

パンチング加工における反り抑制技術の開発

鶴谷 知洋, 三戸 正道, 鈴木 逸人, 櫻庭 洋平, 佐々木克彦*, 本田 真也*,
武田 量*, 東野 颯真*, 海老原達郎**, 石川 和彦**

Development of Warp Restraining Technology in Punching Process

Tomohiro TSURUYA, Masamichi MITO, Hayato SUZUKI, Yohei SAKURABA,
Katsuhiko SASAKI*, Shinya HONDA*, Ryo TAKEDA*, Soma HIGASHINO*,
Tatsuro EBIHARA**, Kazuhiko ISHIKAWA**

抄 録

汎用金型を用いて様々な形・サイズの穴あけを行うパンチングプレスでは、加工品に反りが発生しやすいことが課題となっており、反りが発生した場合には、要求品質を満たせないことに加え、パンチングプレスと加工品の衝突による加工停止や、後工程での反り修正によるコスト増加などの影響が出ている。

本研究では、反りの少ない加工条件で加工を開始し、加工中は実際の反りに応じて加工条件を変更することで反りを抑制することを目指し、金型のIoT化と取得データによる加工中の反りの推定手法、複数穴加工に対応したシミュレーション技術とこれを用いた加工条件導出技術、加工中の反りに応じた加工条件補正技術を開発し、これらの機能を搭載した加工システムにより有効性を検証した。

キーワード：穴あけ, パンチングプレス, 反り, シミュレーション, IoT

Abstract

Punch presses, which use general-purpose dies to make holes of various shapes and sizes, are prone to warping in the processed product, which makes it impossible to meet the required quality. In addition, issues include the need to stop processing due to collisions between the punching press and the processed product, and increased costs due to warping correction in post-processing.

In this study, the goal is to start processing under conditions that cause minimal warping, and then suppress warping by changing the processing conditions during processing according to the actual warping. To achieve this, a method was developed to estimate warping during processing using IoT-based dies and acquired data, a simulation technology compatible with multiple hole processing and a processing condition deriving technology using this, and a processing condition correction technology according to warping during processing. The effectiveness of the method was verified using a processing system equipped with these functions.

KEY-WORDS : Punching, Punch Press, Warping, Simulation, IoT

* 北海道大学, * Hokkaido University

** 株式会社道央メタル, ** Douou Metal Co.,Ltd

事業名：重点研究

課題名：IoT金型と加工状態推定・補正技術による高品質板金加工システムの開発

1. はじめに

プレス加工は金型を用いる加工であることから、他の加工法と比較して加工速度が大きく、均一な製品を大量に生産できる¹⁾。また、加工コストが安く、材料歩留まりも高いため、自動車を中心に電気製品、住宅関連製品、日用品などの分野において量産加工技術として広く普及している。特にせん断加工は、プレス加工の他の加工法と異なり、材料を分離する加工法であることから使用頻度が高く、打抜きや穴あけなど板金部品の製作や他のプレス加工部品の半加工品の製造などに適用されている²⁾。このため、パンチングプレス（図1）は汎用金型（図2）を用いて様々な形・サイズの穴あけを行うが、多数の穴をあける加工品（パンチングメタル）には反りが発生しやすいことが課題となっており³⁻⁵⁾、反りが発生した場合には、要求品質を満たせないことに加え、パンチングプレスと加工品の衝突による加工停止や、後工程での反り修正によるコスト増加などの影響が出ている。なお、穴あけにおける品質向上について、逆押さえ力の最適化による反り低減⁶⁾、センシングによる金型摩耗の監視⁷⁾などの研究が行われているが、パンチングプレスを対象とした反りの抑制についての報告は見当たらない。

本研究では、パンチングプレス加工時に発生するパンチングメタルの反り抑制を目的として、加工前にシミュレーション技術の活用により反りの少ない加工条件を導出し、加工中は監視により反りの設定値を超えた場合に加工条件を変更し反りを抑制する加工技術の開発を試みた。具体的には、①加工中の反りを把握するためIoT化した金型からデータを取得し反りを推定する手法、②単一穴が対象の従来のシミュレーション技術と異なる加工条件の導出が可能な複数穴に対応したシミュレーション技術とこれを用いた加工条件導出技術、③推定した反りに応じた加工中の加工条件補正技術を開発し、これらの機能を搭載した反り抑制加工システムの実証試験により有効性を確認した。



図1 パンチングプレス



図2 汎用金型

2. 金型のIoT化と反りの推定

2.1 加工システムの構築

パンチングプレスは、材料を平面移動させ金型を上下動させることで穴あけを行う。加工技術の開発にあたり、はじめにパンチングプレスと同等の穴あけ機構をもつ加工システムを構築した（図3）。金型を上下動させる加工部は、サーボプレス機（NC1-800（D）・アイダエンジニアリング(株)製）を用いた。サーボプレスの加圧能力は800kN、連続ストローク数は最大65spmである。材料を平面移動させる搬送部は、スカラロボット（RH-12FH7035M-D・三菱電機(株)製）を用いた。スカラロボットの可搬重量は12kg、サイクルタイムは0.3secである。サーボプレス機とスカラロボットは、電気制御盤にてプログラマブルコントローラを用いて同期させた。

