

超高張力鋼板の温・熱間プレス成形法の開発

研究代表者 豊橋技術科学大学生産システム工学系 教授 森謙一郎

1. 緒言

自動車の燃費向上を目的として自動車の軽量化が望まれており、高張力鋼板の自動車部品への利用が急増しており、超高張力鋼板も適用されつつある^{1), 2)}。超高張力鋼板は衝突安全性を向上するために自動車ボディの骨格部材に使用されるようになってきているが、冷間プレス成形では加工荷重・スプリングバックの増大、成形性・金型寿命の低下、遅れ破壊などが問題となっている。特に、1.2GPa以上の超高張力鋼成形品の加工法はまだ確立されていないのが現状である。

熱間プレス成形では、鋼板を加熱することによって、成形荷重を大幅に減少させ、スプリングバックをほとんどなくし、成形性を向上させるだけでなく、金型で急冷して焼入れを行うダイクエンチ効果も得られる^{3), 4)}。ダイクエンチでは、900°C程度に加熱してオーステナイト組織にした鋼板をプレス成形し、下死点で保持することによって金型で急冷して硬いマルテンサイト組織にするものであり、1.5GPa程度の引張強さを有する超高張力成形品が得られる。成形中は柔らかく、成形後は非常に硬い製品が得られ、理想的な成形法であり、自動車用部材に適用されている。ダイクエンチ用鋼板は焼入れ性を向上させるためにボロンを微量添加しており、炭素量は0.2%程度である。森ら⁵⁾は通電加熱を用いた熱間プレス成形を提案しており、大型である加熱炉が必要でなくなり、急速加熱できるため表面酸化が少なく、プレス作業との同期も容易である。

熱間プレス成形では、一般に高温炉によって鋼板を加熱しているが、板材を炉から出してプレス成形するまでに5s程度かかり、高温状態で空気に触れるため、板材表面が酸化する。したがって、熱間プレス成形品の精度は高くなく、成形後スケール除去のためにショットブラスト処理が必要になっている。スケール処理を省略するために、亜鉛またはアルミめっき処理をした鋼板が実用化されているが、めっきが残存すると寸法精度、耐摩耗性が低下し、鋼板の価格も高い。森ら^{6), 7)}は温熱間プレス成形用潤滑剤を鋼板に塗布することによって表面酸化を防止している。

ダイクエンチされた熱間プレス成形品では、通常全体が高強度化するが、局部だけを高強度にしたいものもある。たとえば、摺動部品では接触部付近だけ高強度が必要であるが、それ以外の部分は高強度を必要としなくじん性を持たせるために反対に焼入れを防止したい。また、ダイクエンチされた成形品は高強度であるため、トリミングや穴抜きなどの後加工をせん断で行うのは困難であり、通常レーザ切断されているが、レーザ切断は生産性が低い。トリミングや穴抜き加工を行った素板を熱間プレス成形すると後加工が省略できると考えられるが、製品精度上熱間プレス成形品に対して後加工を行うことが必要になっている。森ら⁸⁾は超高張力鋼板の通電加熱を用いた温・熱間せん断加工法を提案しており、せん断荷重が大幅に低下するだけでなく、高品位な切口面が得られる。

トランスミッションなどの歯形部品は冷間鍛造で成形されていたが、板鍛造を適用して板材から成形されるようになってきている。板材を絞って円筒容器に成形した後、しごき加工によって側壁をスプライン成形して歯形部品が製造されている⁹⁾。板鍛造によって成形される歯形部品も高張力鋼板を適用して軽量化を図ることが望まれているが、スプライン成形ではきびしい変形を加えるため、強度が大きい高張力鋼板を適用することは容易ではない。成形荷重を減少させて延性を向上するために、温・熱間プレス成形が検討されているが、絞られた容器を高温炉で加熱すると、温度低下と表面酸化が問題となり、加熱方法を検討する必要がある。

本研究では、超高張力鋼板の温・熱間プレス成形法を開発した。まず、高温炉を用いた熱間プレス成形において、ダイクエンチ用鋼板にプレコートスケール抑制剤を塗布することによって表面酸化を低減した。つぎに、金型に溝を付けて成形品を金型と局部接触させて局部だけを急冷する熱間プレス成形法を開発して、強度分布を有す超高張力鋼成形品を製造した。さらに、円筒容器側壁を通電加熱する高張力鋼板の温・熱間スプライン成形を開発した。

2. 鋼板の熱間プレス成形におけるプレコートスケール抑制剤による酸化防止

2.1 実験方法

加熱した鋼板をプレス成形なしで自然冷却して、スケールがどの程度板材に発生するかを調べた。板厚 1.2mm のダイクエンチ用鋼板(住友金属工業㈱製スミクエンチ, C: 0.21%, Si: 0.25%, Mn: 1.2%)を実験に用いた。高温引張試験から得られた引張強さおよび全伸びと温度の関係を **Fig. 1** に示す。温度とともに、引張強さは減少して全伸びは増加するが、900℃ 以上では酸化の程度が大きくなって全伸びは減少する。800℃ の引張強さは常温の約 1/8 であり、プレス成形における荷重もこの割合で低下する。

