

打ち抜き加工の荷重センシングと深層学習によるプロセス状態の見える化

Visualization of Punching Process Status by Load Sensing and Deep Learning

和田 紀彦
Toshihiko Wada

高橋 正行
Masayuki Takahashi

藤井 慶太郎
Keitaro Fujii

要 旨

加工状態を正確に表したセンシングデータが得られれば、データベースを用いた深層学習により、加工状態の推定や異常検出することが可能となると考えられる。本稿では、量産現場で広く用いられる打ち抜き加工を対象として、ワークに作用する荷重をリアルタイムで高精度に計測できるセンシングシステムを開発した。開発した計測システムから、クリアランスや工具摩耗の変化は、荷重曲線の変化として表れることが明らかとなった。また、荷重曲線データベースの深層学習から、工具摩耗状態を自動判別できることを実証した。

Abstract

If sensing data that accurately represents the machining state is obtained, it is possible to estimate the machining condition and detect abnormalities by performing deep learning using a database. In this report, targeting the punching process that is widely used in mass production, a sensing system that can measure the load acting on the workpiece in real time with high precision has been developed. Using the developed measurement system, it was shown that changes in clearance and tool wear appear as changes in the load curve. In addition, it was verified that the tool wear state can be automatically determined from the deep learning of the load curve database.

1. はじめに

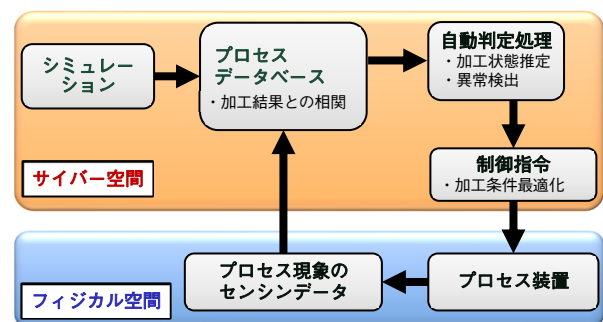
近年IoTやAIといった情報通信技術および情報処理技術の発展に伴い、インダストリー4.0の実現がさまざまな分野で検討されている。フィジカル空間のセンサや装置とサイバー空間のコンピュータをつなぎ、連動させることで、より効率的な世界を実現するという考え方は、モノづくりにおいても今後主流になっていくと思われる。工場の各装置にセンサを設置して稼働状況を見える化することで、予防保全や保守を含めた効率的な生産が可能となることが期待され、既にさまざまな現場で実証が進められている。

一方で、装置の稼働を制御して生産性を高めるだけでなく、加工プロセスを制御して加工品質を向上していくことも期待されている。従来のモノづくり現場では、あらかじめ定めた製造条件を正確に実行することで、高品質な製品をばらつきなく製造する努力が重ねられてきた。しかしながら、加工プロセスは作用状態を正確に把握することが困難であることが多いため、製造条件の決定は、技術者や技能者の試行錯誤や自身の経験に基づいて決定されてきた。このために、ワーク状態や製造環境条件が想定外に変化すると製品不良が発生し、またその原因解明に時間を要するという問題があった。

筆者らは加工プロセス状態を見える化し、得られたプロセスデータから自動状態判定や最適加工条件を制御する自律制御加工システムの構築を目指している。第1図

に目指す自律制御加工システムの概念図を示す。フィジカル空間のプロセス装置に取り付けられたセンサにより加工状態を把握できるデータを取得し、サイバー空間上の加工プロセスデータベースとして加工結果と紐(ひも)付けて蓄積する。加工状態をセンシングすることが困難な場合や実データがない箇所を補完する必要がある場合には、シミュレーションを活用してプロセスデータベースに加える。蓄えたデータの深層学習から、加工状態の推定や異常検出が可能となり、さらに将来的には、加工状態の判定結果からプロセス装置の加工条件を最適化することで、不良発生を抑制する加工システムが実現できると考えられる。