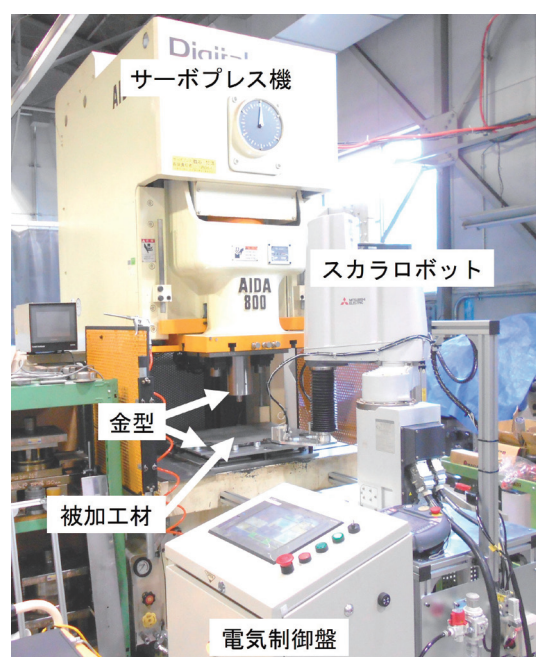


図3 構築した加工システム

2.2 センサの選定と設置

反りの発生により加工品の表面が湾曲することで、加工荷重の変化やAE信号（Acoustic Emission：物体の変形・破壊により振動が発生する現象）の変化、材料表面高さの変化が起こると考えられる。そこで、反りを把握するために使用するセンサとして加工荷重計、AEセンサ、レーザ変位計を選定した。加工荷重計はサーボプレス内蔵のセンサを使用し、AEセンサは加工品が接する下型にマグネットホルダで固定し、レーザ変位計は加工品の上面の高さを測定するため上型と下型の間に設置した（図4）。センサはデータロガーを介して制御PCと接続し、電気制御盤についても制御PCと接続することで、制御PCを介したネットワークを構成し金型をIoT化した。

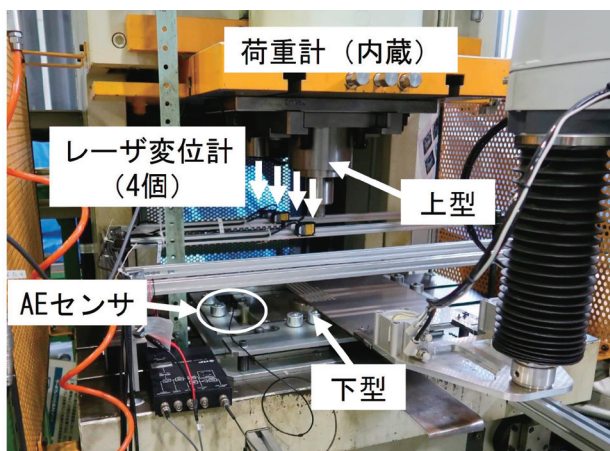


図4 加工システムに配置したセンサ

2.3 加工実験と取得データの解析

センサの取得データから反りを推定するため、加工実験を行い、取得データと反りの関係について解析した。加工品を図5に示す。被加工材の材質はSUS304ステンレス鋼（板厚2.0mm）、穴径は $\phi 6.0\text{mm}$ 、穴ピッチは10.0mmとし、720個（24穴 $\times$ 30穴）の穴あけを行った。加工の模式図を図6に示す。加工は、金型の上型と下型で被加工材を挟むことにより行う。このとき、パンチは被加工材を貫通するが、押さえはパンチ周囲の被加工材を押し付ける。加工荷重計で荷重値、AEセンサで単位時間当たりのAE発生数、レーザ変位計で加工品表面の直線状4点の高さを取得した。反りは、所定の加工穴数ごとに加工システムから加工品を取り外し、図7に示すマルチセンサ測定機（ZEISS O-INSPECT 8/6/3・カールツァイス（株）製）により測定した。加工品の表面208点の3次元座標を測定し、4隅にフィットする平面と最遠点の距離を加工品の実測の反りとした（以後、実測の反りと呼ぶ）。加工条件として、押さえ角度、押さえ径、ダイ角度、クリアランスを変えた実験を行った。これらの金型に関する設定値の模式図を図8に示す。

