閾値は約5.991となる。

分別の結果を確かめるため、図9にマハラノビス距離と同軸度の関係を示す。同図は図8と同じ(第2主成分まで計算したもの)であるが、閾値を示すライン(点線)を表示し、横軸(同軸度)は0.07mmまでを拡大表示したものである。

本結果から、同軸度が0.05mmのサンプルは、閾値を超えた不適合品として分別されているが、その他のワークにおいては、正しく分別できることが確認できる。

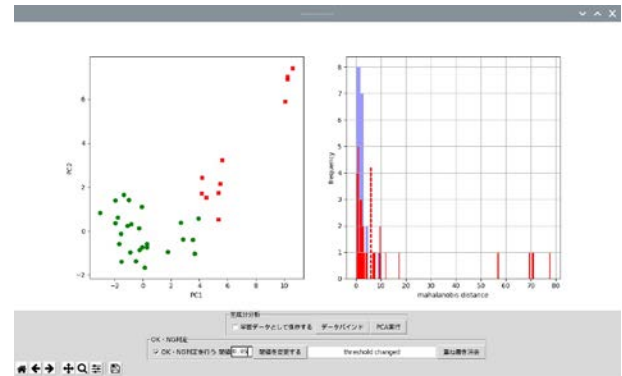


図10 データ解析部の実行画面

なお、今回の分別では、適合品の第2主成分までのデータから計算したマハラノビス空間を用い、不適合品とするマハラノビス距離の閾値は、カイ2乗分布の累積分布関数が95%となる値としたが、実際の生産現場では、これらの値は不適合品の過検出の発生頻度によって調整が必要があると考えられる。

4. 4 スマート金型のデータ解析部による実行例

スマート金型のデータ解析部を用いて、不適合品の判別を行った実行画面を図10に示す。左側に主成分分析を行った結果について第2主成分まで表示し、適合品として判定されたものは緑色○、不適合品として判定されたものは赤色×で表示される。右側はマハラノビス距離のヒストグラムを表示している。

5. まとめと今後の展望

県内プレス加工企業と連携し、深絞り成形品の同軸度の適合/不適合を分別するスマート金型を開発し、以下の結果を得た。

1. トランスファープレス上でワークの同軸度の良否を分別するスマート金型を製作した。
2. スマート金型データの特徴量を選定し、特徴量の主成分を変数としたマハラノビス距離による、適合/不適合品の分別を試みた。
3. 提案した分別方法では、36個のワークに対し、不適合品の過検出が1個で分別することができた。

今回の検証実験に用いたサンプル数は、少数に限られていたため、今後はロット生産時の大量データを用いた検証を実施し、運用方法について検討したい。

【参考文献】

- 1) 山田ら,岐阜県産業技術総合センター研究報告 No.1, pp87-90,2020
- 2) 西嶋ら,岐阜県産業技術総合センター研究報告 No2, pp110-111,2021