

# 加工熱処理を適用した温間深絞り加工法の開発

奈良工業高等専門学校 機械工学科

教授 関口秀夫

(平成3年度研究開発助成 AF-91017)

## 1. 研究の背景と目的

金属薄板の深絞り加工において熱を利用して成形限界を向上させる研究は数多くなされている。たとえば、フランジ部の加熱とポンチの強制冷却を併用することにより絞り比が著しく向上することが報告されて以来<sup>1)</sup>、薄鋼板の局部加熱による成形限界の向上<sup>2)</sup>や、フランジ部を焼きなましたり、あるいはブランク中央部を焼入れなどによって強化する方法<sup>3)</sup>などの試みがなされている。いずれも良好な結果が得られているが、温度制御をさらに積極的かつ合理的に行えば、成形性の向上に加えて製品の材質改善や複雑形状製品の成形も可能になると考えられる。

そこで本研究では、

- (1) 板面内温度場の制御が行える温間深絞り加工装置 (用量30 tonfの油圧プレスパーソナルコンピュータを用いてその速度を任意に設定できるようにするとともに、電気通電加熱および高周波誘導加熱が可能になるような温間ホーマのプロトタイプ) を試作するとともに、
- (2) 加工限界の向上と材質改善を行うため、加工熱処理を適用した新しい温間深絞り加工法についての検討を行う。

## 2. 研究方法と成果

### 2.1 電気油圧サーボによるプレス速度の制御

#### (1) 油圧サーボプレスの概要

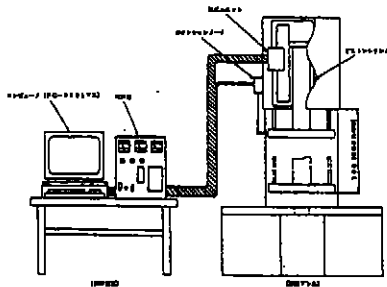


図1 油圧サーボプレス装置図

図1にサーボプレスの油圧回路図を示す。汎用油圧プレスの回路に比例制御弁を取り付け、油圧シリンダの速度や圧力を可変できるように改造した。比例制御弁は制御回路を通してコンピュータで制御する。また、油圧プレスの本体と可動するラムの間には位置検出器(ポテンシオメータ)が取り付けられており、油圧シリンダのラム変位量の信号をフィードバックしている。

#### (2) 油圧サーボプレスの動特性

図2は、設定速度と移動距離1mm当たりの誤差との関係を示したものである。深絞り加工での実際の加工速度は、

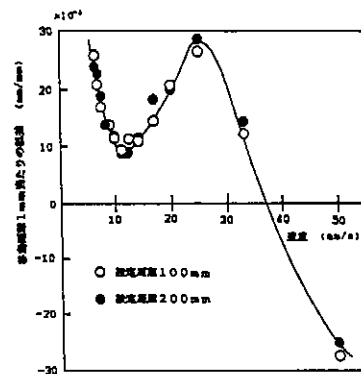


図2 設定速度による誤差曲線

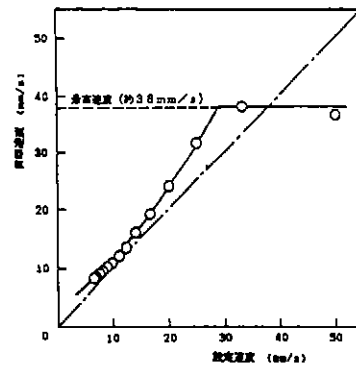


図3 設定速度と実際速度の関係

10 mm/s以下であるが、その範囲での速度ではかなり大きな誤差となることが判る。

設定速度とラムの実際速度との関係を図3に示す。この図をみると、どの部分でも設定速度よりも早い速度で油圧シリンダが動いていることが判り、下降最適速度は38 mm/sであることが判った。そこで、これらのサーボソフトウエアの改善を行うことにした。位置決め誤差が大きい原因は比例制御弁ポートが完全な比例ポートとなっていないためである。コンピュータから送られる速度信号に対して実際にどのような速度が得られるのかを調べた結果、速度信号が小さいときには、一次式で表すことができないことが判った。そのため、非直線部分のデータから最小自乗法で回帰曲線を求め、プログラム内に組み込んだ。