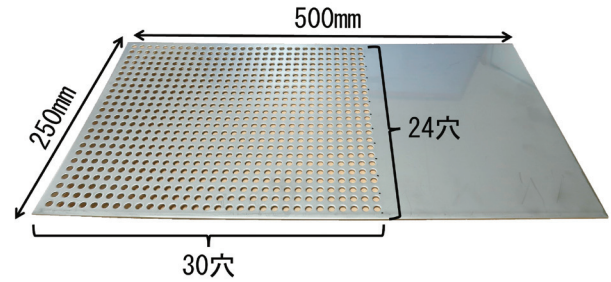


図5 加工品

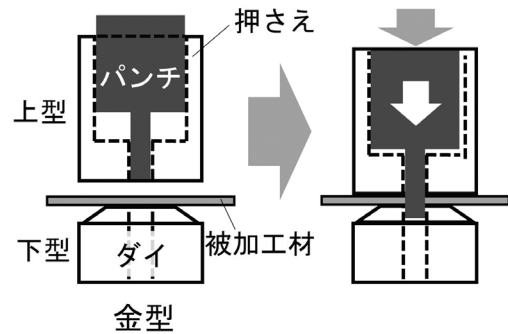


図6 加工模式図

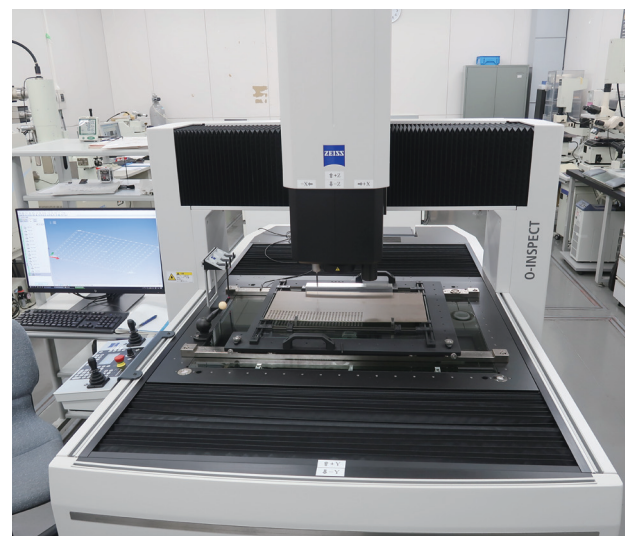


図7 マルチセンサ測定機

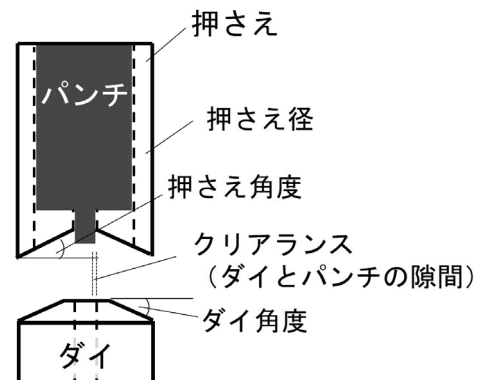


図8 金型設定値の模式図

取得データの一例を図9～図11に示す。それぞれ1shot(穴一つの加工)のデータである。荷重については、被加工材の破断(分離)時のピークが見られる。AE発生数については、被加工材が塑性変形し破断に至る範囲で値が大きくなっている。加工品表面高さについては、全範囲に加工に伴う被加工材の振動が見られ、かつ被加工材が上型に押されたことに起因する大きな上下動が確認できる。測定した反りのデータを図12に示す。標準の加工条件(押さえ角度 0° 、押さえ径 $\phi 26.0\text{mm}$ 、ダイ角度 0° 、クリアランス 0.5mm (直径))と、各条件のうち押さえ角度を 1.0° 、ダイ角度を 1.0° 、クリアランスを 0.6mm (直径)、押さえ径を $\phi 48\text{mm}$ に変更した5条件の実験を行った。反りがマイナスの場合は下に凸であること、プラスの場合は上に凸であることを表す。加工穴数の増加に伴い反りが大きくなり、標準加工条件では反りが -5.4mm であった。また、ダイと押さえに角度をつけた場合に反りが小さくなる傾向が見られた。

次に、取得データと反りの関係について解析した結果を図13～図15に示す。荷重は1shot中の最大荷重、AE発生数は1shot中の総和、表面高さはデータ取得開始から 0.1s の平均値をそれぞれ特徴量とした。そして、加工条件ごとに加工開始から加工終了まで所定の加工穴数ごとに測定した224個の反りの値とその時の取得データの特徴量の相関係数を算出した。最大荷重と反りについては相関係数 -0.084 、AE発生数の和と反りについては -0.301 、表面高さと反りについては 0.958 となり、最大荷重およびAE発生数の和と反りはほぼ無関係であるが、表面高さのデータと反りの間にかなり強い正の相関があることがわかった。

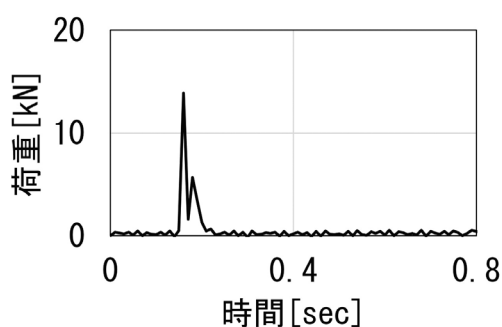


図9 取得データの一例(荷重計)

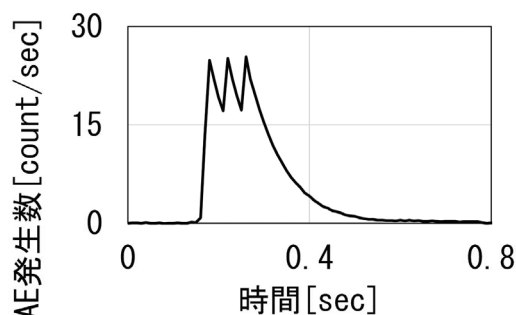


図10 取得データの一例(AEセンサ)

