ホットスタンピング工法での ドローベンド成形性におよぼす成形条件の影響

楠見 和久^{*, ****} 山本 修治^{**} 潮田 浩作^{***, ****}

Effect of Forming Conditions on Draw Bending Formability in Hot Stamping Process

Kazuhisa KUSUMI^{*, ****}, Shuji YAMAMOTO^{**} and Kohsaku USHIODA^{***, ****}

(Received on June 6, 2018)

Formability in draw bending, i.e., deep drawing without shrink deformation at the flange part, in the hot stamping process was investigated and discussed in terms of the effect of the strength of the side wall near the punch shoulder on deep drawability. Furthermore, hot forging lubricants used in a wet condition in the hot stamping process were examined because the die temperature is below 100 °C for die quenching. The results showed that the forming limit of draw bending increased with a lower forming temperature, a lower forming speed, and a lower blank holder force. Under these forming conditions, the temperature of the side wall near punch shoulder, which is a critical part for fracture, decreased indicating an increase in the strength of the side wall. Accordingly, the temperature of the side wall near the punch shoulder is a dominant factor in the control of the draw bending formability in the hot stamping process. In addition, emulsion-type hot forging lubricant exhibited excellent lubricating ability and improved the forming limit of draw bending in the hot stamping process.

Key words: sheet metal forming, hot stamping, deep drawing, draw bending, hot forging lubricant.

1. 緒 言

近年、地球温暖化に対応した二酸化炭素排出量削減のために燃費向上が必須となり、自動車車体の軽量化が強く求められている。さらに衝突時の安全基準も厳格化される方向であり、車体部品に使用される鋼板の強度は著しく増加しており、自動車部材に適用可能な特性の優れた引張強さ 1.2 GPa 級までの高強度鋼板が開発されている¹⁾。一方、鋼板強度の増加に伴ってプレス成形性は低下し、割れ・しわといった不具合発生に加えて、形状凍結性も著しく低下するため²⁾、冷間プレスにおける高強度部品の製造は困難になってきている。

そこで、高強度部品の製造する方法としてホットスタンピングと呼ばれる成形方法の適用が拡大している³⁾。この成形方法では鋼板は 900 °C 程度のオーステナイト域の温度

に加熱され、常温の金型で成形された後、金型中で加圧されながら保持・冷却されることにより急速冷却され、焼きが入り高強度を得ることができる。この工法に適する鋼材の化学成分を調整することにより引張強さが 1.5 GPa 程度で良好な形状の部品が製造できる。

本研究では、ホットスタンプ工法での基本的な成形性を系統的に研究しており、張出し成形性および形状凍結性については既に報告した^{4), 5)}。本報では、もう一つのプレス成形の基本要素⁶⁾である深絞り性について検討した。

深絞り成形での成形可否は主に破断危険部であるパンチ肩近傍の材料の破断応力とフランジ部の流入抵抗とのバランスにより決まり、前者が後者を上回ることにより破断せずに成形が可能となる⁷⁾。従来のホットスタンピングでの深絞り性の検討では主にフランジ部の流入抵抗に関する研究が進められてきた^{8), 9)}。ホットスタンピングではフランジ部ではしわ押えによりブランクの温度が低下して変形抵抗が高くなり、流入抵抗が増加する。そこで、フランジ部の温度を高くすると成形性が向上するという知見が得られている。

一方、成形可否におよぼすパンチ肩近傍での材料の破断応力の影響は上記検討では評価されていない。実部品ではフランジ部の縮みフランジ変形が円筒深絞りよりも少ない場合もあり、フランジ部の変形抵抗の影響よりもパンチ肩近傍における材料の破断応力の影響が大きくなることも考

* 新日鐵住金(株)八幡技術研究部 〒804-8501 北九州市戸畑区飛幡町 1-1 Nippon Steel & Sumitomo Metal Corporation, Yawata laboratory, 1-1 Tobihata, Tobata, Kitakyushu, 804-8501, Japan.
E-mail: kusumi.kk5.kazuhisa@jp.nssmc.com

** 日鉄住金テクノロジー(株) 〒804-0001 北九州市戸畑区飛幡町 2-1 Nippon Steel & Sumikin Technology, 2-1 Tobihata, Tobata, Kitakyushu, 804-0001, Japan.