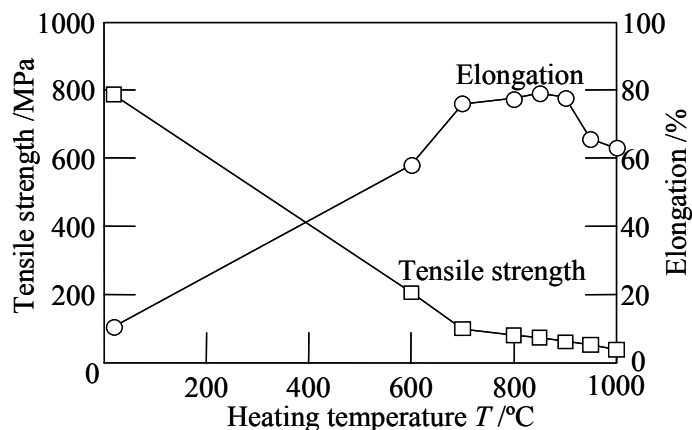


Fig. 1 高温引張試験から得られたダイクエンチ用鋼板の引張強さおよび全伸びと温度の関係

Table 1 酸化防止用プレコートスケール抑制剤

Oxidation preventive oil	A	B
Element	K, B, C, Na	K, B, C, Na, P, Ca

Table 1 に示す 2 種類のプレコートスケール抑制剤(日本工作油㈱製)について試験を行った。どちらのスケール抑制剤も高温で液化皮膜を形成し、空気との接触を防止して酸化抑制効果を有している。スケール抑制剤 A はステンレス温間加工潤滑油であり、急速通電加熱においては最も高い抑制効果を示した。今回新たにチタン材の温間絞り加工用潤滑剤であるスケール抑制剤 B も評価した。

スケール抑制剤の塗布方法を **Fig. 2** に示す。長さ 130mm, 幅 20mm, 板厚 1.2mm の長方形試験片を使用した。試験片を超音波洗浄後乾燥させ、その後スポンジを使ってスケール抑制剤を塗布して再び乾燥させる。スケール抑制剤は水溶性であり、塗布後乾燥させると素板表面に皮膜を形成する。予め加熱した電気炉内に鋼板を入れることによって加熱し、加熱完了後に炉から鋼板を取り出し自然冷却した。

熱間ハット曲げ加工実験に用いた装置を **Fig. 3** に示す。電気炉で加熱した後 5s で金型内へ搬送してハット曲げ加工を行い、下死点において保持時間 $t=2, 3.5, 5$ s で急冷した。現状の熱間プレス成形においても搬送時間は 5s 程度である。成形体の表面性状、転写精度、硬さ、粗さを測定した。

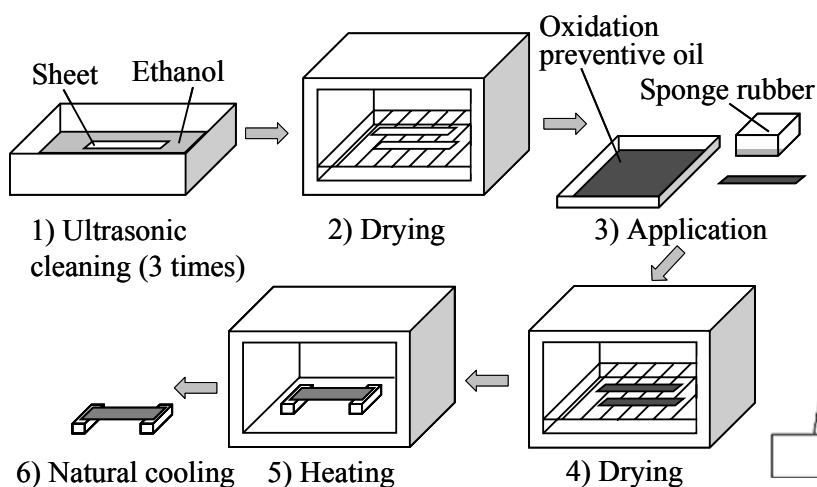


Fig. 2 スケール抑制剤の塗布方法

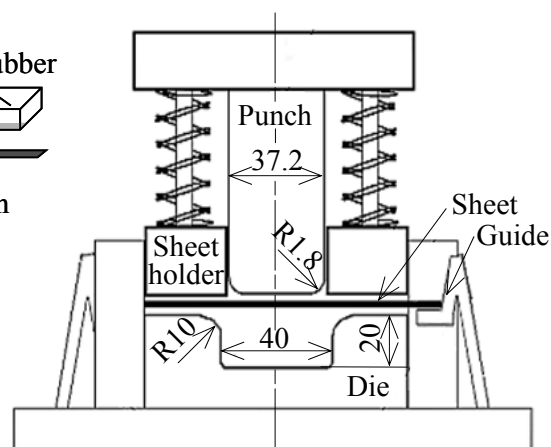


Fig. 3 熱間ハット曲げ加工実験に用いた装置

2.2 ハット曲げ加工の実験結果

下死点保持時間 $t=3.5s$ における熱間ハット曲げ加工された成形体を **Fig. 4** に示す. 塗布回数 $n=1$ の場合, $T=850^{\circ}C$ 以上では鋼板表面全体で表面層がはく離しており, $n=2$ でははく離は少なくなり, $T=850^{\circ}C$, $n=3$ でははく離が観察されない. 一方, $n=3$ では $T=900^{\circ}C$ おいてダイス角部など変形が大きい部分においてだけ少しのはく離が生じている.

$n=1$, $t=3.5s$ における熱間ハット曲げ成形体の側面写真を **Fig. 5** に示す. 冷間曲げ加工された成形体では, 大きなスプリングバックを生じているが, 加熱温度の増加とともにスプリングバックは減少し, $T=700^{\circ}C$ 以上ではスプリングバックは観察されない.