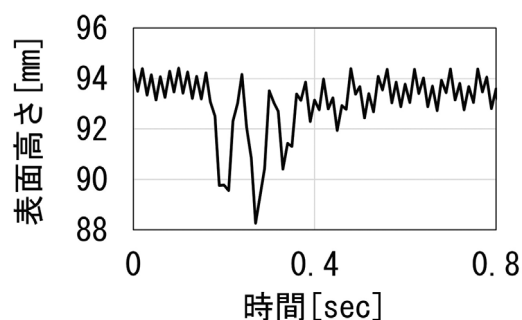


図11 取得データの一例(レーザ変位計)

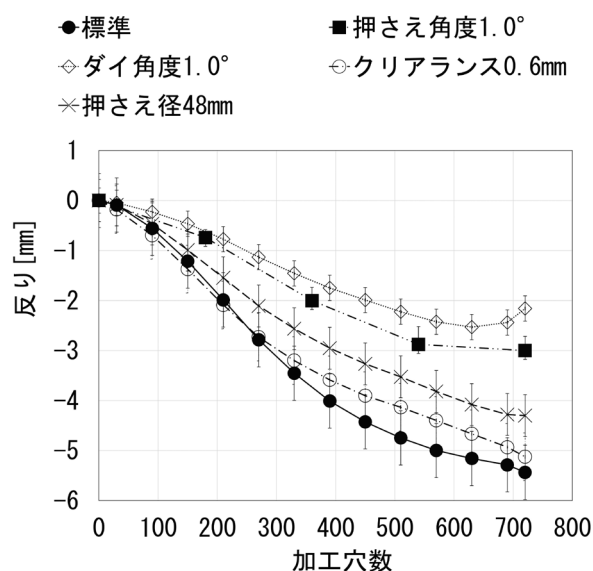


図12 反りの測定データ

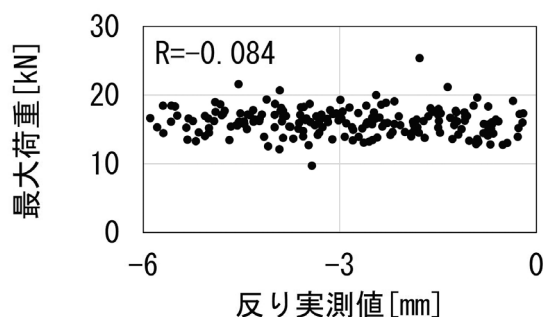


図13 取得データと反りの相関(荷重)

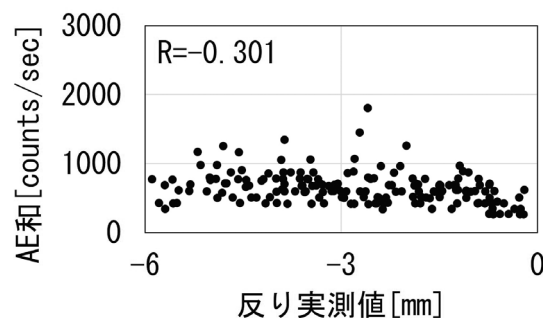


図14 取得データと反りの相関(AE発生数)

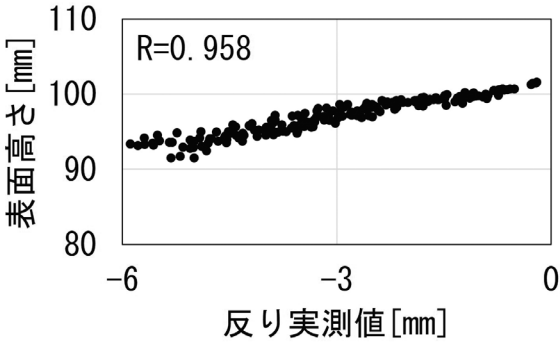


図15 取得データと反りの相関（材料表面高さ）

2.4 反り推定手法の開発

表面高さと反りの間にかなり強い正の相関があること、加工穴数の増加にともない反りも大きくなることから、反りを目的変数、高さデータと加工穴数を説明変数とする重回帰分析を行い、得られた係数を使用して反りを算出した。標準加工条件での反りの推定例を図16に示す。推定値と実測値を比較した結果、誤差の平均は0.4mm/m（11.9%）となった。反りの推定値と実測値を比較した結果を図17に示す。決定係数は0.955となり、推定手法の有効性が確認できた。

