

# デジタルプレス加工のプロセス見える化・智能化技術開発

東京都立大学 教授 楊 明

日本大学 教授 高橋 進

職業能力開発総合大学校 教授 村上 智広

(平成 29 年度 重点研究開発助成 A グループ研究 AF-2017001)

キーワード：モーション制御，変形メカニズム，シミュレーション

## 1. 研究の目的と背景

インダストリー 4.0 などの次世代生産技術が求められる中、ものづくり IoT への期待が高まっており、塑性加工プロセスや生産技術の見える化、知能化に関する要素及びシステム技術の研究開発が急務となっている。昨今においてサーボプレスが登場でプレス加工技術がアナログからデジタルに変遷していることや、ネットワーク、ビッグデータ処理技術など情報通信環境も飛躍的に進歩したことから、塑性加工業界においても、プロセスの見える化や知能化などへの取組みが増えている。サーボプレスの普及により、各種スライドモーションを適用した摩擦低減や成形性向上などの効果が上がっており、ハイテン材など難加工材加工に関する有用性が実証されている。しかし、そのメカニズムは必ずしも解明されておらず、サーボプレスを使いこなすにはまだ多くの課題が残されている。

金型内での素材変形や金型との接触や摩擦摩擦形態のモニタリングが難しく、パルスモーションなどを適用した場合、素材の変形や素材と金型界面での摩擦現象が動的に変化するため、そのセンシング技術がさらに難しい。

本研究では、知的デジタル加工システムの実現のためにプレス加工 IoT システムを構成する下記要素技術の開発を行う。

- 1) センサ内蔵モデル金型(プロセス可視化シミュレータ)の開発
- 2) ソフトセンシング)とハードセンシングの融合によるプロセス見える化(知的センシング)技術の開発
- 3) 成形加工時のサーボプレス機械の動的応答特性の計測評価

## 2. 金型内蔵センサによるプロセス可視化実験

### 2-1 センサ内蔵板材成形シミュレータの開発

金型内で時々刻々に変化する素材変形および潤滑状態をその場で正確に把握するために、成形時に素材の変形に伴って金型が受ける応力や素材と金型間の摺動摩擦、さらに温度などの情報を高い周波数にも応答できるセンサを金型内に内蔵させ、素材変形形態や摺動摩擦などを評価できる板材成形シミュレータ(モデル実験)の開発を行った。

図 1 にシミュレータのイメージ図を示す。しわ抑え板に、複数のセンサを内蔵することにより、成形時の素材と金型との接触形態(面圧の変化やしわ発生の有無など)、摺動摩擦係数、温度などを測定する。特にサーボプレスのパルスモーションなどを適用した場合の動的特性を測定可能にする。図 2 (a) に角筒絞り金型のしわ抑え板にセンサを内蔵した場合の概要を示す。素材としわ抑え板との間の垂直方向と摺動方向の荷重測定が可能で 3 軸ピエゾ力センサ(キスラー社製、型式 9017C)をコーナー部と直辺部に内蔵させた。また、摺動によって発生する熱を測定するために熱電対を同じくコーナー部と直辺部に 1 個ずつ

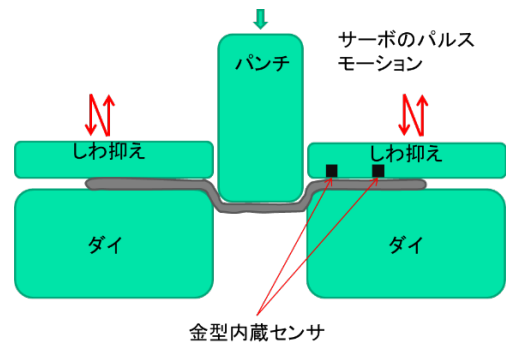
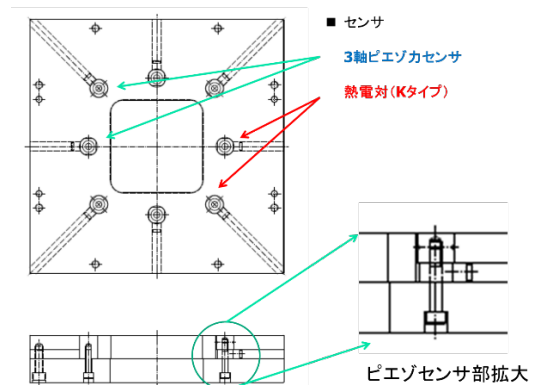
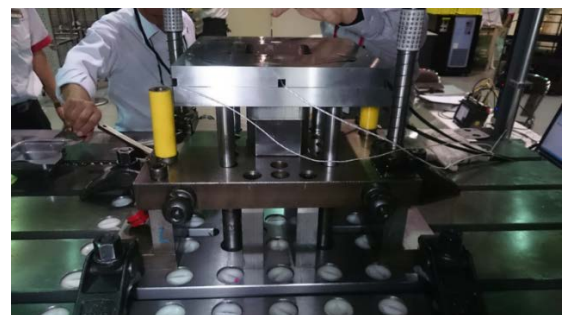


