

ニューラルネットワークを利用した サーボプレスでのモーシヨンの高度化

地方独立行政法人 大阪府立産業技術総合研究所 加工成形科
主任研究員 白川 信彦
(平成 21 年度一般研究開発助成 AF-2009025)

キーワード：サーボプレス、ニューラルネットワーク、TZP 試験

1. 研究の目的と背景

サーボプレスは、従来のプレスでは実現できなかったスライドのフリーモーシヨン化を可能とするプレス機械として注目を集め、プレス加工業界ではその導入が急速に進んでいる^{1)~4)}。鍛圧機械メーカ各社は、独自のモーシヨン制御を組み込んだ装置をリリースしているが、実際のプレス成形品は寸法や形状、材質、成形時の変形様式が多岐にわたるため、その成形に最適なプレスモーシヨンの設定については各ユーザに委ねられているのが現状である。経験の少ないユーザがトライ&エラー的な方法でモーシヨンの設定に取り組めば、無駄な試し打ちに時間・コストがかかるばかりでなく、時には適正な設定を見出せない場合もある。このため、現実にはサーボプレスを十分に使いこなせていないユーザが意外と多い。

このような状況に対し、学協会が中心になってプレスモーシヨン制御の効果についての Know Why の解明に取り組んでおり、モーシヨン設定の考え方について理論的なアプローチが図られるものとして期待されている。しかしながら、多種多様な実際のプレス成形に対しては、個々の現象が相互作用を及ぼす可能性があり、物理モデルを構築してモーシヨン設定の考え方をまとめることは容易ではない。

ニューラルネットワーク (NNW)^{5)~8)}は、複雑な物理モデルの構築を必要とせず、入力値と出力値の組み合わせをいくつか準備することでシステムを構築すること

ができ、未知の入力条件に対する結果の予測が可能な手法である。NNW を用いて、プレス成形条件を入力値として成形結果を予測できれば、従来のトライ&エラー的手法と比較して条件設定の効率や正確性を大幅に上げることが可能であると考えられる。

本研究の目的は、多種多様なプレス成形品に応じたプレスモーシヨン設定の最適化を実現するための手法として、NNW を利用したアプローチの可能性を検証することである。各種の成形実験を学習データとして NNW を構築し、これを利用して未知の成形条件での結果を予測する。そして、得られた予測結果をもとに、良好な成形が実現できるプレスモーシヨン設定を決定する手法を開発する。

2. 研究の方法

プレス成形を対象にした NNW の構築に際して最も重要なポイントは、成形条件 (入力信号) から予測する結果 (出力信号) を何にするかということである。例えば深絞り成形の場合、図 1 に示すように、サーボプレスのモーシヨン設定や金型形状、被加工材材質などを入力信号として NNW を構築することが想定されるが、それに対する出力信号としては、パンチ肩近傍の最小板厚や限界絞り比 (LDR)⁹⁾ のような定量的に成形性を評価できるものであることが必要である。しかし、サーボプレスでは、成形中にスライドモーシヨンを変化することがで