上記システムの実現には、加工プロセスの作用状態を正確にセンシングしたデータが必要となるが、そのため



第1図 自律制御加工システムの概念図

Fig. 1 Conceptual diagram of the autonomous control processing system

には反応が生じている加工点での状態を直接センシングすることが重要である。

本研究では、多くの製造現場で用いられる打ち抜き加工を例として、ワークに作用する荷重のモニタリングシステムを開発し、プロセス状態の変化と荷重曲線の相関について検討した。また、荷重曲線の深層学習からプロセス状態の自動判定可否について検討した。

2. 打ち抜き加工の荷重センシング

2.1 開発コンセプト

打ち抜き加工は、同一形状を生産性高く、また低コストで製造できるため、多くの製造現場で用いられている。本加工プロセスは、金型上型に組み込まれたパンチと金型下型に組み込まれたダイをクリアランスと呼ばれる所定の隙間を有するように組み立てられた金型を用いてワークをせん断する方法である。打ち抜き形状を高精度に加工するためにはパンチ端部を鋭利形状にし、また、クリアランスを小さくして、パンチとワークとの接触点に応力を集中させることが重要である。

本加工プロセスの製造現場における問題として以下の2点があげられる。1つは、クリアランスの誤差である。一般に、パンチが行うせん断仕事はクリアランスにより変化し、適正な値に設定することで極小値となることが報告されている[1]。クリアランスは部品の加工精度と金型の組み立て精度から決定され、厚み100 μm 以下のワークの場合には、クリアランスは5 μm 以下に設定されることが多い。しかし、クリアランスは簡易に測定することが困難であり、出来栄は作業者の技能に依存しているため、品質ばらつきを発生させる一因となっている。

もう1つの問題はパンチの摩耗である。パンチは研削、研磨加工により先端を所定形状に仕上げて使用するが、連続して使用すると先端形状が摩耗により徐々に変化する。先端形状が変化すると打ち抜き精度が悪化するため、一般の製造現場では所定回数使用後にパンチを再研磨する運用としているが、摩耗量にはばらつきがあり、また製造装置に取り付けた状態で摩耗量を計測することは困難であるため、所定の使用回数前であってもパンチが摩耗して不良が発生するという問題がある。

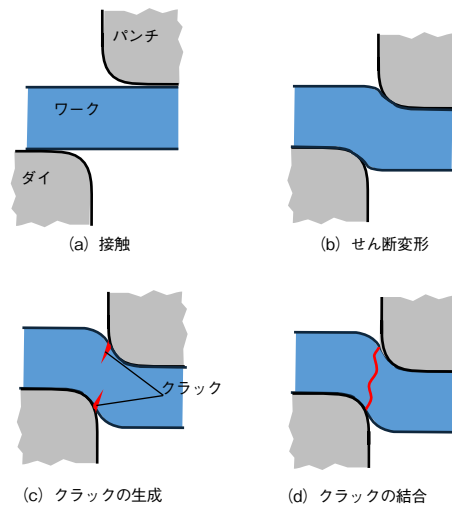
このように打ち抜き加工では、金型内部でのクリアランスや工具摩耗をリアルタイムで計測することが困難であるために不良が発生し、また、不良発生時には原因の特定や対策に時間を要するという問題があった。

そこで、上記問題を解決するために本研究では、加工プロセス状態を表すセンシングデータからクリアランスや工具摩耗を推定することを検討した。まず、金型内部

で起きている加工プロセス状態を見える化するセンシングシステムを開発し、クリアランスや工具摩耗の変化とセンシングデータとの因果関係について検討した。次に、取得したデータのデータベースの深層学習から、工具摩耗量を推定することを検討した。

2.2 打ち抜き加工のメカニズムと荷重センシング

打ち抜き加工におけるプロセス状態を正確に表すためには、ワークが変形している加工点における力をセンシングすることが重要であると考えられる。第2図に打ち抜き加工プロセスの構成要素と想定メカニズムを示す。所定のクリアランスを有するように組み立てられたパンチとダイの間に挿入されたワークに対して、パンチをダイ方向へ下降させると、パンチがワークに接触し（第2図 (a)）、圧縮変形後、せん断変形が生じる（第2図 (b)）。さらにパンチを押し込むとパンチおよびダイとワークとの接触点近傍にクラックが生成され（第2図 (c)）、そのクラックが伸展し結合することでワークが破断される（第2図 (d)）。クリアランスが大きい場合やパンチおよびダイの先端に丸みがある場合には、クラックの発生位置は応力が最も大きくなるパンチおよびダイの側面側となるため、ワーク破断面の延長上にバリと呼ばれる突起物が形成される。