その結果、設定速度と実際速度とは、図4に示すようにほぼ一致することが確かめられた。なお、上昇時についても同じようにして移動の精度を上げてある。さらに、制御方式が時間制御であること、操作性の悪さおよびデータの保存・再生ができないこと、などの問題点についても改善を行った。最終的には、①データ変更したいときには、どのデータも入力できること、②設定できる項目に速度を追加し、時間または速度制御が選択できること、③圧力設定などをデータ入力画面から呼び出させること、④油圧プレスのラム移動を入力画面からキーボードの ROOL UP, ROOL DOWN キーで行えること、⑤シーケンスファイルによるデータの保存・再生機能の追加等の諸点を実現することができるようになり、高応答の速度制御が可能となった。なお、本加工装置は深絞り加工のみならず、種々の加工（プレス成形、鍛造など）に際しても利用することができる。また、将来の高性能温間加工ホーマ開発の基礎データの収集にも役立たせることができる。

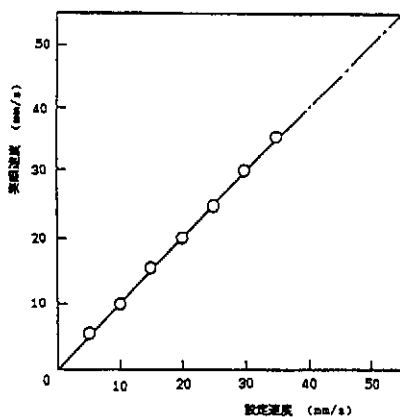


図4 設定速度と実際速度の関係 (改善後)

## 2.2 温間深絞り加工装置の試作

### (1) 深絞り加工装置

図5に、円筒深絞り装置を示す。

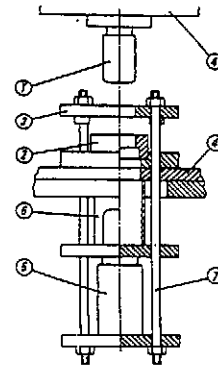


図5 円筒深絞り装置

これはポンチ①、ダイス②、しわ押さえ③、ダイセット④、油圧ジャッキ⑤、受け筒⑥、ロッド⑦から構成されている。まず、円形ブランクをダイス②としわ押さえ③の間にセッティングする。油圧ジャッキ⑤のラム部を上昇させ、ブランクにしわ押さえ力がかかる。このときしわ押さえ③はロッド⑦に固定してあり、油圧ジャッキ⑤のラム部を上昇させることにより、しわ押さえ③がロッド⑦と連動して降下する。油圧サーボプレスを起動させ、ポンチ①を降下させることによって、深絞り加工を行うことができる。

### (2) 電気通電加熱方式

ダイス（内径30 mm）およびしわ押さえには、銅製の電極をとりつけ、電流の流れる方向は板厚方向とした。加熱用電源としては、70 KVA のスポット溶接機のトランスを用いた。また、銅製電極には、冷却用水が流れるように溝をきってある。

加熱装置の電気特性を調べるために電流計、電圧計を配置した。1次側回路には電圧を調整できるレギュレータを設け、また、2次側回路にはシャント抵抗を取り付けた。これは、加熱電流（2次側電流）の値が数千アンペアという非常に大きな値になり、電流計を接続して測定することは不可能であるため、抵抗値の判っているシャント抵抗を接続し、その間の電圧降下量を測定することから電流値を知ることにした。

1次側電圧と2次側電流の関係ならびに1次側電圧と2次側出力電圧の関係を測定したが、いずれも直線関係にあることが確かめられた。さらには、1次側電圧に対する電力比の関係1次側電圧と2次側全体のインピーダンスの関係、サイリスタ制御装置による電流制御の方法（図6）等について調査した。

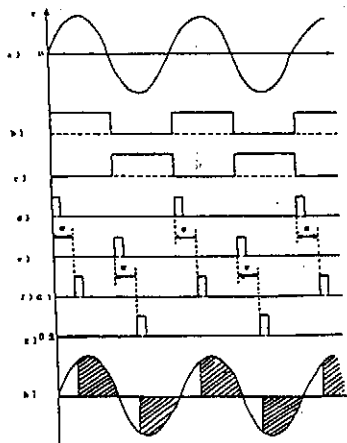


図6 サイリスタ制御装置による電流制御の方法

以上のことから、通電加熱方式による本装置の特性を明らかにすることができた。しかし、温間深絞り加工に必要な温度上昇(300~700℃)を達成するためには、さらに大きな電源(現有設備70KVA)を必要とする。しかし、これらの研究結果は将来の工業的利用に際しては有効なデータとなり得る。