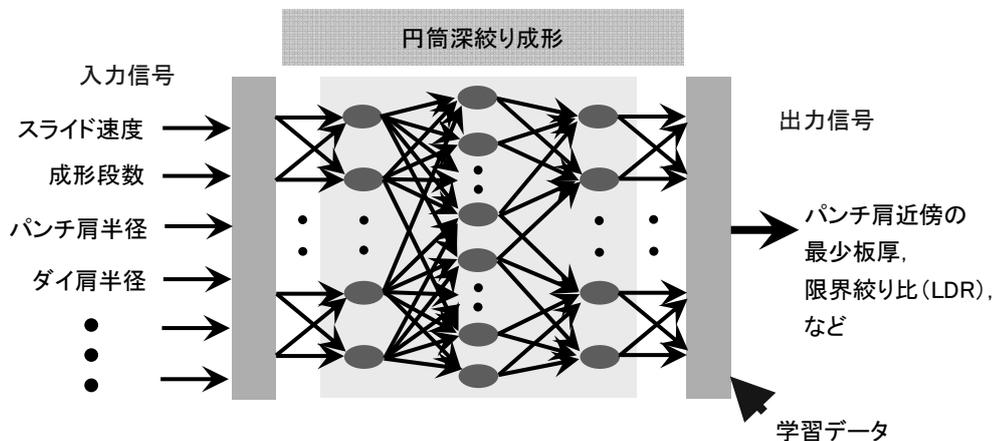


図1 サーボプレスによる深絞り成形を対象としたニューラルネットワークの例

きるため、従来の機械プレスで成形した場合と同じように LDR により評価ができるか疑問である¹⁰⁾。また評価が可能な場合でも、異なる径の素板を多数準備する必要がある、スライドモーションを広く評価することは困難である。また、成形品の板厚を直接測定する方法¹¹⁾も行われているが、無限ともいえるサーボプレスのスライドモーションを評価する上で、それぞれのスライドモーションに対して、成形品の板厚をすべて測定することは、非常に時間を要するため極めて困難である。

そこで本研究では、まず始めにサーボプレスのスライドモーションを定量的に評価できる試験法の検討を行った。具体的には、種々のスライドモーションの下で円筒深絞り実験を行い、LDR やパンチ肩近傍の最小板厚の測定がその評価に適用可能であるかを調べた後、より迅速で簡便な評価法の開発として、サーボモータ式のダイクッション（以下、サーボ D/C と称す）を活用した TZP 試験^{12), 13)}の開発に取り組み、得られた評価指標 T 値と LDR、パンチ肩近傍の最小板厚を比較することによって、その適用性を検証した。そして最後に、この評価指標 T 値を予測結果とする NNW を構築し、学習データによる予測値と実測値の検証、未知の条件に対する予測値と実測値の検証を行い、その適用性を検証した。

3. 深絞り成形における成形性評価指標の検討

3.1 実験方法

3.1.1 供試材料および実験装置

供試材料には公称板厚 1.0mm で、直径を 1.5mm ピッチで変化させた $\phi 117\text{mm} \sim 129\text{mm}$ の冷間圧延鋼板 (SPCC) を使用した。表 1 に JIS13B 号試験片による引張り試験結果を示す。深絞り成形においては潤滑油としてフォーマ油 (豊国石油製 MS-70、動粘度 $70\text{mm}^2/\text{s}$ (40°C)) を用い、素板の両面に塗布して実験を行った。

成形にはサーボ D/C を搭載した 2000kN リンク式 AC サーボプレス (コマツ産機機, H1F200) を用いた。工具には、SKD11 製の平頭パンチ (外径 60mm, 肩 $R=5\text{mm}$) とダイ (内径 62.5mm, 肩 $R=5\text{mm}$) を用い、パンチ側壁下部にひずみゲージを貼付して成形荷重を測定した。

成形ストロークは、素板径 $\phi 117\text{mm}$ の時に 38mm とし、以後、素板径が 1.5mm 大きくなるごとに 2mm 長くすることにした。これは、成形品のフランジ部の大きさが、いずれの素板径においてもほぼ一定になるように配慮したためである。また、成形中のしわ抑え力は 50kN 一定にした。

表 1 供試材料の機械的性質

塑性係数 / MPa	加工硬化指数 n	全伸び / %	引張強さ / MPa	r 値 (平均)	面内異方性
523	0.21	48	314	1.58	0.7

3.1.2 サーボプレスモーション

設定したスライドモーションを表 2 に示す。成形速度はリンクプレスにおける 50spm を 100% とした場合の比率で示してある。モーション I ~ III はスライドモーションを一定とし、リンクモーションの成形速度のみを変化させたものである。また、図 2 に示すように、モーション IV は全ストロークの 1/3 ごとにスライドをその位置で 0.5 秒停止させる中間停止成形、モーション V は全ストロークの 1/3 ごとに 5mm スライドを引き上げ、モーション VI は全ストロークの 1/5 ごとに 5mm 引き上げる等間隔ステップ成形である。