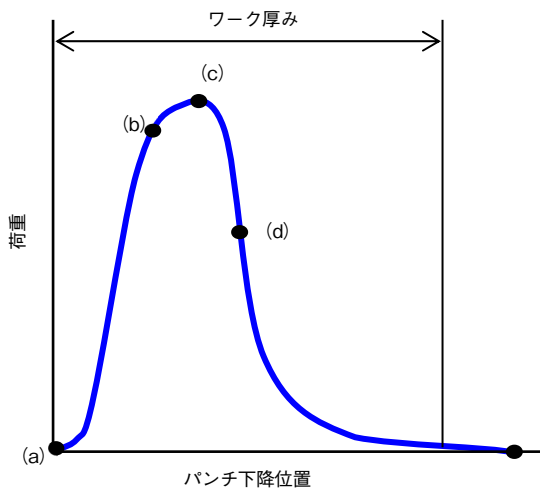


第2図 打ち抜き加工のメカニズム

Fig. 2 Mechanism of the punching process

第3図にパンチの下降位置とワークに作用する荷重の関係を示す。第2図で示した加工メカニズムの各過程におけるワークに作用する応力の変化により、パンチのストロークに対する荷重は変化する[2]。第3図において、まずパンチがワークに接触した時点（第2図 (a)）よりワークへ作用する荷重が発生し、せん断変形が大きくな

る(第2図(b))につれて荷重は増加する。この荷重は、ワークにクラックが発生する時点(第2図(c))で最大となり、クラックの進展(第2図(d))に応じて減少する。また、クラックが結合しワークが破断した後もワーク破断面とパンチ側面との摩擦により、ワークに作用する荷重が残る。このように、ワークへ作用する荷重はせん断プロセス状態と直接的な因果関係があることから、この荷重を正確にモニタリングすることで、プロセス状態を検知することが可能となると考えられる。



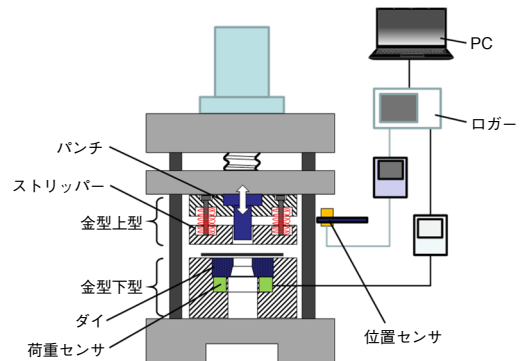
第3図 ワークに作用する荷重
Fig. 3 Punching load on the workpiece

2.3 荷重センシングシステム

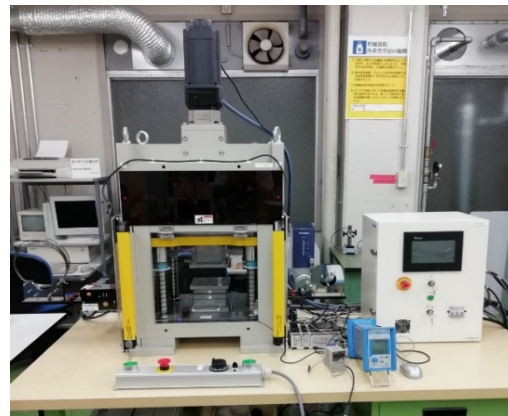
打ち抜き加工中のワークに作用する荷重を測定するセンシングシステムを開発した。第4図に装置の概略図を示す。打ち抜き装置にはパンチ位置の制御容易なサーボスクリー式の装置を用いた。ワークに作用する打ち抜き荷重の測定には、高剛性かつ高応答性を有する水晶圧電式センサをダイの直下に設置した。また、位置センサとして、0.3 μm の分解能かつ100 kHzの応答性を有する渦電流式センサを金型上型の取り付け面位置を測定できるように設置した。位置センサの出力と荷重センサの出力はロガーを介してPCへ取り込まれ、プロセス中の各パンチ位置におけるワークに作用する荷重を計測することができる。第5図に実験装置の外観を示す。従来の荷重測定としては、金型内の設置可能な位置に設置されたひずみゲージを用いてパンチにかかる最大荷重を測定し、その測定値の閾(しきい)値判定により工具破損を検知することが主に行われてきた。しかし、この測定方法では主に最大荷重しか計測できないために工具破損以外の状態を推定することは困難であった。本システムでは、ダイの直下に応答性の高いセンサを設置することで、加工