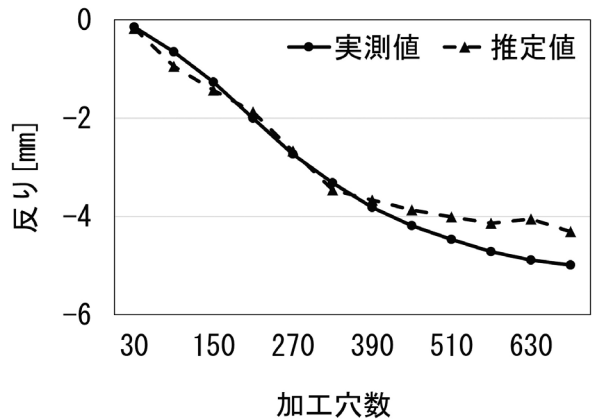


図16 反り推定例

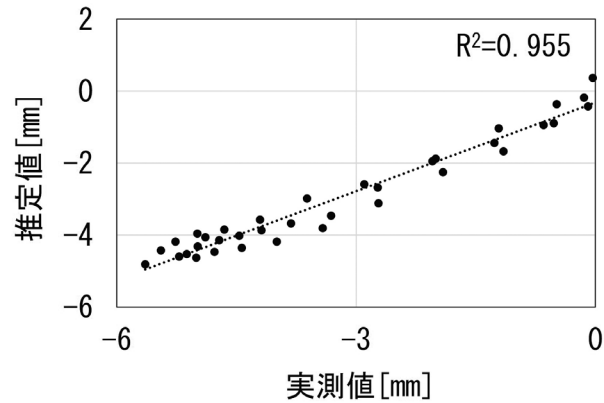


図17 反り推定結果

3. シミュレーション活用による加工条件導出

3.1 反り制御因子の確認

反りの制御因子を明らかにするため、2.3節の加工条件に加えて加工穴順を変えた実験を行い、加工品の反りを測定した。加工条件を表1に、加工穴順を図18に示す。反りは2.3節と同様にマルチセンサ測定機で測定した。標準の加工条件は、押さえ角度0°、押さえ径φ26.0mm、ダイ角度0°、クリアランス0.5mm（直径）、加工穴順：長手方向とした。反りの測定結果を図19に示す。反りがマイナスの場合は下に凸であること、プラスの場合は上に凸であることを表す。標準の加工条件から変更した条件のみを記している。各種の加工実験の結果、標準の加工条件の反りの発生方向がマイナスであるのに対し、押さえとダイの両方に角度をつけた場合の反りの発生方向がプラスになっていることから、押さえとダイの角度により反りを制御できる可能性が高いことが示された。

表1 加工条件

押さえ径	26mm, 48mm
押さえ角度	0° , 0.5° , 1.0°
クリアランス	0.5mm, 0.6mm
ダイ角度	0° , 0.5° , 1.0°

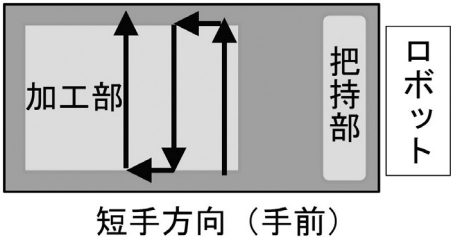
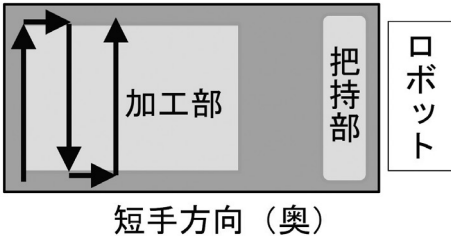
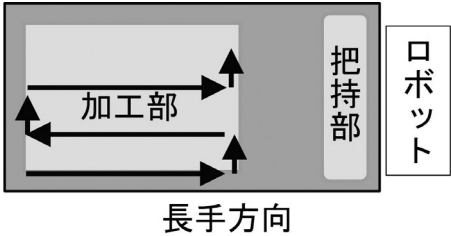


図18 加工穴順

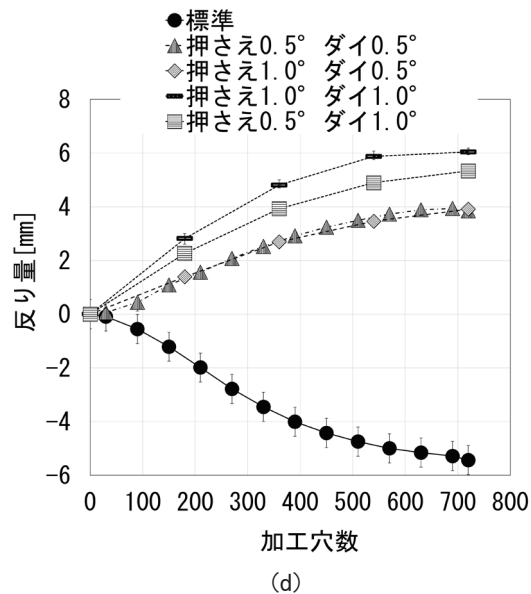
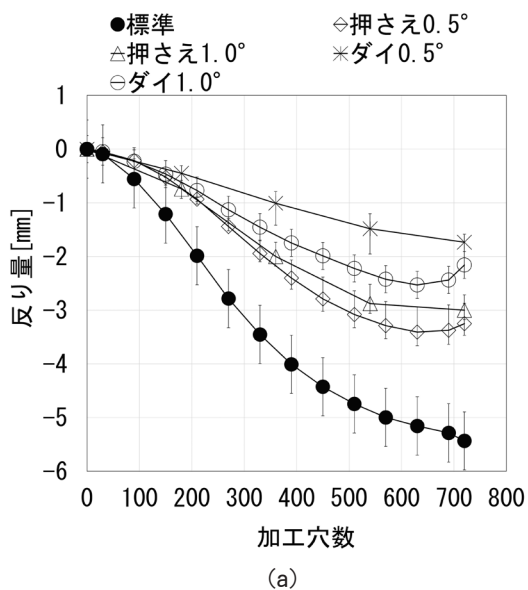