(3) 高周波誘導加熱方式

新たに高周波誘導加熱による温間深絞り装置を試作した。加工装置は前節(2.2(1))に述べたものと基本的に同じであるが、ポンチ内部に冷却水が流れるように改良をすること、しわ押さえは加熱コイルを兼ねているので形状に工夫すること、さらにブランクと加熱コイルおよびダイスの間に絶縁が必要なこと等に留意した。高周波誘導加熱の利点は、①加熱効率が良い、②トランスの出力や加熱時間を調節することにより、ブランク部の温度を自由に設定できること、③急加熱が可能であること等である。本研究で用いた真空管式高周波誘導加熱装置は、周波数400KHz、最大出力10KWのものである。

図7に、③ダイス形状と④しわ押さえ(加熱コイル)形状のスケッチ図を示す。

ブランクが薄い(0.8mm)場合、ダイス表面にも二次(渦)電流が流れるので、加熱効率が悪くなる。そのため、ダイスの一部に切り込みを入れた。ダイス内径32.15mm、コイル内径44mm、同外径135mm、であり、図8⑤に示す位置でのブランクの各部の温度分布を熱電対により測定した。

図9に、加熱コイルのみの場合と、装置に組み込んだ場合の温度変化の例を示す。また、図10に加熱時間60secの場合の温度分布の例を示してあるが、サーモクレオンを利用してブランク面上での温度分布を計測した場合と、熱電対による測定結果とは良い対応を示している。

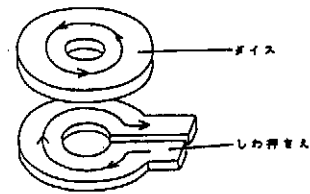


図7 ダイスとしわ押さえの形状

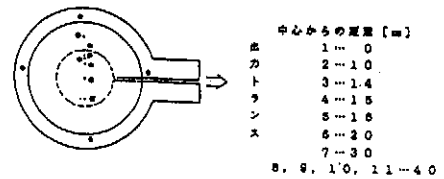


図8 測定点

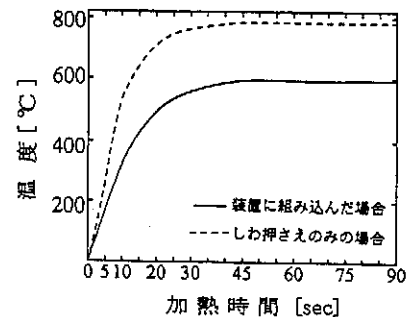


図9 各測定点における温度の時間的变化(フランジ部での一例)

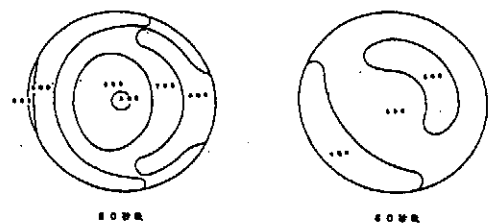


図10 60秒後の温度分布

2.3 温間ホームによる深絞り実験

2.1で試作したサーボプレスと、2.2(1)および(3)で示した高周波誘導加熱による温間深絞り装置を組み合わせたものを温間ホームと呼ぶ。このホームを用いて温間における深絞り加工実験を行った。

供試材はSPC材であり、ブランクは厚さ0.8mm、直径60、70、75、80mmのものを準備した。冷間における加工限界は70mmであり、LDRは約2.0~2.3である。加熱時間60secで温間ホーマによる深絞り実験を行った場合（この場合ブランクの平均温度約600℃）、直径75mmのブランクの成形が可能である。LDRとしては約2.8であり、加熱の効果が認められた。