中のパンチ位置に対するワークへ作用する荷重の変化を計測することができる。

開発した測定システムを用いてワークに作用する荷重を測定した。ワークとして厚み200 μm のSUS304材を用い、打ち抜き形状は $\phi 4.5$ の丸穴とした。パンチとダイのクリアランスは14 μm とした。第1表に実験条件を示す。



第4図 打ち抜き荷重のセンシングシステム
Fig. 4 Punching load sensing system



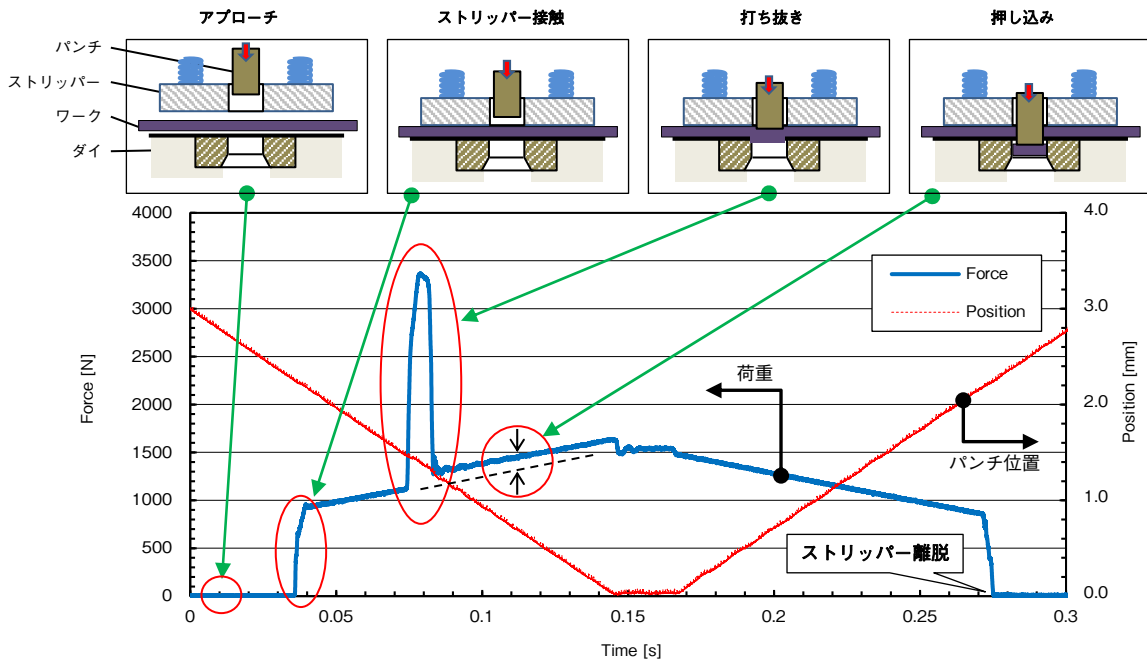
第5図 実験装置外観
Fig. 5 Appearance of the experimental setup

第1表 実験条件

Table 1 Experimental condition

Punch velocity [mm/s]	20
Material of workpiece	SUS304
Thickness of workpiece [μm]	200
Diameter of punch [mm]	$\phi 4.5$
Clearance between punch and die [μm]	14
Radius of punch edge [μm]	6