3.2 実験結果

3.2.1 板厚および限界絞り比 (LDR) の測定による成形性評価

各モーションで成形した成形品の板厚を、カップ頭部から肩部、側壁部にかけて測定した結果を図 3 に示す。なお、測定は素板径 $\phi 120\text{mm}$ のものを対象に、超音波厚さ計 (オリンパス製 MODEL35、探触子 M208-SM) およびポイントマイクロメータを用いて 1mm 間隔で測定した。図 3(a) より、成形品の肩部と側壁部の境界付近の板厚ひずみが最も大きくなる部分 (以降、最薄部と称す) では、成形速度が高いほど板厚ひずみが小さく、成形性が良いことがわかる。一方、図 3(b) より、中間停止成形 (モーション IV) や等間隔ステップ成形 (モーション V, VI) では、速度 50% のリンクモーション (モーション II) と比較して成形品頭部から最薄部にかけての板厚ひずみが大きく、特に、モーション IV では最薄部の板

表 2 設定したスライドモーション

Motion	Speed	Motion	Motion	Speed	Motion
I	80%	Fix	IV	50%	Stop twice
II	50%	Fix	V	50%	2 steps
III	20%	Fix	VI	50%	4 steps

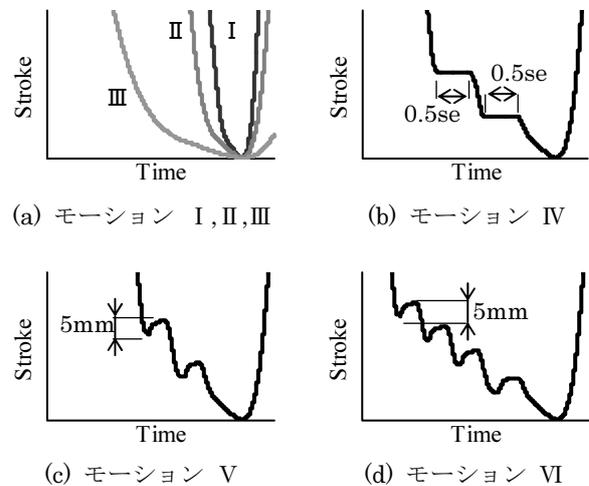
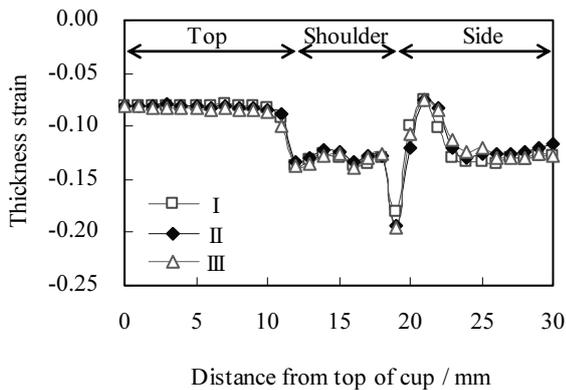


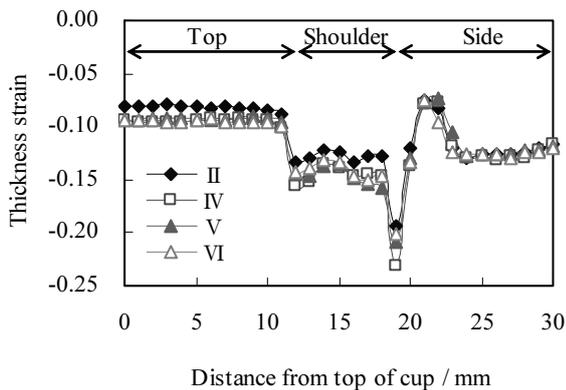
図 2 スライドモーション線図

厚減少が著しく、成形性が悪いことがわかった。

各モーションでのLDRを図4に示す。モーションI, IIおよびIIIでは、成形速度が高いほどLDRが上昇し、板厚ひずみの測定結果と同様の傾向を示した。また、モーションIVはLDRがきわめて低く、板厚ひずみの測定結果と同様の傾向であったが、モーションVおよびVIではLDRが比較的高く、板厚ひずみによる評価と合致しないことがわかった。