図19 反り測定結果 (続き)

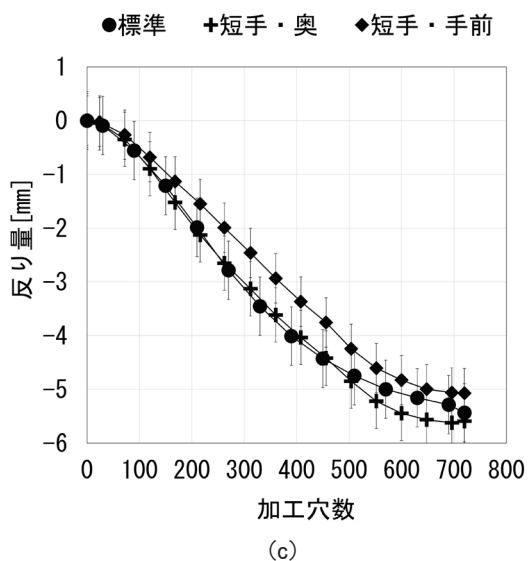
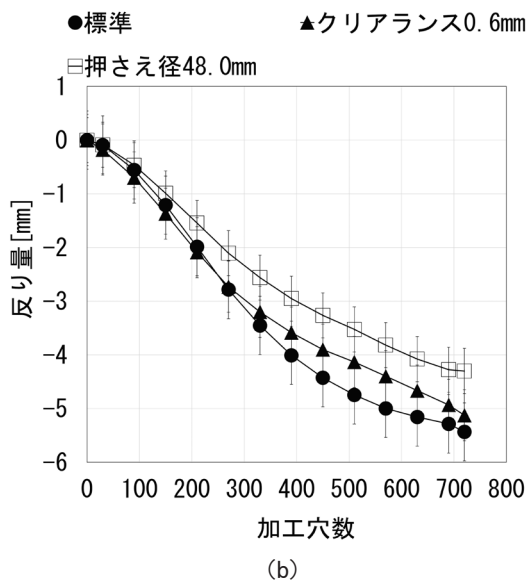


図19 反り測定結果

3.2 シミュレーション技術の開発

従来のシミュレーション技術⁸⁾は単一穴が対象であるため、反りの少ない加工条件の導出が可能な複数穴に対応したシミュレーション技術を検討した。3.1節の結果から、導出する加工条件は押さえ角度およびダイ角度の組み合わせとした。シミュレーションは非線形解析ソフトウェアであるAnsys LS-DYNAを用いた。モデルは弾性と塑性の性質を合わせ持ち応力とひずみの関係を直線で近似した弾塑性体、塑性変形中の力と変形の関係である加工硬化則は速度依存性があるCowper-Symondsモデルとし、相当塑性ひずみの値56%を破壊基準として要素を削除することで穴あけ加工時の材料分離を表現した。また、実際の金型に合わせてパンチ径6.0mm、押さえ内径6.6mm、ダイ径6.5mmに設定し、被加工材はSUS304板厚2.0mmとした。押さえ角度とダイ角度を変えた場合のZ変位(被加工材表面の鉛直方向)のシミュレーション結果例を図20に示す。単一穴でのシミュレーションにおいても加工により被加工材が変形していることが確認できた。解析時間は4.5時間であった。次に、複数穴として1列×6穴および2列×3穴でのシミュレーションを行った。シミュレーション結果を図21に示す。1列および2列ともに単一穴と同様に被加工材が変形していることが確認できた。穴数が増え被加工材も長くなったことから変形も大きくなった。しかし、穴数が増えることで解析時間は1列×6穴で105時間、2列×3穴で65時間となり、条件を変えて複数のシミュレーションを行うには膨大な時間がかかることから加工条件の導出に使用することは困難といえる。そこで、単一穴のZ変位のシミュレーション結果を用いた反りの計算手法を検討した。計算手順は、始めにXZ平面上の穴近傍断面(図20に示す線の位置の断面)を平行移動して一端を原点に一致させ、次に回転移動によりもう一方の一端をX軸上に移動さ

せ、最後にX軸と穴近傍断面との距離を反りとして計算する(図22)。シミュレーション結果を用いた反りの計算値と、2.3節で示した方法による加工品全体の実測の反りを図23に示す。反りの値の比較ではなく、上に凸となる加工条件と下に凸となる加工条件の境界を比較した。シミュレーションにより計算した反りと実測の反りは、反りの発生方向の境界が一致していることから、反りが小さくなる加工条件の導出が可能である。