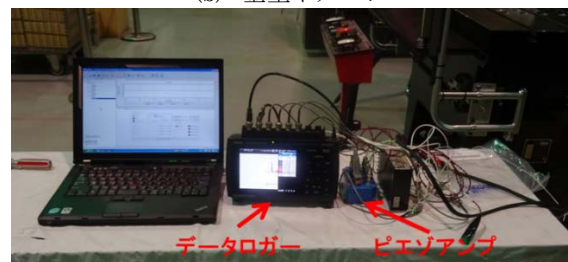
図 1 センサ内蔵モデル実験用金型概要



(a) センサ内蔵しわ抑え板概要



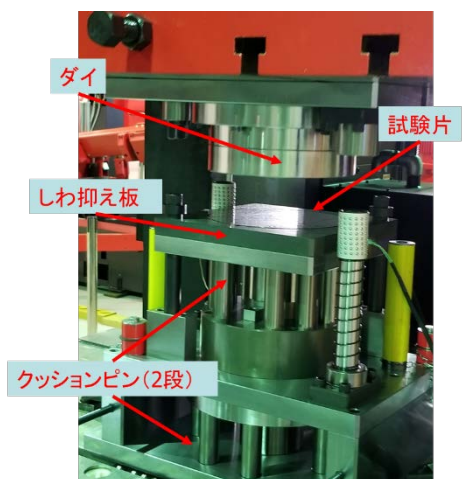
(b) 金型イメージ



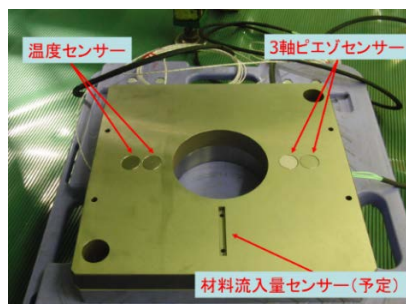
(c) データ記録システム

図 2 角筒絞り用モデル実験用金型

配置した。実際に製作したしわ抑え板を組込んだ金型の写真、および実験時に使用したデータ記録システムを図2(b)と(c)に示す。また、軸対象の成形モデルとして、円筒絞りの金型も試作した。図3に円筒絞り金型とセンサ内蔵しわ抑え板の写真を示す。成形が軸対象モデルであるため、センサを中心から円周方向の直線上に配置することにより、素材と金型との接触状態や摺動摩擦の情報を内周部及び外周部に関して、同時に得ることができる。また、素材の流入量も金型内蔵変位計などを導入することで測定評価可能である。



(a) 円筒絞りモデル実験金型全体イメージ



(b) センサ内蔵しわ抑え板概要

図3 円筒絞りモデル実験金型

本モデル実験金型の特徴として、3軸ピエゾ力センサを金型に内蔵することで、垂直方向で最大8kN(30MPa)、せん断方向で-1.5~1.5kN(-5.6~5.6MPa)の力(応力)を測定することができる。またセンサの剛性が高く、20kHzまでの動的変動に対応できるため、各種物理量を高い周波数応答で測定評価できる。

実際に、SPCCとハイテン材を用いて、角筒絞り成形を行い、成形中の素材と金型との接触部の摺動抵抗、しわ抑えの面圧分布、温度のオンラインモニタリングを実施した。成形時でモニタリングしたしわ抑えの垂直荷重、せん断荷重および温度の一例を図4に示す。ストレート分のセンサ情報が途中でサーチレートしているが、スライド変位と荷重のタイミングに同期した形で、しわ抑え板内蔵センサのストレート部とコーナー部のピエゾセンサからの垂直荷重およびせん断荷重、さらにストレート部とコーナー部の熱電対から得られた温度の変化の情報が得られている。ストレート部では、素材の流入量が大きく、それに伴って、垂直荷重、せん断荷重ともにコーナー部より大きく、温度もコーナー部より大きく上昇していることが分かる。

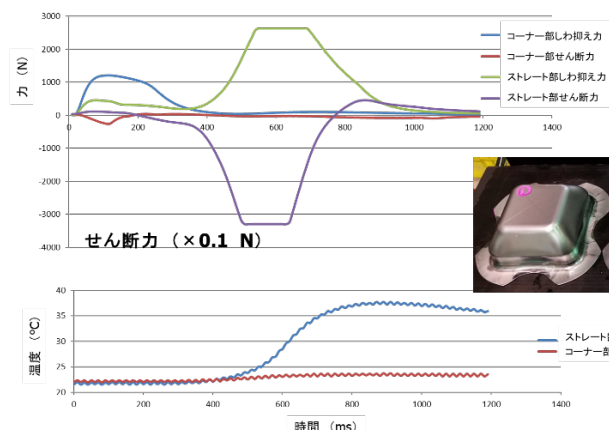


図4 角筒絞り成形でのセンシングデータ (材料: 590 MPa材, クッション圧60kN, クランクモーション)