(a) スライド速度の影響



(b) スライドモーションの影響

図3 板厚ひずみ分布に及ぼす
スライド速度・モーションの影響

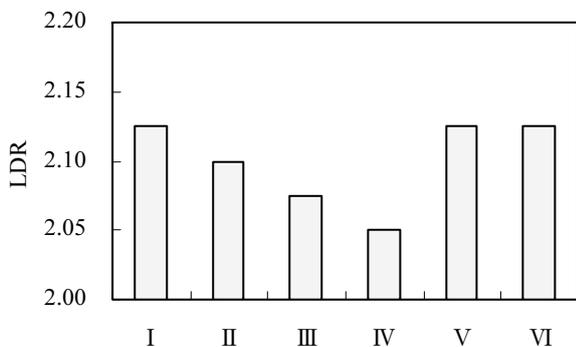
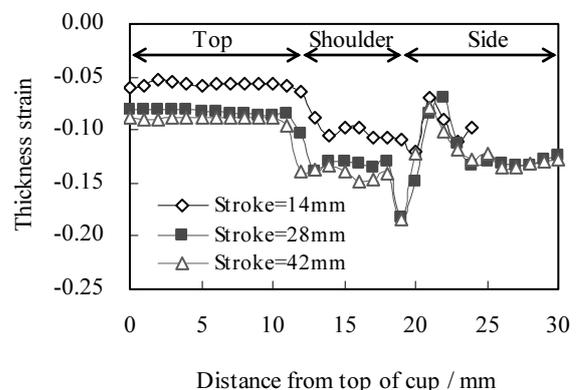


図4 限界絞り比に及ぼすスライドモーションの影響

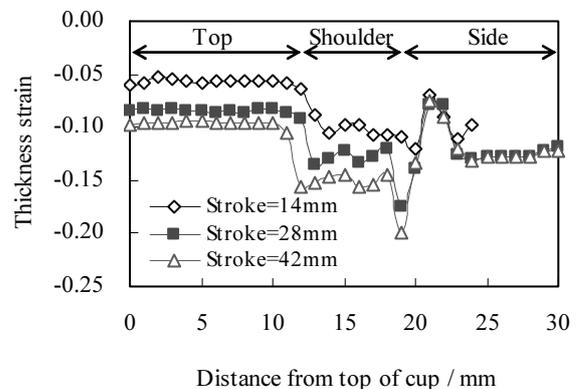
3.2.2 板厚およびLDRによる評価結果の差異とその考察

サーボプレス特有のモーションであるステップ成形（等間隔ステップ、モーションVおよびVI）では、板厚ひずみによる評価結果とLDRによる評価結果が異なる傾向になった。これらの原因を調べるため、成形中のパンチ荷重について検討したところ、等間隔2ステップのモーションVの場合、ストローク後半（ストローク28mm）のスライド引き上げ-再成形時に高い荷重（以降、ピーク荷重と称す）を示すことがわかった。

そこで、このときの成形品を成形途中で取り出して、板厚ひずみを測定した。結果を図5に示す¹⁴⁾。同図(a)より、リンクモーションではストローク28mmまでは成形が進行するにしたがって板厚ひずみが増大し、減肉したことがわかる。しかしそれ以降、成形完了（ストローク42mm）までは板厚ひずみはほとんど増大せず、減肉しなかった。それに対して、同図(b)より、ステップモーションでは成形開始から完了まで板厚ひずみが増大し続け、リンクモーションとは異なりストローク28mmから成形完了までの間も減肉したことがわかる。これは、ストローク28mmでのステップが成形性に悪影響を及ぼしていることが原因と考えられる。すなわち、ストローク後半のステップによって発現するピーク荷重が、成形