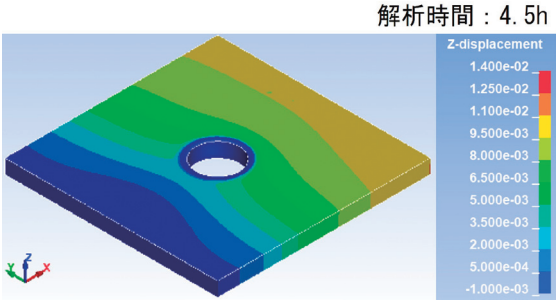
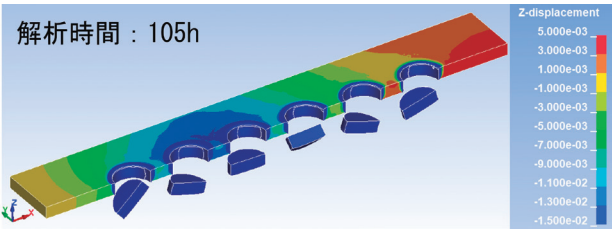
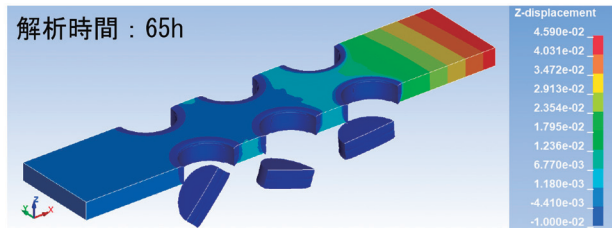


図20 単一穴シミュレーション結果例



(a) 1 列×6 穴



(b) 2 列×3 穴

図21 複数穴シミュレーション結果例

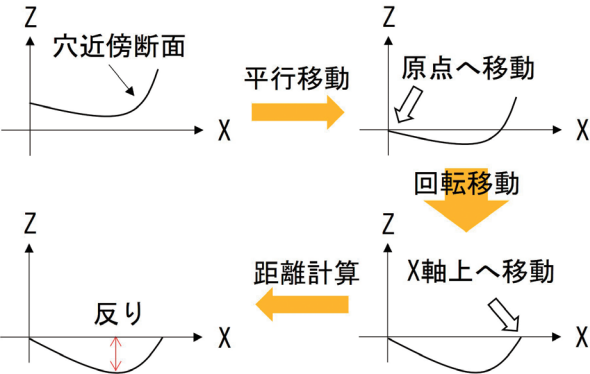


図22 反りの計算方法

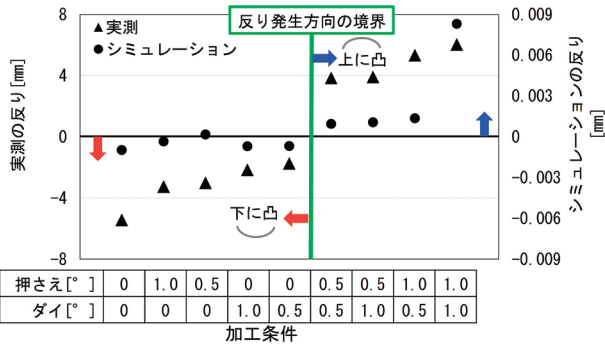


図23 反りの計算値と実測値の比較

3.3 初期加工条件導出技術と加工条件補正技術の開発

3.2節で示したとおり、実測の反りとシミュレーションにより計算した反りを比較した結果、反り発生方向の境界は一致している。そこで、反りが最小となる初期加工条件は、シミュレーションにより加工条件ごとの反りを計算して反り発生方向の境界を求め、境界近傍の加工条件とした。なお、加工条件である押さえ角度およびダイ角度は0.5°ずつ変化させた。

導出した初期加工条件による加工開始後、発生する反りに応じた加工条件の変更にあたり、加工中の反りの実測が困難なため、IoT金型から得た高さデータによる反りの推定値を用いた。推定値が設定値を超える場合、その差に応じて反りを抑制する加工条件に変更する。加工条件の決定は、あらかじめシミュレーションを行い加工条件と反りの関係から作成した補正加工条件表(表2)にもとづいて行った。反りの推定値から補正すべき反りの方向(上に凸あるいは下に凸)とその強弱を決定し、補正加工条件表から現在の加工条件に対して必要なレベルの加工条件を補正加工条件として選択する。

表2 補正加工条件表

レベル	加工条件
上に凸 (強)	押さえ 1.0° ダイ 1.0°
上に凸 (弱)	押さえ 1.0° ダイ 0.5°
0	押さえ 0.5° ダイ 0.5°
下に凸 (弱)	押さえ 0° ダイ 1.0°
下に凸 (強)	押さえ 0° ダイ 0°

4. 反り抑制加工システムの有効性検証

4.1 反り抑制加工システムの構築と有効性検証実験

IoT金型からのデータを用いた反りの推定手法、シミュレーション技術を用いた加工条件導出技術と加工条件補正技術を搭載した反り抑制加工システムを構築し実証試験を行った。構築したシステムの概要を図24に示す。加工前にシミュ