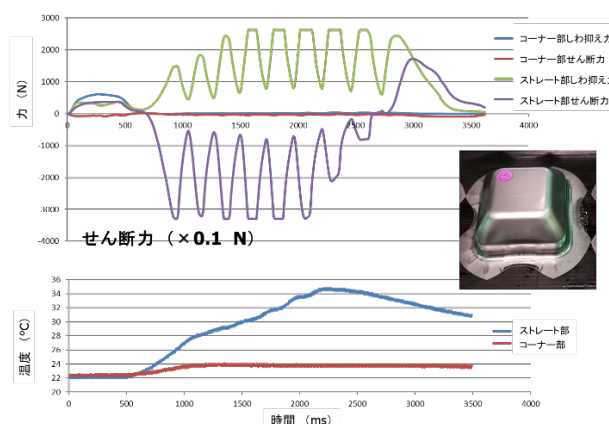


図5 パルスモーションでのセンシングデータ (材料: 590MPa材, クッション圧60kN, パルスモーション)

図5にパルスモーションを用いた深絞り成形での測定データを示す。スライドのパルス振動に従って、しわ抑え板の垂直荷重とせん断荷重がともに大きく振動していることが分かる。素材に対するしわ抑え力及び摺動摩擦がパルス振動に反応していることが確認できた。

成形途中でしわや割れが発生する場合、各荷重の測定データが大きく変化することで、正常時との違いが容易に検出することができる。また、角筒絞り金型のストレート部だけを利用したハット曲げ試験を実施することで、単純に摺動摩擦特性を測定することができる。素材と金型との接触部のしわ抑えの面圧、摺動摩擦抵抗の定量評価より、実プレスの潤滑特性同定に利用することが可能である。

## 2.2 摺動摩擦特性の計測・評価

軟鋼板(270MPa材)および高張力鋼板(590MPa材)に対して、サーボプレス機械を用いたハット曲げを行った。プレス速度が低い(1rpm)と高い(10rpm)条件でそれぞれセンサ情報を取得し、比較を行った。低速時の各センサ情報を図6に示す。ハット曲げの進行に伴い、しわ抑え板内蔵センサの垂直力(しわ抑え力)とせん断力(摺動力)が共に上昇するが、摺動力/しわ抑え力を摩擦係数として評価した場合、その値は0.1程度であり、ほぼ一定であった。また、この場合、温度上昇はわずかであり、無視できる程度であることが分かった。ただし、ハイテン材などを用いる場合、しわ抑え力をさらに高くする必要があるため、温度の上昇はもっと大きいと予想される。

スライド速度が摺動摩擦特性に及ぼす影響を調査した。低速（1rpm）における内蔵センサの情報及び摩擦特性を図7に示す。図から分かるように、摩擦係数（摺動力/しわ抑え力）が試験開始直後に上昇し、その後、わずかに減少した後、再び緩やかに上昇する挙動を示した。平均値として、0.09弱であった。これはハット曲げ開始に伴い、摩擦が静摩擦から動摩擦に変わり、その後摺動や面圧上昇の影響を受けて、わずかに上昇したと思われる。高速（10rpm）条件でも同様にセンサ情報を取得した。低速と高速における摩擦係数の変動の比較を図8に示す。摩擦係数の基本的な傾向は低速と比較すると大きな変化はないが、ハット曲げ後半での摩擦の上昇が低速より少なく、その結果、摩擦係数の平均値も0.07となっており、低速の場合の値より小さい。これは摺動時間が短いことと摺動速度向上による潤滑油のくさび効果があったと考えられる。

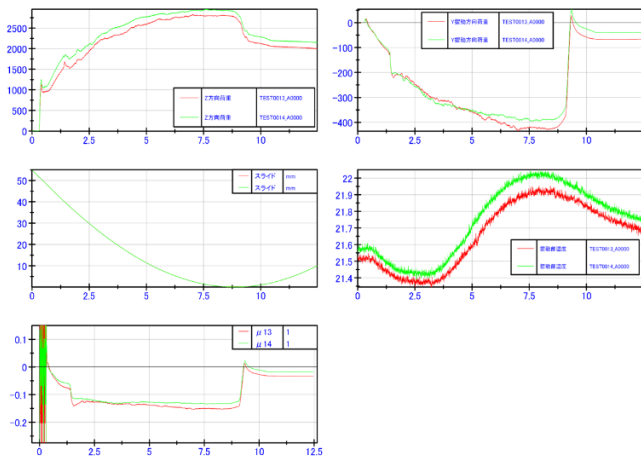


図6 低速ハット曲げでの各センサ情報（左上段と右上段：内蔵力センサの垂直力とせん断力，左中段：スライドの変位，右中段：温度，左下段：摩擦係数（せん断力/垂直力），各グラフ横軸は時間），実験条件：速度（1rpm），クッション圧：20kN（空気圧）