(a) リンクモーション



(b) ステップモーション

図5 成形の進行に伴う板厚ひずみ分布の変化

性に悪影響を及ぼしていると考えられる。

次に、モーションIIとモーションVにおいて、素板径を変化させた場合の最大成形荷重の変化を調べた。結果を図6に示す。素板径が大きい（絞り比の高い）場合には、両モーションの最大成形荷重の差異はほとんど認められなかった。これは、素板径が大きくなるほど、モーションVにおけるピーク荷重と通常のリックモーションにおける絞り加工時の成形荷重との差が小さくなるためと考えられる。一方、素板径が小さい（絞り比の低い）場合には、モーションIIに比べてモーションVの最大成形荷重が高いことがわかる。これは、ピーク荷重の発現によるものである。

3.3 サーボD/Cを用いた新しいTZP試験の提案¹⁵⁾

以上のように、サーボプレス特有のモーションを設定する場合、LDRの測定では実用上の絞り比での適正な評価ができないこと、評価には径の異なる素板を多数準備する必要があること、また板厚ひずみの測定は非常に手間がかかることより、これらの評価方法では難しいことが明らかになった。そこで、少量のサンプルで絞り性を迅速に評価できるTZP試験に着目して、サーボD/Cのしわ抑え力制御を用いることにより、試験に必要な一連の作業を一工程内で行える方法を考案した。

TZP試験は、成形中に素板の流入を拘束して強制的に素板を破断させることで、成形限界までどれほどの余裕があるかを調べ、成形性を評価する方法である。図7に示すように、絞り成形時の最大成形荷重 P_z を過ぎたところで成形を一旦停止し、その後、素板の流入を拘束（クランプ）して破断させることで破断荷重 P_{ab} を測定する。そして、破断荷重と最大成形荷重から式(1)で求められるT値の大小により絞り性を評価する。なお、T値が大きいことは、絞り性が良いことを意味する。一般的には、TZP試験は専用の試験機や材料試験機により専用の金型を用いて行われている。

$$T \text{ value} = \frac{P_{ab} - P_z}{P_{ab}} \times 100 \quad (\%) \quad (1)$$

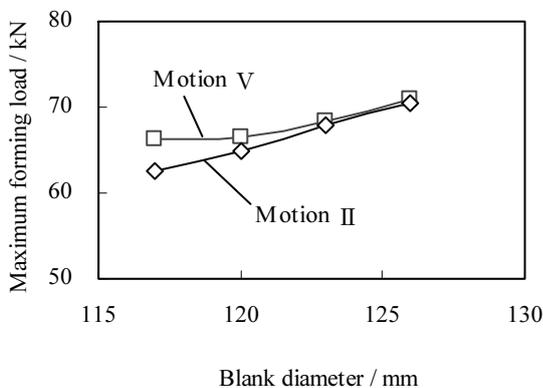


図6 最大成形荷重と素板径の関係

本研究では、モーションの設定とは関係なく成形中のスライド速度が時々刻々と変化し、加えてモーションの設定やそれに伴うサーボモータの加減速によってもスライド速度が変化するリック式サーボプレスを用いた。そこで、リック式サーボプレスのそれらの特徴がTZP試験の結果に及ぼす影響や成形中に十分なクランプが行えるかを判断するために、二種類の試験方法について検討を行った。一つは最大絞り荷重を過ぎた後に、サーボプレスのモーション制御によりスライドを一旦停止し、その後、サーボD/Cにより過大なしわ抑え力（200kN）を負荷してクランプし、5spm相当の低速スライド速度で素板を破断させる「Stop試験」、もう一つは、最大絞り荷重を過ぎた後、スライドの下降を継続しながらサーボD/C制御により素板をクランプし、破断させる「Non stop試験」である。

両試験において、板厚とT値の相関を検討するため、クランプせずに成形を完了した成形品の最薄部の板厚とT値の関係を調べた。結果を図8に示す。図から板厚が小さいほど、概ねT値が小さい傾向を示すことがわかる。また条件I～IIIについては、スライド速度が低い条件ほど板厚は小さかった。Non Stop試験ではスライド速度が低いほどT値が低下し板厚との相関が認められるが、Stop試験ではスライド速度が低速になるとT値が上昇し、相関が認められなかった。