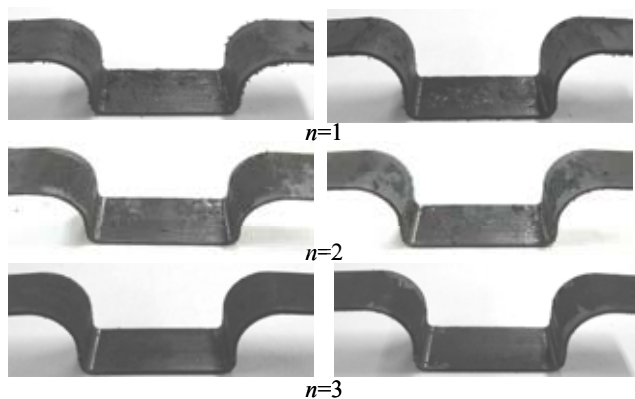


Fig. 4 熱間ハット曲げ加工された成形体

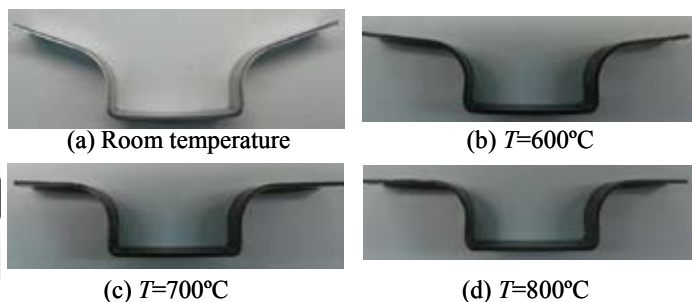


Fig. 5 熱間ハット曲げ成形体の側面写真

$n=1$ におけるハット曲げ成形体の底中央部とダイス角部のビッカース硬さと加熱温度の関係を **Fig. 6** に示す. 底中央部, ダイス角部とも, 硬さは加熱温度とともに上昇し, $t=3.5, 5s$ の硬さに差はなかった. $T=850^{\circ}C$ 以上では, 底中央部で約 520HV, ダイス角部で約 480HV の硬さが得られた. $T=850^{\circ}C$, $t=3.5s$ 以上で十分な焼入れが行われており, 1.5GPa 級の引張強さに相当する硬さが得られた.

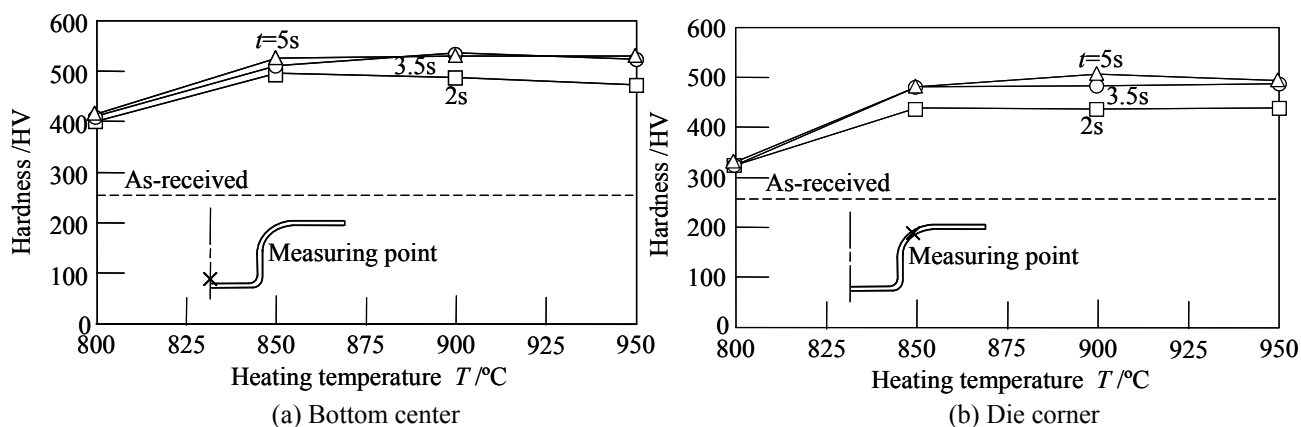
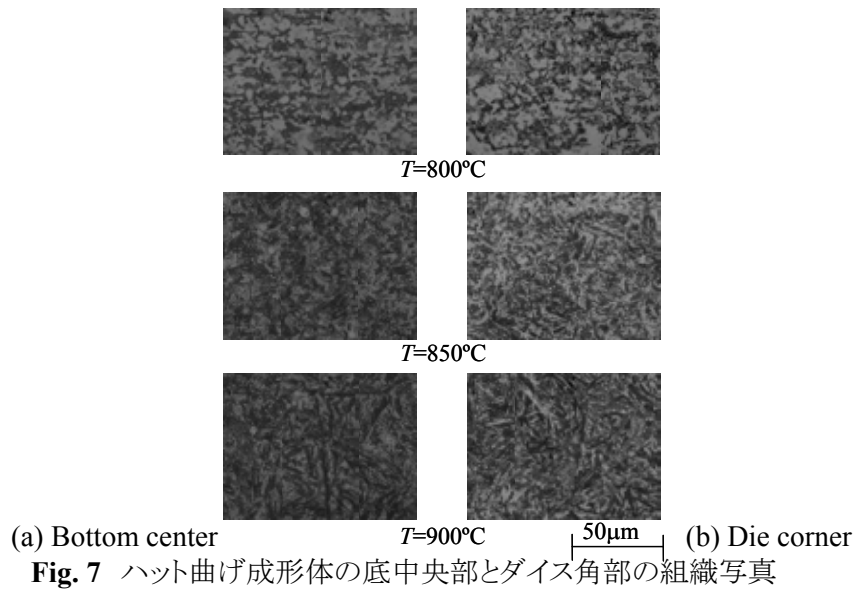


Fig. 6 ハット曲げ成形体の底中央部とダイス角部のビッカース硬さと加熱温度の関係

$n=1$, $t=3.5s$ におけるハット曲げ成形体の底中央部とダイス角部の組織写真を **Fig. 7** に示す. 加熱温度の上昇とともにマルテンサイト組織が増え, $T=850^{\circ}C$ 以上ではマルテンサイトの量は一定になっており, 硬さも一定になった. ダイス角部では, 底部に比べて急冷の程度が低くベイナイト組織が多く析出し, **Fig. 6** において硬さが少し低くなった.