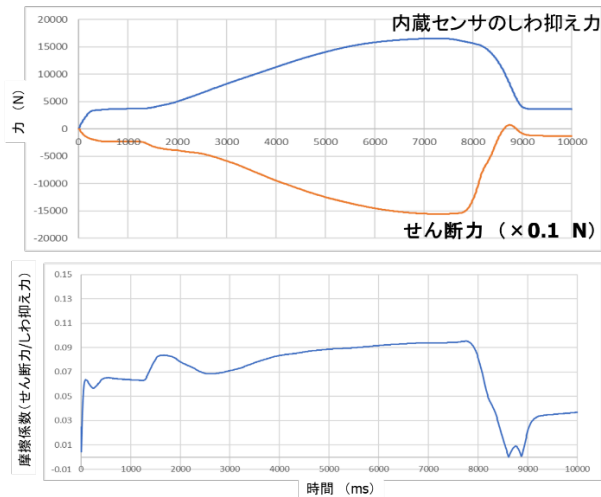


図7 低速ハット曲げにおけるしわ抑え力，せん断力，および摩擦係数（せん断力/垂直力）（速度：1rpm，材料：270MPa材，クッション圧：160kN）

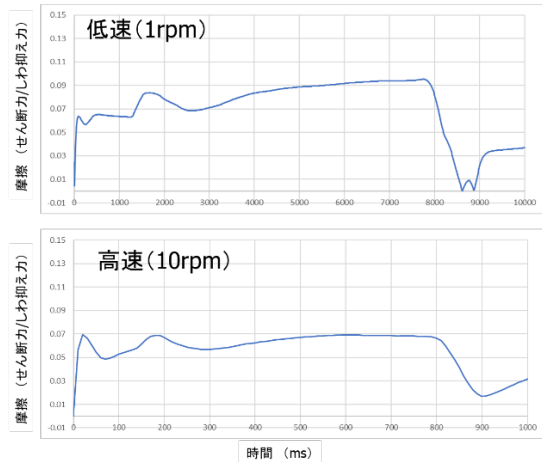


図8 摩擦特性の速度依存性評価

### 2.3 サーボモーションにおける動的摩擦特性の評価

クッション圧を一定にして、スライドの変位にパルスモーションを適用した場合の圧力の一例を図9に示す。パルスモーションの適用によるスライドの荷重変動に対応して、内蔵センサのしわ抑え力とせん断力もそれに同期して変動していることが分かる。一定圧と同様に摺動力をしわ抑え力で除した摩擦係数を図10に示す。パルスモーションによるスライドの振動に対して、摩擦係数も動的に振動するような挙動を示すが、振動の谷部では、摩擦係数がかなり小さい値を示し、また、平均的な摩擦係数も一定圧の場合よりも小さい値を示すことが分かった。これはパルスモーションでの再潤滑効果によるものであると考えられる。また、摺動摩擦の動的変動特性は潤滑油の粘性への依存性があることも各種潤滑油を用いた試験で分かった。

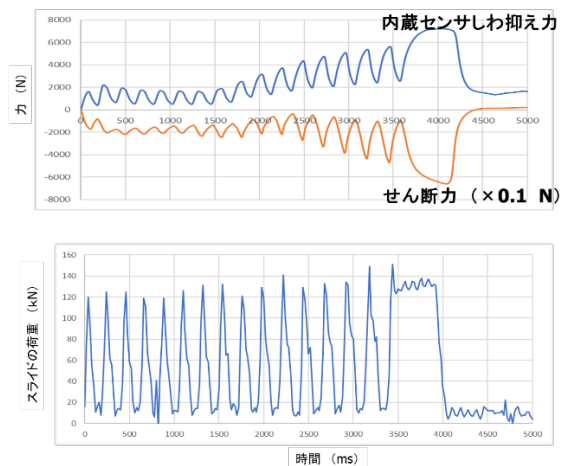


図9 パルスモーションでのスライドの荷重変動特性および金型内蔵センサのしわ抑え力とせん断力の変動特性（クッション圧：80kN）

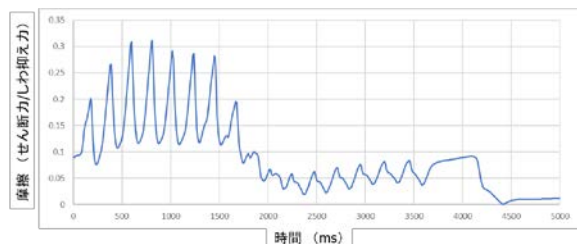


図10 パルスモーションにおける摩擦係数の変動特性

このように板材成形中での素材と金型との摩擦特性の動的变化をプロセス中にモニタリングすることが今までほとんど前例がなく、大変貴重な情報である。特にサーボプレスのモーションを適用した場合、平均的な摩擦特性だけでなく、動的な摩擦挙動を把握し、それに適したモーション設計を行うことや潤滑油を選択することが求められる。高い周波数で振動する場合、金型と素材界面にある潤滑油がスクイズ効果によって、高い流動抵抗を示すため、潤滑油の粘性に応じてパルスの各パラメータを設計すれば、より高い摩擦低減効果が得られ、難加工材や複雑形状製品の成形性向上につながるプロセス設計ができる。