以上のことから、試作した温間ホーマは十分な精度で温度制御ならびに加工速度制御を行い得ることが判った。

## 2.4 加工熱処理を適用した温間深絞り加工

### (1) 焼もどし温間加工

図11に、温間深絞り適用した加工熱処理の方法を示す。ブランクをあらかじめ焼入れておき、成形時にフランジ部のみを焼もどし温度(400~600℃)まで急加熱し、約1min間その温度に保持した後、深絞りを行う。ブランク中央のポンチ接触部は加熱されず焼き入れ組織のままであるので、成形初期の段階でブランク中央で割れが発生する。そこで実験においてはあらかじめ300℃×1minの予備焼き戻しを行った。

実験に用いた材料はS25CおよびS45C炭素鋼であり、板厚は1.0mmとした。焼入れ処理は、S25Cについては880℃から水冷、S45Cは850℃油冷とした。焼もどし温間加工との比較のため、焼なましを施したブランクも準備した。深絞りにおける成形限界(LDR)は、工具と材料面の摩擦力を無視すると、成形中の容器側壁部の変形抵抗 $\delta_w$ とフランジ部の変形抵抗 $\delta_r$ の比のみによって決まり、次式で求められる<sup>4)</sup>

$$LDR = \exp(\delta_w / \delta_r) \quad (1)$$

そこで、加工熱処理を適用した場合の成形限界を予測するため、焼もどしの過程に相当する温間領域での引張り強さを求めた。図12に、(a)S25Cおよび(b)S45C炭素鋼の400~600℃の温度範囲における引張り強さを示す。焼き入れた試験片を通電加熱<sup>5)</sup>により3min間焼もどした後、引張り試験を行った。S25CおよびS45C炭素鋼の引張り強さは、いずれの場合も加熱温度が高くなるほど小さな値を示してお

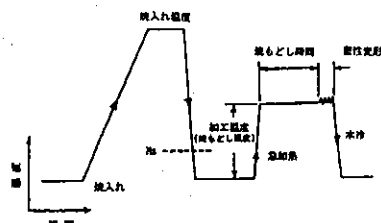
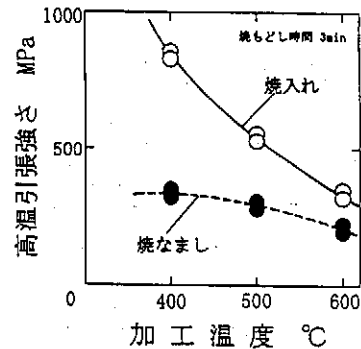
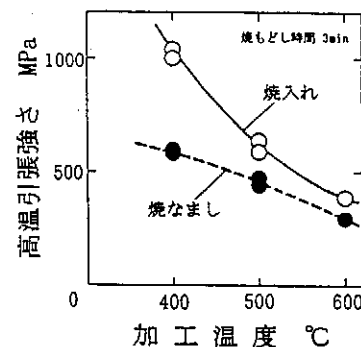


図11 焼きもどし温間加工法



(a) S25Cの高温引張強さ



(b) S45Cの高温引張強さ

図12 炭素鋼の高温引張り強さ

り、600℃の加熱温度では焼なまし材の引張り強さとほぼ同程度である。変形抵抗 $\delta_w$ および $\delta_r$ は、図12の結果を用いて式(1)によりLDRを計算した。(ここではポンチ接触部とフランジ部との温度差を200℃とした。)その結果、フランジ部の加熱温度が600℃の場合の焼き入れ材の成形限界は、 $LDR_{(S25C)} \approx 6.8$ 、 $LDR_{(S45C)} \approx 7.2$ ときわめて大きな値となった。これはダイスやしわ押さえとブランク間の摩擦力を考慮していないためであり、実際にはこれらの値をかなり下まわるものと考えられる。しかし、焼なまし材の計算による成形限界が、600℃において $LDR_{(S25C)} = 3.3$ 、 $LDR_{(S45C)} = 3.8$ であることを考えると、焼入れ材の成形限界は、焼なまし材のそれに比べて約2倍の値となり、加工熱処理の適用が成形限界の向上に有効であることが予想される。

### (2) 温間深絞り加工実験

図13は、実際に温間深絞りを行ったときの成形限界を示したものである。ブランクのフランジ部を高周波誘導加熱により3min間加熱した後、ポンチの押込み速度を35mm/sとして成形を行った。S25CおよびS45Cのいずれの焼き入れ材