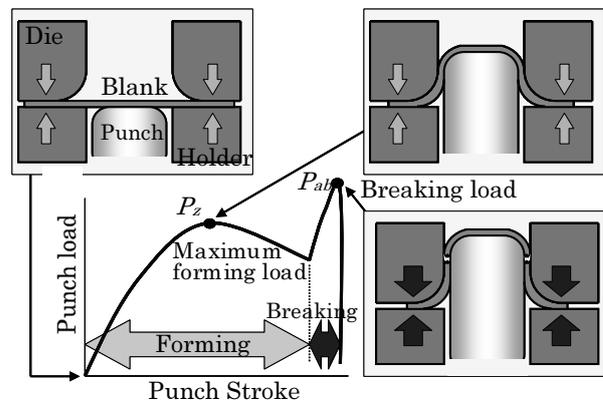


図7 TZP試験と荷重曲線

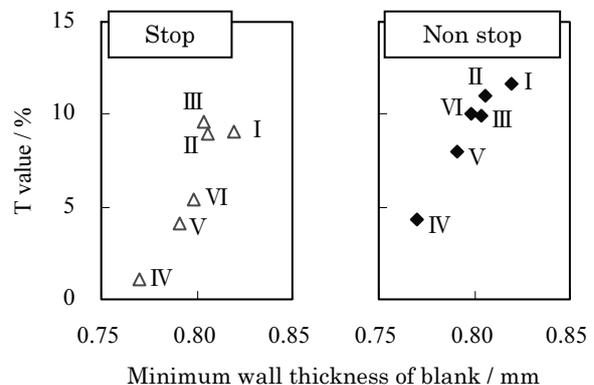
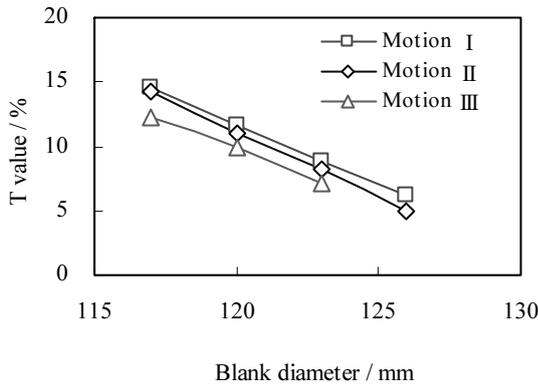


図8 T値と最小板厚の関係（素板径φ120の場合）

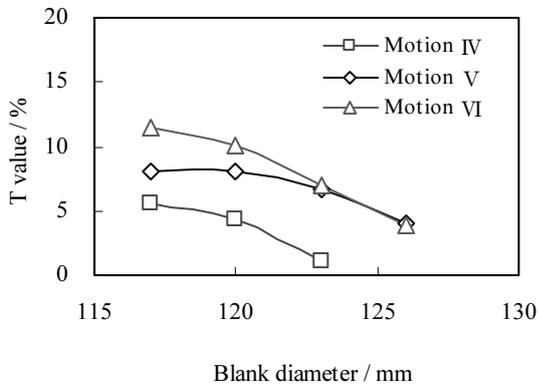
以上のことより、サーボプレスによる深絞り成形の絞り性を正しく評価するには、成形時のスライド速度設定値に破断時のスライド速度設定値を合わせ、クランプ時にスライドを停止しない Non stop TZP 試験が良いと考えられる。