2.3 スケール抑制剤の洗浄

ハット曲げ成形体には表面層が残存しており、その洗浄を行った。熱間で加工された成形体では、残存した表面層を水では洗浄できなかったため、70°C に加熱した 10%濃度のリン酸にハット曲げ成形体を 2 分間浸し、表面粗さを測定した。表面酸化防止用めっき処理鋼板においても、この溶液でめっき層を除去することは可能であるが、除去には長時間を必要とし、表面性状も低下する。

$T=900^{\circ}\text{C}$, $t=3.5\text{s}$ における洗浄前後のハット曲げ成形体底中央部とダイス角部の表面写真を **Fig. 8** に示す。 $T=900^{\circ}\text{C}$ では、厚い表面層が形成されるため $n=1$ においては完全に除去することができなく黒い斑点が残る、 $n=2$ 以上では表面層は残存していない。なお、 $T=850^{\circ}\text{C}$ では表面層が薄いため $n=1$ においても表面層を除去することができた。

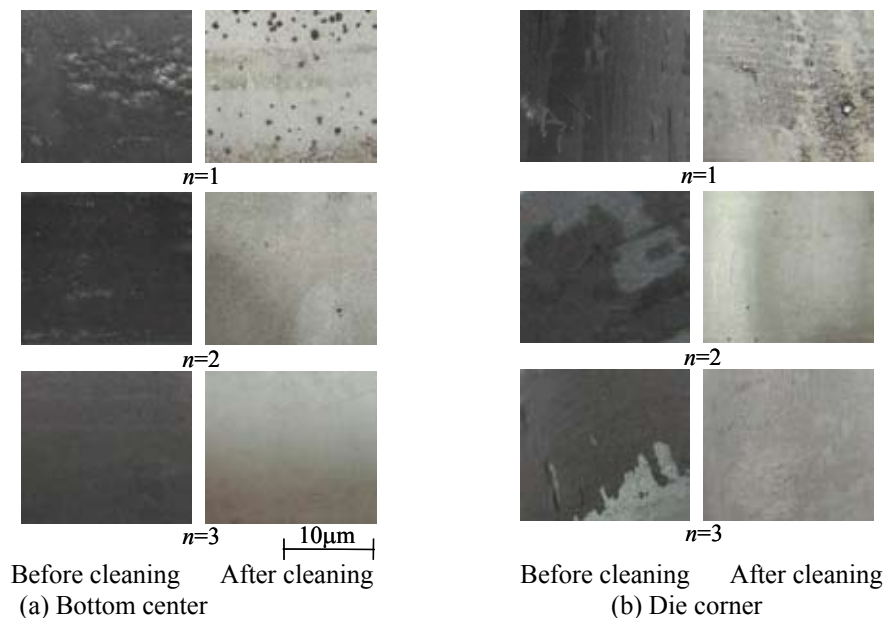


Fig. 8 $T=900^{\circ}\text{C}$ における洗浄前後のハット曲げ成形体底中央部とダイス角部の表面写真

3. 熱間ハット曲げ加工における溝付き金型を用いた局部ダイクエンチ

3.1 溝付き金型を用いた局部ダイクエンチ法

熱間プレス成形において金型と接触しない部分は焼入れされないことを利用して、**Fig. 9** に示すようにパンチとダイスに溝を付けることによって素板を局部的に接触させ、局部ダイクエンチを行う。下死点において金型と接触している部分だけが焼入れされ、強度分布を有する成形体が得られ、本方法は金型に溝を付けるだけの簡易なものである。

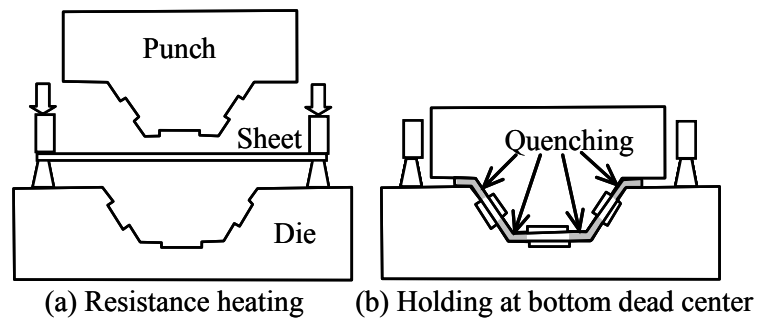


Fig. 9 溝付き金型を用いた局部ダイクエンチ法

局部ダイクエンチハット曲げ加工装置を Fig. 10, 深さ 1mm の溝が付いたパンチとダイスを Fig. 11 に示す. ハット成形体において, 底角部とフランジ角部だけが高強度を必要とするため, それらの部分が金型と接触するようにして, 成形体底中央部と側壁部に溝を付けた. 4MPa の電極押えの圧力において, 素板は 900°C に約 2.3 秒で通電加熱され, その後 0.2 秒でハット曲げ加工され, 下死点において 0.6MPa の板押え圧力で $t=3.5$ 秒保持された.