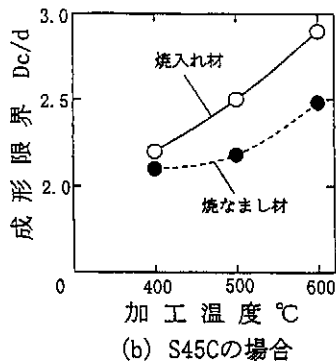
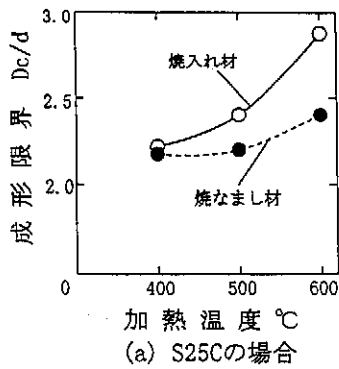


図13 加工温度と成形限界の関係

の場合も加熱温度が高くなるほど成形限界が向上しており、600°Cでは $LDR_{(S25C)} = 2.9$ 、 $LDR_{(S45C)} = 3.0$ の値を示している。焼なまし材との比較においては、400°Cでほぼ同じ成形限界であったものが、600°Cでは約20%向上することがわかる。また、町田らによるフランジ部加熱軟化による深絞り（SPHC材、黒鉛潤滑、フランジ部の温度650~750°C）によると、成形限界として $LDR=2.84$ の値が得られたとの報告<sup>3)</sup>がある。本実験で得られた成形限界値は、町田らが行った軟鋼板のフランジ部加熱法での成形限界値よりも大きいものの、その差は僅かである。また、計算で予測された焼なまし材の2倍という成形限界値より小さな値を示し、加工熱処理の適用の有効性が顕著に現れなかった。このことは、本実験では無潤滑下での成形であるためと考えられ、適切な潤滑を施せば成形限界はさらに向上するものと考えられる。

### (3) 温間深絞り製品の材質

前節では、焼もどし温間深絞りについて加工限界の観点からのみ論じてきたが、本研究で適用した加工熱処理法では、材質改善にとってきわめて有効な手法といえる。<sup>4)</sup>

図14は、焼もどし温間加工材（S45C）の残留延性を示した

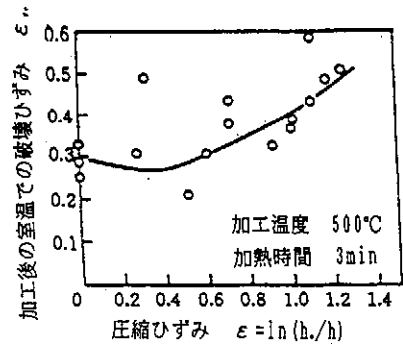


図14 焼もどし温間加工材の延性

ものである。加工温度が500°Cの場合、焼もどし温間加工材の室温における残留延性は加工度が大きくなるほど大きくなり、とくにひずみが0.6を越えると延性は急激に増加する。これは加工熱処理中の組織変化が延性向上に寄与しているからである。

このように焼もどし温間加工を深絞りに適用することにより材質の改善も図ることができ、高強度・高じん性の容器の製造が可能となる。

### 3. おわりに

(1) 通常の油圧プレスを改造し、パーソナルコンピュータを用いてラム速度の制御を可能とすることができた。このことは温度制御を必要とする温間深絞り加工においてはきわめて重要なことであり、他の温間板成形や温間鍛造などにも役立たせることができる。

(2) 温間深絞り加工装置の加熱方法として、電気通電加熱方式と高周波誘導加熱方式を検討し、種々の特性を明らかにし、有用性を確かめた。

(3) さらには加工熱処理を適用した炭素鋼板の温間深絞り加工実験を行い、加工限界の向上と製品材質の改善の効果を確かめた。

### 参考文献

- 1) 宮川：日本機械学会誌、62-484(1959),713.
- 2) 町田、中川：塑性と加工、16-169(1975),148.
- 3) 町田、中川：同上、16-171(1975),291.
- 4) B. Dodd：Ductile Fracture and Ductility
- 5) 小島、関口：奈良高専研究紀要、16(1980),9.
- 6) 小島、関口：塑性と加工、24-271(1983),873.