3.4 TZP 試験によるサーボプレスモーションの評価¹⁰⁾

3.2 節で述べたとおり、板厚ひずみと LDR の測定による成形性の評価は、板厚ひずみの測定に用いた素板径により傾向が異なった。そこでまず、素板径により成形性がどのように変化するかを調べるため、各スライドモーションで素板径を変化させた TZP 試験を行い、成形性を評価した。結果を図 9 に示す。同図(a)より、モーションが一定の条件では、T 値は素板径が大きくなるほど直線的に低下し、試験機で行う従来の TZP 試験と同様の傾向を示す¹⁶⁾ことがわかる。一方、同図(b)より、中間停止成形と等間隔ステップ成形では T 値は直線的に低下せず、素板径が小さい範囲 ($\phi 117\text{mm} \sim 120\text{mm}$) では T 値の変化が緩やかであることがわかる。すなわち、中間停止成形と等間隔ステップ成形では、素板径が小さい場合でも T 値があまり上昇しない。このことから、本報で設定したモーション IV ~ VI といった中間停止や等間隔ステッ



(a) リンクモーション (速度のみ変化)



(b) 中間停止およびステップモーション

図 9 各スライドモーションにおける T 値と素板径の関係

プモーションは、素板径が小さい場合に成形性に悪影響を及ぼしていると思われる。

種々の素板径での T 値と LDR の関係をまとめると図 10 のようになる。等間隔ステップ成形 (モーション V, VI) の LDR はモーション I と同程度の高い値を示しているが、T 値では素板径が大きいほど同様の傾向を示すことがわかった。しかし、実際のプレス成形においては、絞り限界に近い状況で絞り加工を行なうことはなく、実用上は絞り比の小さい成形を行っている。そのため、従来からよく行われている LDR の測定ではスライドモーションの効果を過大に評価する可能性があり、本報で提案した TZP 試験が有効であると思われる。

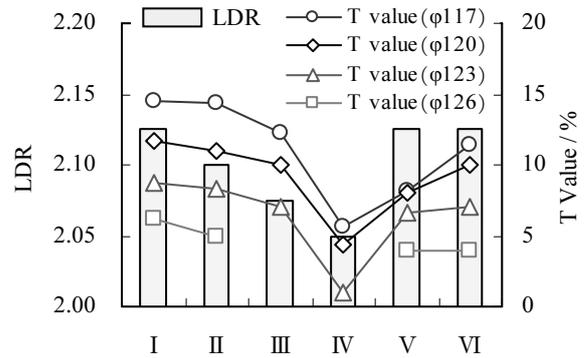


図 10 各スライドモーションにおける種々の素板径での T 値と LDR の関係

4. ニューラルネットワークを利用した成形性予測

4.1 ニューラルネットワークの構築

以上のように、サーボプレスのモーション制御を適用した深絞り成形において、TZP 試験から得られる T 値は、そのモーションを評価する指標として、最も有用であることがわかった。そこで、この T 値を出力信号とする NNW を構築することにした。入力信号としては、スライド速度 (50spm を 100% としたときの % 表示)、絞り比、ステップ加工時のステップ位置 (成形全ストロークを 100% としたときのストローク位置の % 表示)、ストップの有無 (ステップ位置で停止するときは「1」、停止しないときは「0」) の 5 つを採用し、中間層のデータ数を 10 とする三層構造の NNW を構築した。学習データとしては、上記の 5 つの入力を種々変更した 38 種の成形条件を採用し、できるだけ誤差が小さくなるように、学習回数や学習率を調整して NNW を完成させた。

4.2 ニューラルネットワークによる予測値の検証

学習に使用した全てのデータにおいて、NNW による T 値の予測値と実測値を比較した結果を図 11 に示す。図から、両者の変化の傾向は良い一致を示していることがわかる。次に、学習データに使用していない未知の条件

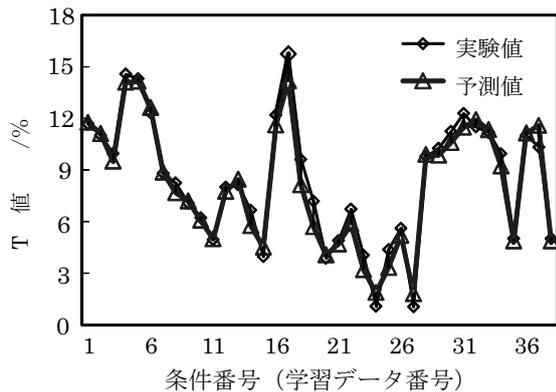


図11 NNWによる予測値と実測値の比較

表3 未知の条件に対する NNW の予測値の評価

入力条件	実測値と予測値
・スライド速度50% ・絞り比2.0 ・ステップ1回 (ストローク24mm) ・ストップなし	T値の実測値 7.44
	NNWによる予測値 6.45
・スライド速度50% ・絞り比2.0 ・ステップ2回 (ストローク3mm, 15mm) ・ストップなし	T値の実測値 10.33
	NNWによる予測値 11.58