### 3. 材料特性の見える化と成形シミュレーション

プレス成形において、被加工材は、金型の中で成形され、その変形挙動は、金型の外部からは見られない。したがって、成形品の成形プロセスを数値解析を使用したシミュレーションで可視化する方法が適用されている。精度良くシミュレーションを行うためには、材料特性、金型形状および成形条件等の高精度化が必要となっている。特に、材料特性の可視化は、成形に大きく影響をおよぼすことから、重要である。板材材料の機械的特性として一般的に使用されているのは、速度を 0.02mm/s で引張った時の応力 - ひずみ線図である。一般のプレス成形における加工速度と比較すると非常に遅い速度である。そこで、プレスの成形速度で加工した時の材料特性を計測し、当該材料特性を使用した成形シミュレーションを行い、引張速度が異なる場合の材料特性が成形性におよぼす影響を示す。

一般的な引張試験機では、最高速度でも約 20mm/s である。自動車のパネル部品を成形する時の速度は約 300mm/s と言われているので、一般的な引張試験機では特性の計測はできない。そこで、引張速度を達成する駆動源として、スライドの速度および位置を精度よく制御加工なスライドを有するサーボプレスを適用した。使用したサーボプレス (SDE-2025 アマダ社製：2000kN) を図 11 に示す。当該サーボプレスの仕様合うように開発した引張試験治具を図 12 に示す。試験治具の設計では、引張速度が 500mm/s まで計測できるようにした。プレススライドは、速度が 500mm/s まで加速するのに 50mm 必要なので、プレススライドが試験速度になってから試験片に力が作用する設計とした。引張試験での荷重はロードセル、ひずみは、試験片に評点を貼付し、高速度カメラで撮影した画像を解析して求めた伸びより算出した。

980MPa 材において、引張速度を、5~500mm/s まで変化させた時の応力 - ひずみ曲線を図 13 に示す。高速の場合、試験片に荷重作用時に、治具にも大きな力が作用し、その反動で治具が振動することが考えられたので、試験片と治具の固定方法を工夫した。その結果、応力が上下に振動することなく計測できた。図 13 より、引張速度が速いほど引張強さが高くなる結果となり、980MPa 材は、プレス成形速度でも、速度依存性があることが分かった。

図 13 で示した、線図を用いて、板成形シミュレーションを行った。ソフトは、板成形解析用の JSTAMP (JSOL 社製) を使用した。例題としては、スプリングバックの解析で良く用いられる断面がハット形状の S レールとした。素材と金型間の摩擦係数を 1.2 とした。素材の要素分割に際しては、解析結果への影響が少なくなるまで各要素を細かくした。成形プロセスでは、素材を金型の平面なダイフェースにブランクホールドしてからポンチを下降した。引張速度が 5mm/s と 500mm/s の時の材料特性を使用したスプ

リングバックの解析結果を図 14 に示す。また、最大のスプリングバックと引張速度の関係を図 15 に示す。引張速度が増加するに伴って、スプリングバックが顕著に増加していることが分かった。この結果より、精度の良い成形解析のためには、材料のひずみ速度依存性の考慮が必要であると言える。



図 11 サーボプレス



図 12 引張試験治具

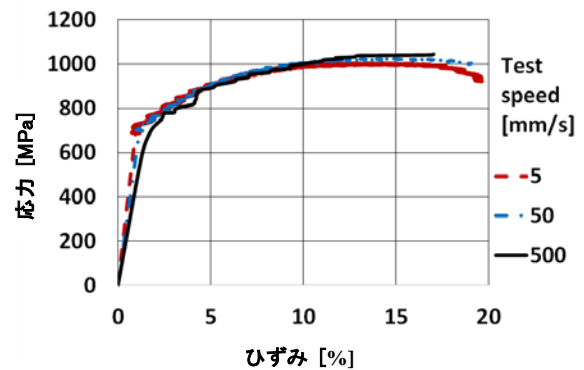
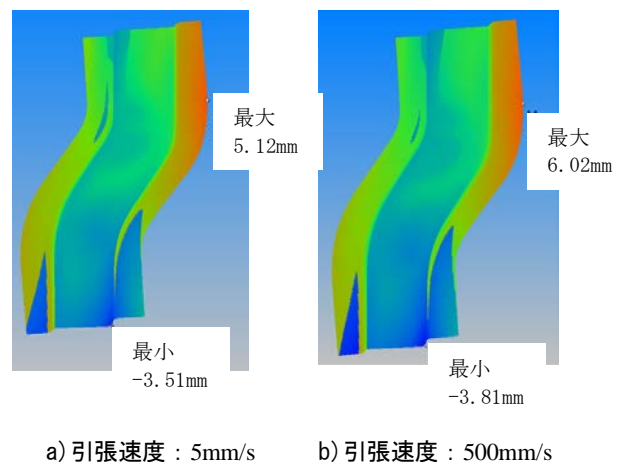