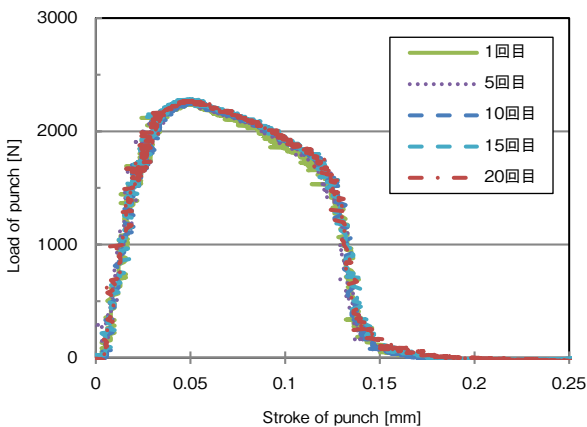
第6図に加工時間経過におけるパンチ位置とワークに作用する荷重の測定結果を示す。パンチの下降が開始した後、まずストリッパーがワークに接触して荷重が増加する。さらにパンチが下降してワークを打ち抜きと第3



第6図 パンチ位置と打ち抜き荷重
Fig. 6 Punch position and punching load

図のような荷重プロファイルが得られている。荷重センサで計測される荷重には、パンチの下降動作と連動して線形に増加するストリッパーの押圧も含まれており、パンチが最下点に到達後、ストリッパーが離脱する位置まで上昇すると荷重が除荷される。このため、計測荷重からストリッパーによる荷重成分を除いた値を、ワークに作用する荷重として算出した。なお、ワーク打ち抜き後の押し込み時において、ストリッパーの荷重成分に加えて一定量の荷重が計測されているが、これはワークの破断後においてワーク破断面とパンチ側面の摩擦により荷重が増加していると考えられる。

第7図に、第1表の加工条件にて連続20回打ち抜き加工



第7図 打ち抜き荷重の繰り返し測定結果
Fig. 7 Results of repeated measurement of the punching load

を実施したときの5回ごとのパンチ位置とワークに作用する荷重の関係を示す。なお、パンチ位置の原点はパンチとワークが接触した位置とした。計測された荷重曲線は非常によく一致しており、本計測システムの測定再現性が高いことがわかる。したがって、計測した荷重曲線が変化したときには、プロセス状態に何らかの変化が生じたと考えられる。

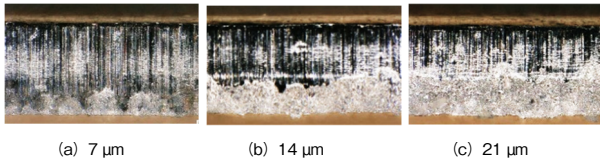
3. 荷重センシングによるプロセス状態の見える化

3.1 クリアランス量と荷重曲線の関係

打ち抜き品質に大きく影響するクリアランス量について、クリアランス量と荷重曲線の相関について検討した。

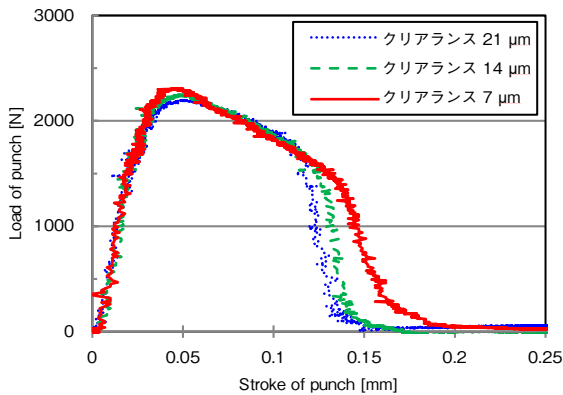
実験として、クリアランスを7 μ m, 14 μ m, 21 μ mに変えた金型を用い、他は第1表の条件で打ち抜き加工を実施し、荷重曲線を計測した。各条件で加工したワーク断面写真を第8図に、計測した荷重曲線を第9図に示す。打ち抜き加工におけるワーク断面には、打ち抜き方向に沿った筋が入っているせん断面と、ワークが引きちぎられることにより粗面として形成される破断面が現れる。第8図において、クリアランスが大きくなるにつれてせん断面が小さく、破断面が大きくなっていることがわかる。一方第9図より、クリアランスを変化させると荷重曲線が変化しており、クリアランスの小さい条件では立ち下がりが遅れていることがわかる。これはクリアランスが小さい場合は変形領域での静水圧が大きくなり、亀裂の