*** 日鉄住金総研(株) 〒100-0005 東京都千代田区丸の内 3 丁目 1-1 Nippon Steel & Sumikin Research Institute Corporation, 3-1-1 Marunouchi, Chiyoda, Tokyo, 100-0005, Japan.

**** 金沢大学大学院自然科学研究科 〒920-1192 金沢市角間町 Kanazawa University, Graduate School of Science and Technology, Kakuma, Kanazawa, 920-1192, Japan.

Fig. 1 Schematic illustration of cylindrical deep drawing, draw bending and example of intermediate shape close to actual part shape

えられる。これより成形可否におよぼす破断応力の影響に関する知見は重要であると考えた。そこで本報告では、第一にパンチ肩部の破断応力が成形可否におよぼす影響を明確とするため、フランジ部の変形のない単純なドローベンド成形(**Fig. 1**)^{10), 11)}にて成形可否におよぼす成形条件の影響を検討した。ここで **Fig. 1** には、実部品に近い円筒深絞りとドローベンドの中間的な部品形状の例を示した。

また、材料流入抵抗に対するもう一つの重要な影響因子として潤滑がある。熱間成形での潤滑剤としては、熱間鍛造用に多くの潤滑剤が開発されている¹²⁾。これらは 100 °C 以上の温度となった金型上に霧状に噴霧され、その後水分が蒸発して固体被膜を形成して摺動性の向上効果が発揮されるものである。一方、ホットスタンピングでは成形後の下死点保持で鋼板を急速冷却して焼入れをするために金型温度が低温であり、水分が残存した状態で使用することも考えられる。本報告ではホットスタンピング工程で潤滑性のよい熱間鍛造潤滑剤を探索した。ホットスタンピングでは成形は無潤滑で行われることが多く、潤滑剤の適用に関する十分な知見はない。そこで、本報告では第二に、熱間圧延での潤滑剤の評価試験である熱間チムケン試験¹³⁾とドローベンド成形を用いて潤滑剤の評価を行い、ドローベンド成形性の改善効果を検討することを目的とした。

2. 実験方法および数値解析方法

2.1 ドローベンド成形方法

ドローベンド成形性の評価には、板厚 1.4 mm、幅 100 mm、長さ 400 mm のホットスタンピング用アルミめっき鋼板を用いた^{14), 15)}。また、工具の断面形状を **Fig. 2** に示す。ダイス幅 200 mm、ダイス肩半径 10 mm、パンチ幅 196.4 mm、パンチ肩半径 20 mm の工具を用いた。クリアランスは 1.8 mm であり、鋼板の板厚以上とした。工具材料は SKD61 である。今回の工具は成形高さを変化させるために成形完了後に鋼板を加圧・冷却して焼入れする機構は設けなかった。実生産では成形高さに応じて成形完了後に鋼板を加圧する機構を設けることで焼入れすることが可能となる。

成形可否におよぼす成形条件の影響の検討は下記条件で行った。最初に、無潤滑でドローベンド成形性評価を行った。鋼板を 1000 °C に加熱した後、金型上に搬送し、油圧プレスを用いて成形した。成形開始温度は 700 °C、800 °C とした。鋼板温度はブランク中央部を熱電対にて測定した。

Fig. 2 Cross-sectional shape of the tool

加熱炉から鋼板を取り出して断熱材で包まれた冶具上で保持し、空冷中の鋼板温度と加熱炉から取り出してからの時間の関係を求めた。成形試験では加熱炉から取り出してからの時間より温度を変化させた。成形速度はブランクと工具との接触時間への影響をとおして、成形中のブランク温度に影響を与えようと考えられる。そこで成形速度を 6.7 mm/s、8.5 mm/s、10 mm/s、12.7 mm/s と変化させた。しわ押え力は 23 kN、36 kN、50 kN、56 kN とした。高さ 30 mm、40 mm、50 mm まで成形した。成形後は 10 s 保持した。成形可否は目視にて割れを判断した。