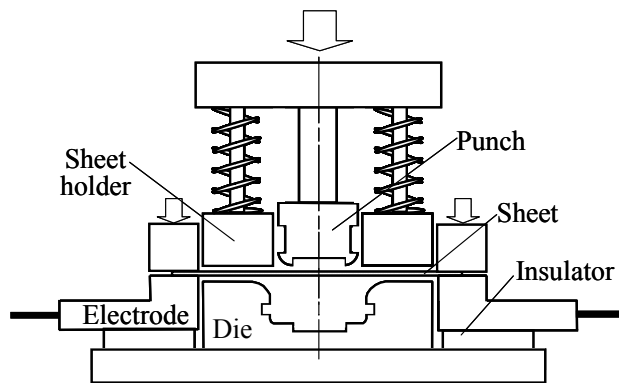


Fig. 10 局部ダイクエンチハット曲げ加工装置

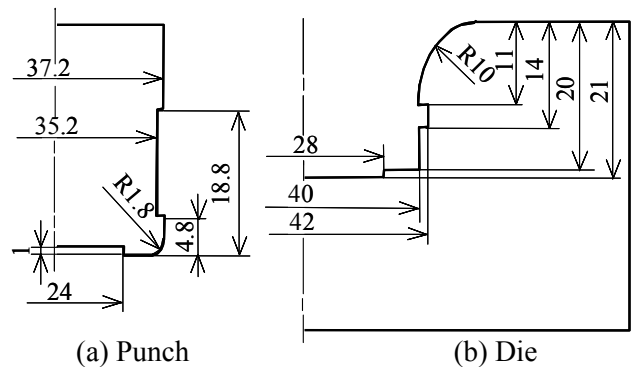


Fig. 11 溝付きパンチとダイス

3.2 ハット曲げ加工結果

局部ダイクエンチハット曲げ成形体とフランジ角部を Fig. 12 と Fig. 13 にそれぞれ示す. 比較として, 溝なし金型を用いた通電加熱と高温炉加熱⁷⁾の結果も示す. 高温炉加熱では多くの酸化スケールが発生しているが, 通電加熱は非常に急速であり酸化スケールはほとんど発生していなく, 表面状態が良好な成形品が得られる. また, 成形体はほとんどスプリングが生じていなく, 形状凍結性は高い.

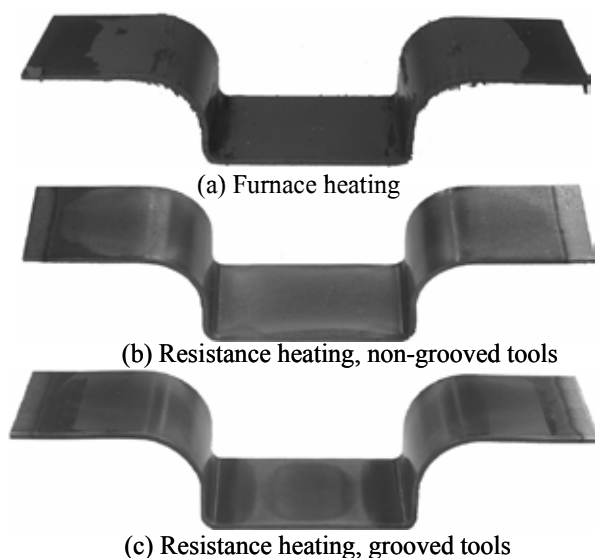


Fig. 12 局部ダイクエンチハット曲げ成形体

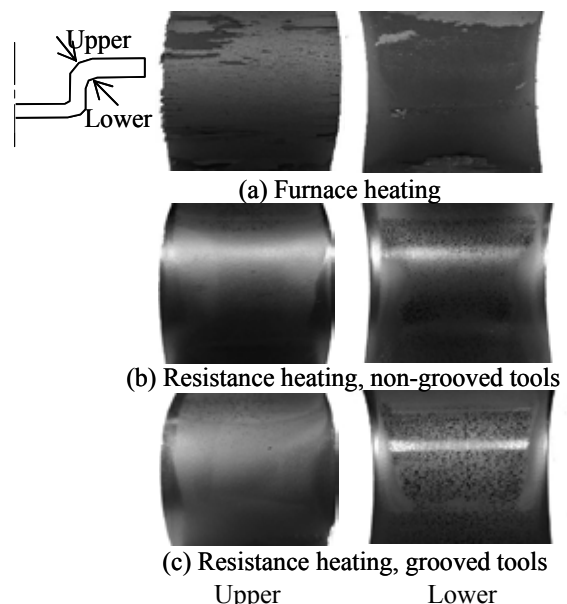


Fig. 13 成形体のフランジ角部

ハット曲げ加工荷重を **Fig. 14** に示す. 溝付きと溝なし金型では, 加工荷重はほぼ同じであり, 冷間加工荷重の約 1/3 になっている.

成形体のダイス角部転写精度を **Fig. 15** に示す. 冷間加工と比べて角部転写精度は大幅に改善されているが, 溝付き金型の方が溝部の非接触によって角部に作用する張力が小さくなり, 溝なし金型よりも転写精度は若干低い.