成長が妨げられているためと考えている。このように、クリアランスが変化すると加工メカニズムが変化し、荷重曲線の変化として表れることがわかる。



第8図 打ち抜いたワークの断面写真

Fig. 8 Cross-sectional photograph of the punched workpiece

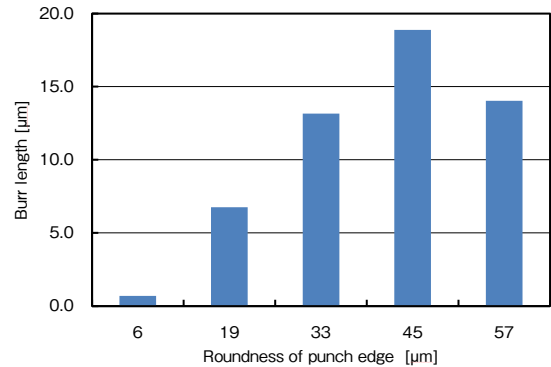


第9図 各クリアランス条件における打ち抜き荷重測定結果
Fig. 9 Punching load measurement result under each clearance condition

3.2 パンチ摩耗と荷重曲線の関係

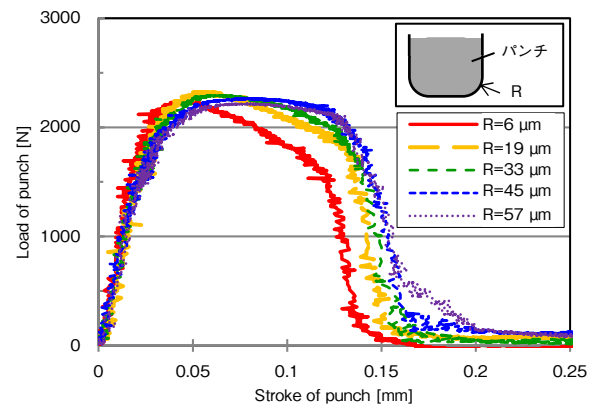
次に、ワークに作用する荷重曲線とパンチ摩耗量の相関について検討した。実験は、摩耗状態を模擬した仮説検証実験として、パンチ先端部へR加工を施した、 $R=6\ \mu\text{m}$ 、 $R=19\ \mu\text{m}$ 、 $R=33\ \mu\text{m}$ 、 $R=45\ \mu\text{m}$ 、 $R=57\ \mu\text{m}$ の5つパンチを用いて、第1表の条件で打ち抜き荷重曲線を計測した。各条件における打ち抜いたワークのバリ長さを第10図に、計測した荷重曲線を第11図に示す。第10図より摩耗の進行に伴いバリ長さが増加していることがわかる。なお、エッジ丸み $R=57\ \mu\text{m}$ の加工結果は $R=45\ \mu\text{m}$ の結果よりも小さくなっているが、これはバリ長さが過度に大きくなり、根元から折れ曲がったためである。第11図において、荷重曲線立ち上がりのピーク荷重には大きな差異は見られないのに対して、荷重曲線の後半の立ち下がり部分では顕著な差が現れていることがわかる。これはパンチ刃先の丸みが大きくなると、パンチ接触点でのワーク材料の応力集中が小さくなるためにパンチ側の亀裂伸展に時間を要しているためであると考えている。このように、摩耗の状態もクリアランスと同様に、荷重曲線と相関が

あることがわかった。なお、工具の摩耗形態には本稿で検討した先端が丸みを帯びる摩滅摩耗の他に、一部分が部分的に欠落するチッピングという摩耗形態もあるが、この現象に関する検討は今後の課題である。