次に潤滑剤の探索を下記条件で行った。潤滑剤は後述の熱間チムケン試験にて基本特性を調査し、その後絞り込んだ潤滑剤を金型上にスプレーガンにて水滴が生じる程度に噴霧して潤滑効果を評価した。なお、実生産では既に実用化されている熱間鍛造と同様にスプレー¹²⁾により潤滑剤を塗布する方法が考えられる。用いた潤滑剤については 2.2 節に詳しく述べる。鋼板を 1000 °C に加熱した後、金型上に搬送し、油圧プレスを用いて成形した。成形開始温度は 700 °C とした。成形開始温度におよぼす潤滑剤の影響については、潤滑剤も少なく、またブランクを金型上に搬送した際にも蒸気が確認できなかったことから大きな影響はないと推察した。成形速度は 5.7~12.7 mm/s、しわ押え力は 36~190 kN と変化させた。成形後は 10 s 保持した。成形高さは 40 mm とした。成形可否は目視にて割れを判断した。

2.2 熱間チムケン試験方法

水分が残存した状態での熱間鍛造潤滑剤の一次評価のために、熱間圧延を想定した熱間チムケン試験¹³⁾を行った。**Fig. 3** に試験の模式図を示す。本試験は潤滑液をロールに常時かけ続け、誘導加熱された被加工材をロールに押し付けた時のロールのトルクから摩擦係数を算出した。試験条件を **Table 1** に示す。被加工材は板厚 1.2 mm のホットスタンピング用アルミめっき鋼板であり、本試験前に 950 °C、5 分間の加熱をして表面に Fe-Al 合金層を形成させたものを用いた。これを熱間チムケン試験機の被加工材とロールとが接触する面に固定した。検討した潤滑剤を **Table 2** に示す。熱間鍛造では黒鉛が良好な潤滑性を有するために広く使われてきた。しかし黒鉛を用いると作業環境が悪化等のトラブルが生じるため、それに代わる潤滑剤として黒鉛を用いない白色系潤滑剤が開発されている。白色系潤滑剤には水溶性高分子を用いた水溶性型と潤滑成分が液中に分散したエマルジョン型がある¹⁶⁾。本実験では白色系(水溶性型(A-1, A-2)とエマルジョン型(B-1, B-2))を中心に検討し、水分が残存した状態で用いるホットスタンピングに適した潤滑剤を探索した。水溶性型とエマルジョン型について、それぞれ潤滑成分の異なる 2 種類の潤滑剤を用いた。比較として熱間圧延油(C)と黒鉛(D)を用いた。

2.3 数値解析方法

本成形試験の有限要素法解析は DEFORM 3D ver. 11.1.1

Fig. 3 Schematic illustration of the hot Timken test

Table 1 Conditions of the hot Timken test

Roll material	SKD61
Roll diameter	50 mm
Roll width	8 mm
Rotational speed	100 rpm
Temperature	800 °C
Load	196 N
Liquid amount	1.0 l/min
Concentration of lubricant	10 %

Table 2 List of hot forging lubricants used in the hot Timken test

Mark	Type
A-1	Water soluble (1)
A-2	Water soluble (2)
B-1	Emulsion (1)
B-2	Emulsion (2)
C	Lubricant for hot rolling
D	Graphite

を用いて実施した。解析モデルは対称性を考慮して 1/4 の三次元モデルとし、ブランクには剛塑性体ソリッド要素、ブランク近傍の金型には弾性体ソリッド要素を用いた。被加工材の高温での加工硬化特性は、円柱圧縮での実測結果に基づく温度、ひずみ速度依存性を考慮した応力-ひずみ特性を使用した。すなわち、直径 8 mm、長さ 12 mm の円柱を 950 °C に加熱した後に 50 °C/s で加工温度まで冷却し、ひずみ速度 0.01 s^{-1} , 0.1 s^{-1} , 1 s^{-1} にて圧縮して、応力-ひずみ曲線を求めた。また、無潤滑の場合の摩擦係数は 0.55 とした¹⁷⁾。

3. 実験結果および考察

3.1 ドローバンドでの成形可否におよぼす成形条件の影響

(1) 破断危険部 成形が可能であった場合と破断が生じた場合の部品外観をそれぞれ Fig. 4, Fig. 5 に示す。破断はパンチ肩近傍にて生じていた。どの成形条件においても破断が生じる場合には、Fig. 5 と同様の破断形態を示した。