レーションを活用し反りを最小化する初期加工条件とともに、補正加工条件表を導出した（表2）。加工中は、導出した初期加工条件で加工開始後、IoT金型からのデータにもとづいて反りの推定を行い、推定値が設定値を超える場合は補正加工条件表にもとづいて加工条件を選択した。設定値を超えない場合は加工条件を変更しなかった。一般的な加工条件で加工した場合の反りが10.8mm/mであったのに対し、開発した機能を用いた場合は1.7mm/mとなり、開発技術の有効性が確認できた（図25）。

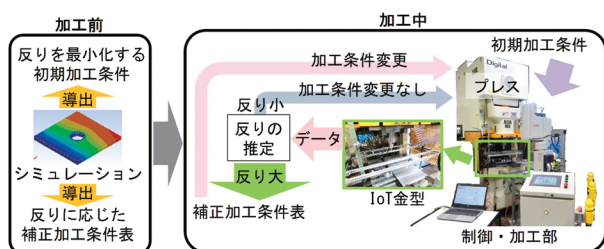


図24 反り抑制加工システムの概要

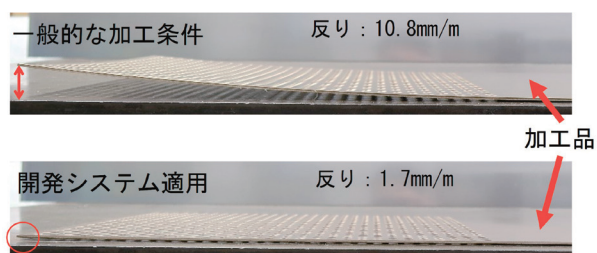


図25 有効性の検証実験結果

4.2 実工場での検証実験

4.1節の検証実験において、加工条件の補正は反り発生方向の境界前後の加工条件を交互に適用する結果となった。そこで、事前に設定した列ごとに反り発生方向の境界前後の加工条件を交互に適用することでIoT金型による加工条件補正が不要な簡易実装方法を開発し（図26）、企業の実工場においてパンチングプレスを用いた検証実験を行った（図27）。その結果、一般的な加工条件での反りが5.0mm/mだったのに対して、同実装方法を適用することで1.0mm/mにとどめることができ、大きな抑制効果を確認した（図28）。

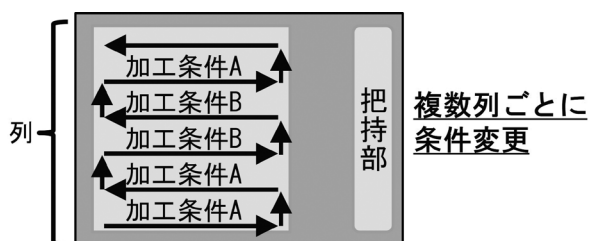


図26 簡易実装方法の概要



図27 実工場における検証実験の様子

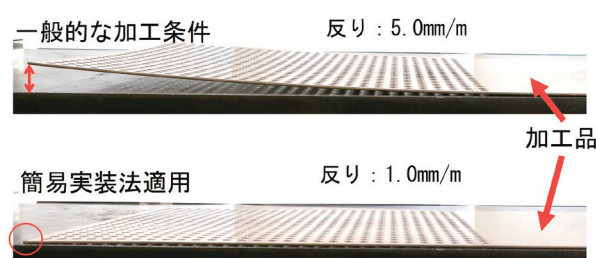


図28 実工場での検証実験結果

5. おわりに

本研究では、パンチングプレス加工時に発生するパンチングメタルの反り抑制を目的として、加工前にシミュレーション技術の活用により反りの少ない加工条件を導出し、加工中はIoT金型の活用により反りを監視して設定値を超えた場合に加工条件を変更し反りを抑制する加工技術を開発した。これらの機能を搭載した加工システムを構築し検証実験を行った結果、反りを大幅に抑制することができた。また、IoT金型を活用した加工システムが不要な簡易実装方法も考案し実工場で検証実験を行った結果、同様に反りを抑制することができた。

今後は、被加工材の材種や板厚、穴ピッチ、穴パターンなどの変化に対する影響を調査し、より汎用性の高い加工技術の開発を進める予定である。

謝辭

本研究で使用したマルチセンサ測定機は競輪の補助を受けて整備されました。記して感謝いたします。

参考文献

- 1) 吉田弘美：プレス加工大全，日刊工業新聞社，320PP，(2015)
- 2) 前田禎三：塑性加工，誠文堂新光社，568PP，(1972)

- 3) Isamu Aoki, Toshinori Takahashi : Journal of Materials Processing Technology, Vol.134, No.1, pp.45-52, (2003)
- 4) 坂本潤嗣, 工藤誠一 他:長野県工業技術総合センター研究報告, No.5, pp.115-118, (2010)
- 5) 小野田一夫:プレス技術, Vol.61, No.1, pp.18-22, (2023)
- 6) 廣田健治:天田財団助成研究成果報告書, Vol.28, pp.100-104, (2015)
- 7) 増田 新, 高橋勇樹 他:日本機械学会中国四国支部総会・講演会 講演論文集, 2014.52巻, pp.514-1-514-2, (2014)
- 8) 田中 徹, 萩原世也 他:塑性と加工, Vol.52, No.609, pp.1104-1108, (2011)