図 13 980MPa 材の引張試験速度を変化させた時の応力 - ひずみ線図



a) 引張速度：5mm/s      b) 引張速度：500mm/s

図 14 980MPa 材の引張速度の異なる応力 - ひずみ曲線を使用した時のスプリングバックの比較

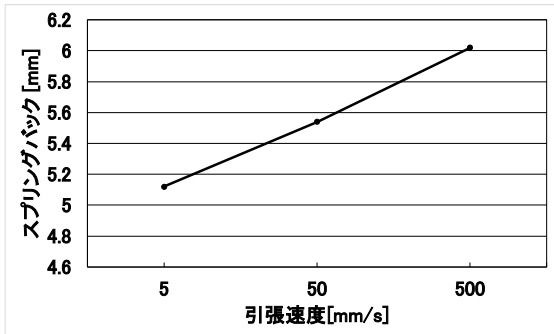
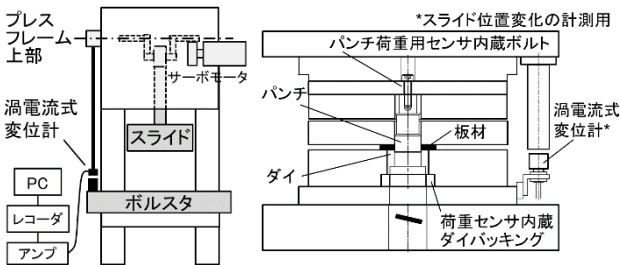


図 15 980MPa 材の引張速度とスプリングバックの関係

#### 4. サーボプレス機の動的応答特性の可視化の試み

フル・クローズド・ループ制御方式のねじ駆動サーボプレスの動的応答特性については村上、楊らの研究<sup>2)</sup>がある。本研究では普及度の高いセミ・クローズド・ループ制御方式のクランクサーボプレスの動的応答特性の計測評価に取り組んだ。

実験機は定格加圧能力 450kN のクランクサーボプレス (AMADA SDE4514) である。金型は単発打抜き型 (打抜き外形φ30mm, コーナ R5mm) を用いた。被加工材は板厚 3.2mm の SPC 材で、金型のクリアランスは板厚比 7.5% (ダイ片側 0.24mm) とした。実験機のスライド位置変化の挙動およびプレスフレームの弾性伸縮の挙動を計測するために、ボルスタ上面を基準としてスライド下面の相対的な位置変化、およびプレスフレーム上部の相対的な位置変化を渦電流式変位計で計測した。さらに荷重を計測するためにパンチ荷重用センサを金型のパンチ締結ボルトに組み込み、ダイ荷重用センサをダイバックに組み込んだ。計測装置の概要を図 16 に示す。スライドモーションの最適化を図る際の基礎的知見を得ることを目的として、以下の 3 条件で計測を試みた。



(a)クランクサーボプレス (b)打抜き金型

図 16 動的応答特性の可視化用計測装置の概要

- 1) 荷重変動に伴うスライド位置の変動特性を確認するために、打抜き時と板押えのみ時のスライド位置を計測し、そのデータからスライド位置偏差 (=加工時の位置 - 板押えのみ時の位置) を求めた。図 17 で  $V$  は加工中の平均打抜き速度である。図より破断時のスライド位置偏差が解消する時間は  $V=25\text{mm/s}$  では 0.02s であった。 $V=190\text{mm/s}$  では 0.042s であり、下死点付近でも位置偏差が残存している。順送り金型で打抜き後に成形加工などが入る場合は、Z 軸方向の成形寸法が不安定になりうることを示唆している。
- 2) 高速に上下振動 (最大 10Hz) するモーションのスライド位置の安定性を確認するために無負荷時 (板押えパ

ネを外した状態) のスライド位置を計測した。図 18 に示すように上昇/下降後のスライド位置の安定時間は約 0.1s であった。上昇位置や下降位置の精度が重要な場合は、保持時間の設定が必要と考えられる。