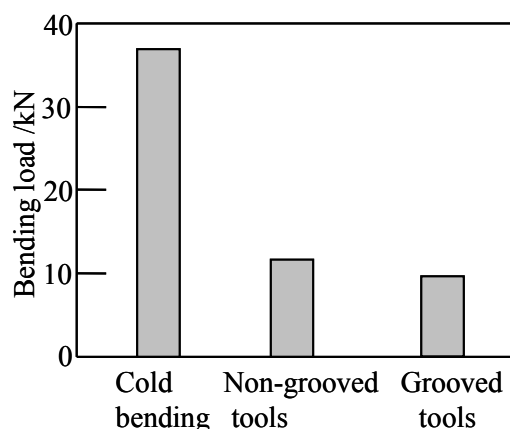


Fig. 14 ハット曲げ加工荷重

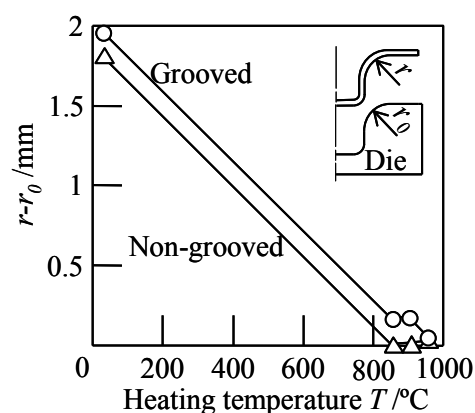


Fig. 15 成形体のダイス角部転写精度

局部ダイクエンチハット曲げ成形体の長手方向硬さ分布を **Fig. 16** に示す. ただし, 素板の両端は電極と接触して温度は上昇していき, 硬さは素板とほぼ同じである. 溝なし金型では温度が低い両端を除いた領域で硬さが大きくなっているが, 溝付き金型を用いることによって, 金型と接触しない成形体底中央部と側壁部において硬さの上昇を防止でき, 底角部とフランジ角部で硬さは高くなっており, 強度分布を有する成形体を得られた. $T=950^{\circ}\text{C}$ では, 熱伝導によって底中央部においても温度が上昇して硬さが大きくなっており, 局部ダイクエンチの場合は加熱温度が高すぎると局部ダイクエンチの効果が得られなくなる. 一方, 板押え圧力を作用させる必要があるため, 成形体のフランジ部は金型と接触することになり, この部分も急冷されて硬さが上昇する.

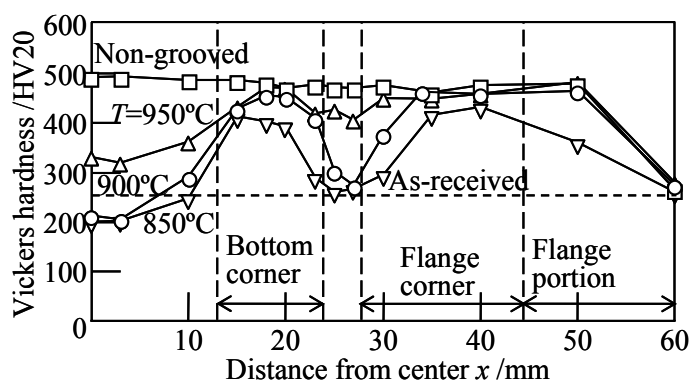


Fig. 16 局部ダイクエンチハット曲げ成形体の長手方向硬さ分布

3.3 フランジ部の焼入れを防止したハット曲げ加工

ハット曲げ成形体のフランジ部の焼入れを防止させるために, **Fig. 17** に示すようにフランジ部と接触するダイスと板押えに熱伝導率が低いセラミックスであるステアタイト板を用いた. フランジ部以外の金型は SKD61 である. SKD61 の熱伝導率は $25\text{W/m}\cdot\text{K}$ であるが, ステアタイトは $2\text{W/m}\cdot\text{K}$ である. 加熱温度 $T=900^{\circ}\text{C}$, 保持時間 $t=3.5\text{s}$ で曲げ加工を行った.

フランジ部にステアタイトを用いた溝付き金型で局部ダイクエンチハット曲げ成形体の長手方向硬さ分布を **Fig. 18** に示す. フランジ部が SKD61 の結果と比べて, 接触部にステアタイトを用いることによってフランジ部の硬さの上昇が防止され, 底角部とフランジ角部は引張強さ 1.5GPa 程度になり, それ以外は低強度である成形品が得られた.

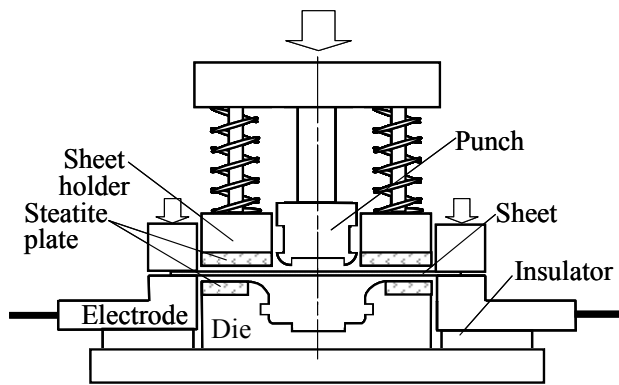


Fig. 17 ステアタイト板を用いたハット曲げ加工装置

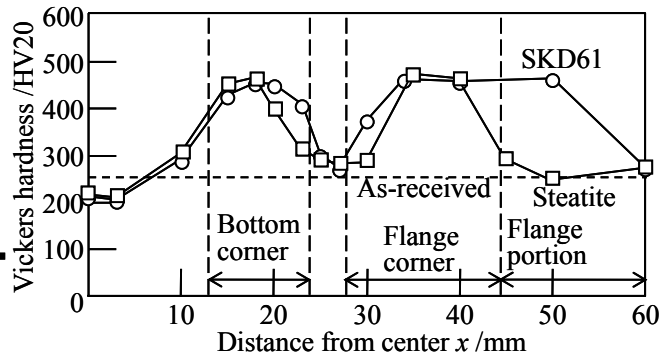


Fig. 18 ステアタイト板を用いた局部ダイクエンチハット曲げ成形体の長手方向硬さ分布

ハット曲げ成形体の底部とフランジ部に直径 10mm の穴抜き加工を行い、測定された最大穴抜き荷重を Fig. 19 に示す. フランジ部にステアタイトを用いた溝付き金型では、底部とフランジ部の最大穴抜き荷重は全体を焼入れされたものの半分程度であり、素板と同程度であり、トリミングや穴抜き加工などの後加工が容易になった.