第10図 パンチ先端丸みとバリ長さの関係

Fig. 10 Relationship between the roundness of the punch edge and burr length

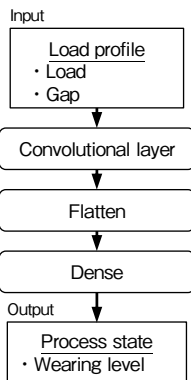


第11図 各摩耗条件における打ち抜き荷重測定結果
Fig. 11 Results of the punching load measurement under each wear condition

4. 深層学習による荷重曲線の判別

クリアランスやパンチの摩耗が変化すると荷重曲線に有意差が生じることがわかった。そこで深層学習を用いた荷重曲線の自動判別について、3.2節にて述べたパンチ摩耗について検討した。自動判別方法として、画像認識のアルゴリズムで使用される畳み込みニューラルネットワークを有した分類器を作成した。本手法は画像から特徴を抽出し判別できるという利点を有しており、プロセス状態を表している荷重曲線を画像のようにとらえて処理することで、プロセス状態の判別が可能になると考えられる。第12図に作成した分類器のモデルを示す。分類器には荷重データと位置データを入力し、入力されたデ

ータは、特徴を抽出する畳み込み層と1つのベクトルに変換処理をする平滑化層を通して、全結合層から1×5のベクトルとして出力される。このベクトル成分は尤(ゆう)度と呼ばれる5つの摩耗状態 (R6 μm～R57 μm) である確率を表しており、尤度の最大値を摩耗状態として判定した。



第12図 分類器モデル
Fig. 12 Model for classifying the load profile

検証実験として5種類の摩耗状態のパンチを用い、第1表の条件で各20回ずつ打ち抜いた合計100サンプルを用意し、無作為に抽出した70サンプルを用いて第2表の条件にて分類器を学習させた。次に、残りの30サンプルを学習させた分類器を用いて分類した。その結果、全てのサンプルを正解の摩耗状態へと分類することができた。このように、深層学習を用いることでワークへの荷重曲線から工具摩耗状態を推定することを検証できた。

第2表 学習条件
Table 2 Learning condition

Loss function	Categorical crossentropy
Optimizer	SGD
Number of epochs	1000

5. まとめ

打ち抜き加工において、プロセス状態データからクリアランスや工具摩耗を推定することを目的とし、ワークに作用する荷重のモニタリングシステムを開発した。その結果、以下の2点が明らかとなった。

- (1) 開発したモニタリングシステムは再現性良くワークに作用する荷重曲線を得ることができ、クリアランス量の相違やパンチ摩耗の変化は荷重曲線の変化として現れる。
- (2) 深層学習を施した分類器を用いることで、ワークに

作用する荷重から工具摩耗状態を精度良く推定することができる。

今後、クリアランスと工具摩耗以外のパンチのチップングや工具潤滑などの不良発生の各要因と荷重曲線の関係を明確化したデータベースを構築することで、製造設備上での汎用的な不良判定処理が可能になると考えられる。さらに、金型内にクリアランス調整を可能とするアクチュエータを搭載し、判定処理情報からクリアランスを最適値へ制御して不良発生率を低減させる加工システムを目指していく。

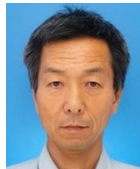
参考文献

- [1] 古閑伸裕 他, 新塑性加工技術シリーズ 4. せん断加工, (一社) 日本塑性加工学会 (編), コロナ社, 2016, pp26-27.
- [2] 橋本明 他, プレス作業読本, (株) 日刊工業新聞社, 東京, 1971, pp53-56.

執筆者紹介



和田 紀彦 Toshihiko Wada
 マニファクチャリングイノベーション本部
 生産・環境技術研究所
 Production Engineering and Green Technology
 Laboratory, Manufacturing Innovation Div.
 博士 (工学)



高橋 正行 Masayuki Takahashi
 マニファクチャリングイノベーション本部
 生産・環境技術研究所
 Production Engineering and Green Technology
 Laboratory, Manufacturing Innovation Div.
 工学博士



藤井 慶太郎 Keitaro Fujii
 マニファクチャリングイノベーション本部
 生産・環境技術研究所
 Production Engineering and Green Technology
 Laboratory, Manufacturing Innovation Div.