- 3) 加工途中でスライドが一端上昇する際のパンチと被加工材の密着/離れの状況を調査した。図 19 にパルス 1 モーション時のパンチ荷重、スライド位置、スライド - ボルスタ間の全伸び (=プレスフレームの弾性伸び量 + スライド駆動部の弾性縮み量) を示す。プレスフレームの弾性伸び量は図 16(a) の渦電流式変位で計測し、スライド駆動部の弾性縮み量はスライド駆動部 (図 16(a) におけるプレスフレーム上部からスライド下面まで) のバネ定数とダイ荷重から算出した。図 19 の時間 1s 付近ではパンチ荷重は 0kN でありパンチが被加工材から離れていることがわかる。これより、実際のスライド上昇量が、スライド上昇直前のスライド - ボルスタ間の全伸びより大きいとき、パンチは被加工材から離れることが確認された。

以上の結果より、セミ・クローズド・ループ制御のクランクサーボプレスについて、スライドモーションの最適化を図る上でいくつかの基礎的知見を得ると同時に、サーボプレスの動的応答特性の可視化の重要性を示した。

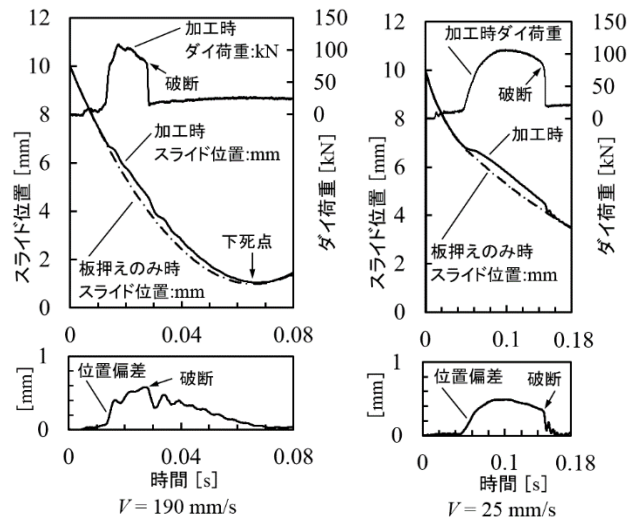


図 17 打抜き時のスライド位置と位置偏差

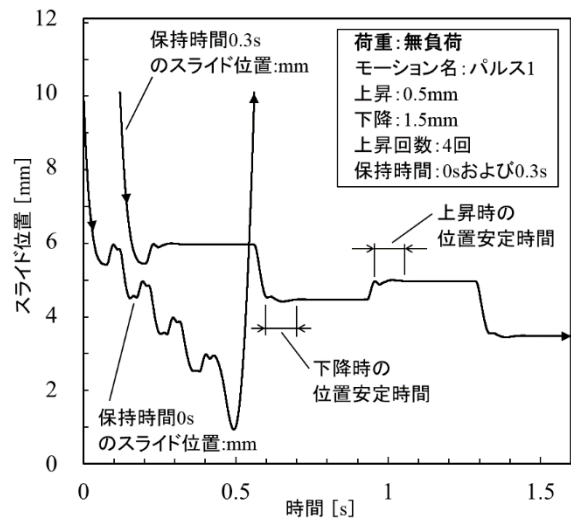


図 18 パルス 1 モーションのスライド位置の安定時間

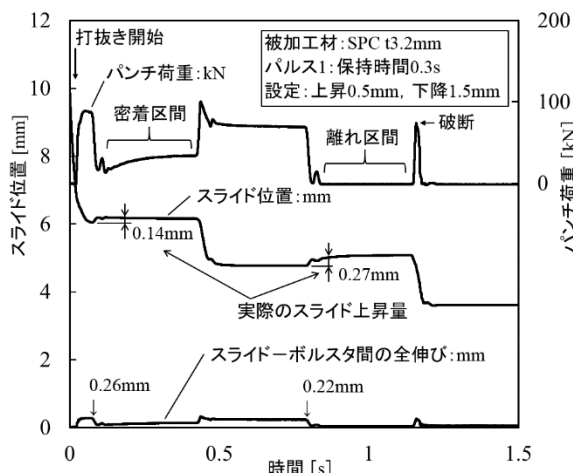


図 19 スライド上昇時のパンチ離れの有無調査

## 5. 知的デジタルプレス加工システムの提案

### 5.1 シミュレーション技術との融合

本研究で開発したシミュレータは、金型内部の情報取得には有用であるが、金型内蔵センサで得られた情報はセンサを内蔵する場所に限定され、金型内部すべての情報の可視化になっていない。また、これらの情報から素材の変形形態を推測するには十分とは言えない。すなわち、プレス加工における金型内部の可視化を実現するためには、センサ情報（ハードセンシング）だけでは難しく、さらに実験モデルに合わせたプロセスシミュレーション（ソフトセンシング）を行い、ハードセンシングとソフトセンシングの融合が必要となる。図 20 に本研究プロジェクトで提案するハードセンシングとソフトセンシングの融合によるプロセス可視化の概要を示す。センサ情報を用いてシミュレーションの各種材料・プロセス条件を補完しつつ、センサ情報では得られない素材の応力・ひずみ分布や金型との接触状態などプロセス情報をより忠実にシミュレートすることを可能にする。第 2 章の動的摺動摩擦係数や第 3 章での素材変形の数値依存性をシミュレーションに反映することによって、シミュレーション結果の信頼性向上につながるが、今後オンラインでの補間技術の開発が必要となる。