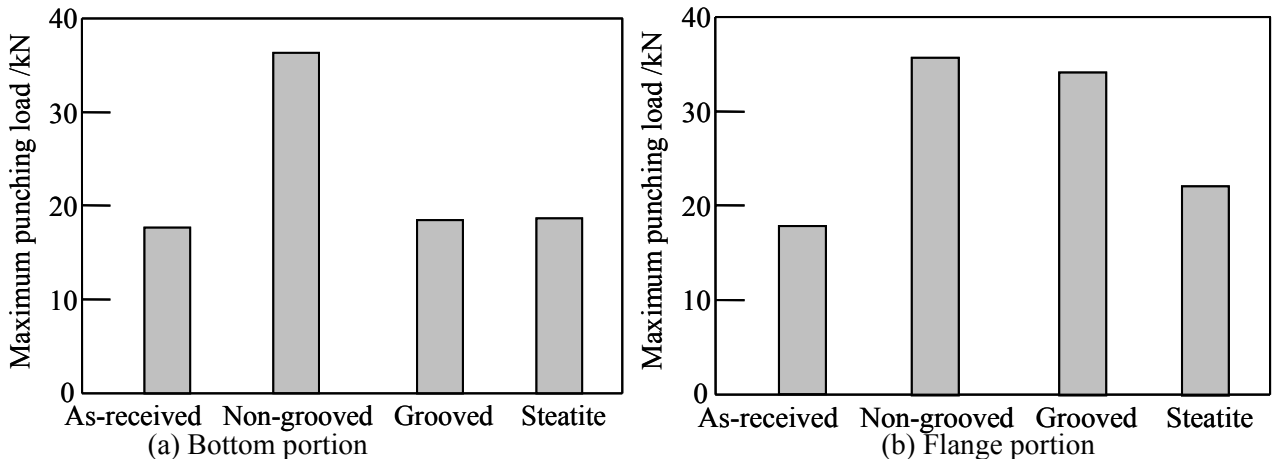


Fig. 19 ハット曲げ成形体の最大穴抜き荷重

4. 温・熱間スプライン成形

スプライン成形では、円筒容器の側壁に歯形を付けるが、成形がきびしいため高張力鋼板を適用することは困難である. 高張力鋼板の変形抵抗を減少させるため、円筒容器を加熱して温・熱間成形を行うことが考えられるが、高温炉によって容器全体を加熱すると、余分な加熱、表面酸化、長い加熱時間、低い加熱効率などが問題となる.

通電加熱は金属素材に通電してジュール熱によって加熱するものであり、鍛造加工において素材の加熱に適用されている. しかしながら、厚さが小さい板材では急速に温度が低下するため、実際の板成形にはまだ適用されていない. また、Fig. 20 に示すように、板材を全体的に加熱するためには両端から通電するが、矩形以外の板材では断面積が変化して温度分布が不均一になる. 台形板材では、狭い部分が断面積は小さく温度が高くなるが、広い部分では低くなり、板成形では矩形材に適用が限定される. しかしながら、スプライン成形では円筒容器の側壁だけの加熱が必要であり、円筒容器を上下の電極ではさむと側壁が通電されるが、側壁の肉厚が均一であると断面積が高さ方向に一定になって均一な温度分布が得られる. 円筒容器は板材を深絞り加工後、しごき加工を行って側壁の肉厚を均一にする必要がある.

通電加熱した容器側壁がスプライン成形できるかを試験的に調べた. スプライン成形に用いたパンチ、ダイスを Fig. 21 に示す. 4本の歯形状のスプライン溝を円筒容器に付ける加工を行った. パンチとダイスの材質は SKD62 であり、パンチは成形後に熱収縮した容器を取り出せるようにするため、4 分割構造である.