を入力データとして NNW を用いて T 値を算出し、同じ条件で実際に TZP 試験を行って求めた T 値と比較した結果を表 3 に示す。未知の条件に対する予測においてはやや差異がみられたが、傾向的に近い値を算出することができている。NNW においては、学習データをさらに充実させていくことでその予測精度を上げることが可能であり、今後も成形実験 (TZP 試験) を繰り返していくことで精度を向上させることが必要である。

5. 結言

深絞り加工を対象に、サーボプレスのスライドモーションを定量的に評価する指標として、パンチ肩近傍の最小板厚と LDR について検討したところ、中間停止成形や等間隔ステップ成形といったサーボプレス特有のスライドモーションにおいて、両者の評価傾向が異なることがわかった。そこで、より簡便かつ迅速に評価できる試験法としてサーボ D/C を活用した TZP 試験法を開発し、得られた T 値でスライドモーションの評価を行ったところ、パンチ肩近傍の最小板厚の変化の傾向とも良い一致

を示し、T 値で評価可能であることを明らかにした。

最後に、この評価指標 T 値を予測結果とする NNW を構築し、学習データによる予測値と実測値の検証、未知の条件に対する予測値と実測値の検証を行ったところ、両者は良い一致を示すことがわかった。すなわち、未知の成形条件での予測結果をもとに、最適なスライドモーションの選定ができることを明らかにした。

謝 辞

本研究は、天田金属加工機械技術振興財団平成 21 年度一般研究開発助成 (AF-2009025) により実施したものであり、ここに感謝の意を表します。また、深絞り実験およびニューラルネットワークの構築にあたり多大なご協力をいただいた地方独立行政法人大阪府立産業技術総合研究所の四宮徳章氏に謝意を表します。

参考文献

- 1) 西村尚：プレス技術，48-11(2010)，18-23.
- 2) 玉井良清・山崎雄司・吉武明英・井村隆昭：塑性と加工，51-592(2010)，450-454.
- 3) 菅沼俊治：プレス技術，48-11(2010)，40-43.
- 4) 坂口稔：塑性と加工，49-565(2008)，110-113.
- 5) 古川知成・矢川元基：塑性と加工，40-459(1999)，322-325.
- 6) 矢川元基編：ニューラルネットワーク，培風館.
- 7) 合原一幸：ニューラルコンピュータ 脳と神経に学ぶ，(1988)，56，東京電気大出版社.
- 8) 桐谷滋：入門と実習ニューロコンピュータ，(1991)，223，技術評論社.
- 9) 例えば，真鍋健一・浜野秀光・西村尚：塑性と加工，29-330(1988)，740-747.
- 10) 白川信彦・四宮徳章，第 62 回塑性加工連合講演会講演論文集(2011)，107-108.
- 11) 例えば，森謙一郎・西島進之助・Chin, J. T.，塑性と加工，50-576(2009)，64-68.
- 12) 佐伯邦男・木下滋：塑性と加工，5-37(1964)，125-131.
- 13) 九蘭芳雄：塑性と加工，5-37(1964)，172-174.
- 14) 四宮徳章・白川信彦，第 62 回塑性加工連合講演会講演論文集(2011)，109-110.
- 15) 四宮徳章・白川信彦，平成 23 年度塑性加工春季講演会講演論文集(2011)，343-344.
- 16) 薄鋼板成形技術研究会：プレス成形難易ハンドブック，(2007)，112-113，日刊工業新聞社.