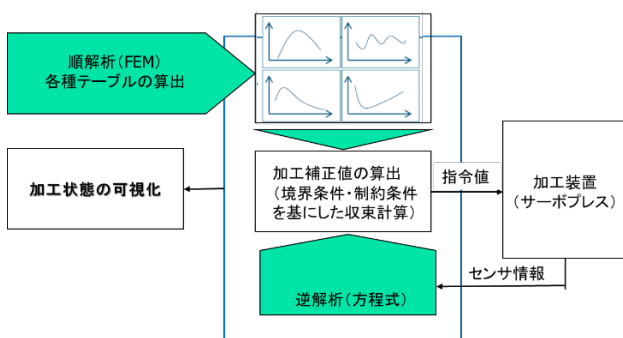


図 20 ソフトセンシングとハードセンシングの融合

### 5.2 プレス加工 IoT プラットホームコンセプト

プレス加工のプロセス見える化さらに知能化を実現するには、プレス加工の特殊性に対応した金型内蔵センサ技術、機械動特性評価センサ技術、さらに信号の処理技術、塑性加工の知識に基づく情報処理技術、ネットワークやデ

ータベース技術の融合が必要となるなど幅広い分野の学問と知識が必要とする。

図 21 に智能化プレス加工のための IoT プラットホームの概要を示す。金型内蔵センサと機械内蔵センサ及びこれらのセンサ情報を統合するインターフェース、機械・金型統合処理システム、複雑な変形を伴うプロセス情報の抽出処理システム、インターネットを介したソフトセンシングシステム、知識ベース及びプロセス制御システムから構成される。ハードセンシングとソフトセンシングの融合、AI に基づく情報の抽出と知識ベースへの蓄積、さらにセンシング情報及び知識ベースの情報を用いたプロセス制御によって、知的デジタルプレス加工の実現になる。本研究では、IoT プラットホームの要素技術である機械動特性、金型内蔵特性を計測評価するセンサ技術、シミュレーションと融合したソフトセンシング技術の開発を行った。

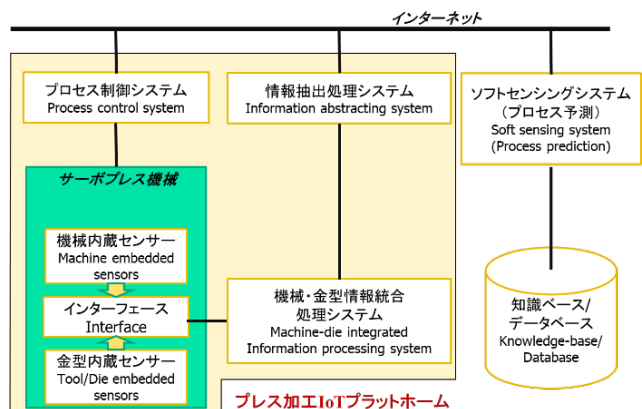


図 21 プレス加工 IoT プラットホームの概要

## 6. 結言

本研究では、板材成形における素材と金型との界面力の動特性を計測評価するセンシング技術を開発し、素材と金型との接触状態や摺動摩擦のその場観察が可能な板材成形シミュレータを製作した。シミュレータを用いたモデル実験によって、摺動摩擦の動特性など大変重要な知見が得られた。また、機械動特性見える化のためにセンシング技術、シミュレーションと融合したソフトセンシング技術の開発を行った。今後は、これらのセンサ情報を統合的に処理する知的センシング技術や AI を利用したビッグデータ処理技術などを開発し、プレス加工 IoT プラットホームを構築し、プレス加工の IoT 化の実現、さらに知的デジタルプレス加工システムの実現にむけた研究開発を進めたい。

## 謝辞

本研究は公益財団法人天田財団重点研究開発助成（平成 29 年度）の支援を受けて行われたものであり、同財団に深甚の謝意を表す。また、モデル実験用金型開発は日本鍛圧機械工業会の産学連携事業の助成を受けており、この場を借りて感謝の意を表す。

## 参考文献

- 1) 楊明・西村尚：サーボプレスの高度利用技術とその応用事例，塑性と加工，55-645（2014）。
- 2) 村上智広・楊明・來住裕：ねじ駆動サーボプレスの打抜き振動解析と振動抑制のための最適条件予測，塑性と加工，58-675（2017）。