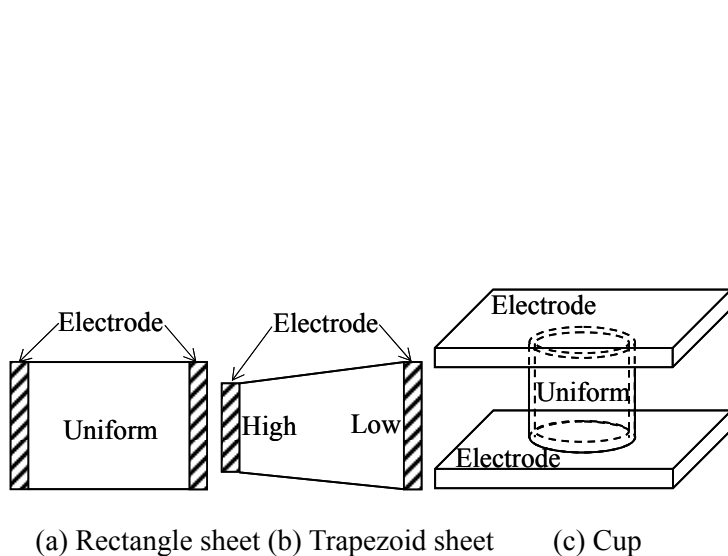


Fig. 20 金属板の通電加熱

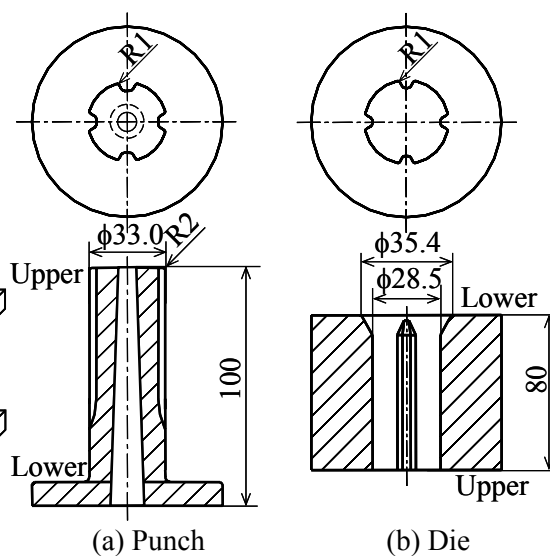


Fig. 21 スプライン成形に用いたパンチ、ダイス

温・熱間スプライン成形の手順を Fig. 22 に示す。通電加熱完了直後に 2 分割した上電極は横に下電極間には下にそれぞれ待避し、サーボプレスが作動しダイスが下降してスプライン成形を行う。加熱後容器の温度低下を防止するために、サーボプレスの最高速度である $150\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ で成形を行い、銅箔を 4 枚重ねて円管端部と銅電極の間にはさんだ。

スプライン成形された容器を Fig. 23 に示す。歯形形状が容器側壁に付けられており、通電加熱から成形までの連続した加工を行うことができた。

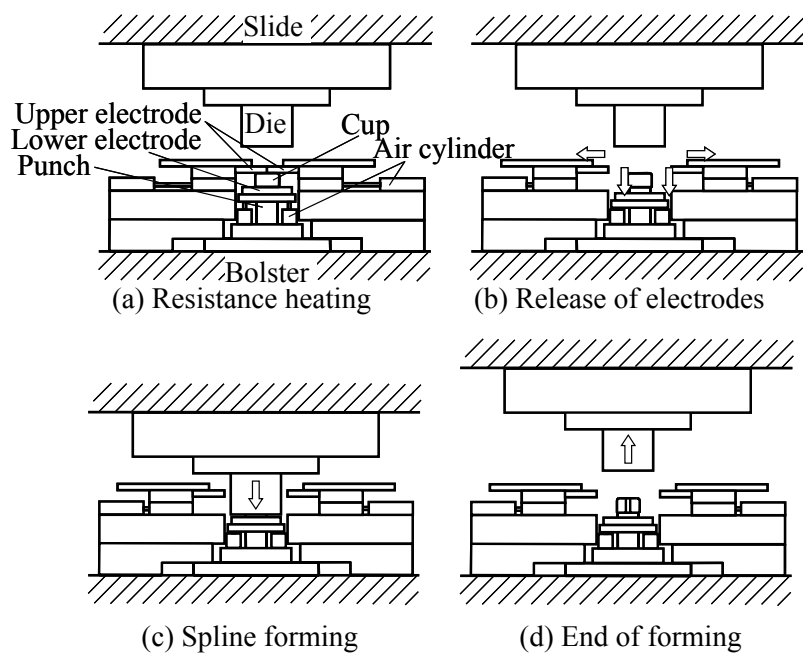


Fig. 22 温・熱間スプライン成形の手順



Fig. 23 スプライン成形された容器

5. 結 言

超高張力鋼板の新しい温・熱間プレス成形法を開発した。まず、高温炉を用いた熱間プレス成形において、ダイクエンチ用鋼板にプレコートスケール抑制剤を塗布することによって表面酸化を低減した。つぎに、金型に溝を付けて成形品を金型と局部接触させて局部だけを急冷する熱間プレス成形法を開発して、強度分布を有す超高張力鋼成形品を製造した。さらに、円筒容器側壁を通電加熱する高張力鋼板の温・熱間スプライン成形を開発した。

なお，本研究は JFE21 世紀財団の研究助成によるものであり，感謝の意を表する．

参 考 文 献

- 1) 佐藤章仁：塑性と加工, 46-534 (2005), 548-551.
- 2) 杉山隆司：塑性と加工, 46-534 (2005), 552-555.
- 3) 小嶋啓達：塑性と加工, 46-534 (2005), 595-599.
- 4) Neugebauer, R., Altan, T., Geiger, M., Kleiner, M. & Sterzing, A.: CIRP Ann., 55-2 (2006), 793-816.
- 5) Mori, K., Maki, S. & Tanaka, Y.: CIRP Ann., 54-1 (2005), 209-212
- 6) 森謙一郎・牧清二郎・斉藤翔一・岸本信・林達志・奥村俊彦：塑性と加工, 48-555 (2007), 318-322.
- 7) 森謙一郎・伊藤大介：塑性と加工, 50-577 (2009), 129-133.
- 8) 森謙一郎・斉藤翔一・牧清二郎・岸本信・林達志・奥村俊彦：塑性と加工, 49-564 (2008), 56-60.
- 9) 中野隆志・芦原和夫・石永信行・井村隆昭・外山泰治：塑性と加工, 47-551 (2006), 1146-1150.