(2) 成形可否におよぼす成形条件の影響 Fig. 6 に成形開始温度 800 °C、しわ押え力が 23 kN, 36 kN, 50 kN、無潤滑の場合の成形可否におよぼす成形高さ、成形速度、しわ押え力の影響を示す。成形高さ 30 mm で成形が可能な条件では、成形高さ 40 mm, 50 mm でも成形が可能となった。これは、成形高さ 30 mm ではすでに破断危険部であるパンチ肩近傍部が成形されており、この部位が成形された場合には破断が生じなくなることを示唆する。金型のクリアランスも板厚以上であったため、しごき加工がされなかったこ

Fig. 4 Appearance of the stamped part when fracture did not occur (forming start temperature: 800 °C, blank holder force: 23 kN, forming speed: 10 mm/s, forming height: 50 mm)

(a) Overall view

(b) Enlarged view near the fracture

Fig. 5 Appearance of the stamped part when fracture occurred (forming start temperature: 800 °C, blank holder force: 23 kN, forming speed: 12.7 mm/s, forming height: 30 mm)

とも一因である。また、成形速度が大きくなると破断が生じる場合が多くなった。さらに、しわ押え力が大きい場合に、破断が生じやすくなることが明らかとなった。

Fig. 7 に成形開始温度 700 °C、しわ押え力が 36 kN, 50 kN, 56 kN、無潤滑の場合の成形可否におよぼす成形高さ、成形速度、しわ押え力の影響を示す。しわ押え力 36 kN にて比較すると、成形開始温度が 700 °C の方が 800 °C の場合よりも割れが発生する成形速度が高速側にあり、成形可能な成形速度範囲が広いことがわかった。

上記の結果から成形可否におよぼす成形条件の影響、すなわち割れが発生する最低の成形速度としわ押え力の関係を Fig. 8 に整理した。両者の間にはほぼ負の直線関係が成り立ち、低速側に成形可能領域が広がる傾向がある。これより、ホットスタンピングでのドローバンド成形ではしわ押え力が小さく、成形開始温度が低く、成形速度が小さいほど、成形性が良好となることがわかった。

従来のフランジ部の流入抵抗に着目した研究^{8), 9)}では成形速度が速く、フランジ部の温度が高いと成形性が良好となる結果が得られており、温度に関して本実験とは逆の傾向を示した。すなわち、パンチ肩の破断応力とフランジ部の流入抵抗に対して縮みフランジの有無で温度は逆の影響を与えることに注意する必要がある。

3.2 ホットスタンピングに適した潤滑剤の検討

(1) 熱間チムケン試験 Fig. 9 に、熱間チムケン試験における摩擦係数の試験急激に摩擦係数が増加した。C は A-1, A-2 に次いで低い摩擦係数を示したものの、試験中に発火した。これは潤滑剤中の油分が発火したものと考えられる。

Fig. 6 Effects of forming height, forming speed, and blank holder force on formability in draw bending (forming start temperature was 800 °C)

黒鉛系 (D) は摩擦係数が安定しなかった。これは摩擦界面で黒鉛粒子の蓄積、除去が繰り返されているためと考えられる。上記した潤滑剤の一次評価結果を考慮して、摩擦係数の低いエマルジョン型の B-1、および比較として焼付きの生じなかった水溶性型の A-1 を実際のホットスタンピングにて評価した。

(2) ドローベンド成形での潤滑効果の検証 破断が生じる場合は、無潤滑の場合と同様にパンチ肩 R とダイス肩 R の中間部位で生じた。破断が生じない場合には、成形高さ 40 mm まで成形が可能であった。

Fig. 10 に破断が発生した成形速度としわ押え力との関係を示す。無潤滑の場合と同様に、成形速度が遅く、しわ押え力が低いほど、割れが発生しにくい結果を示した。潤滑剤を用いると、無潤滑の場合と比べて高いしわ押え力でも成形が可能であった。また、エマルジョン型潤滑剤 B-1 の方が水溶性型 A-1 と比較して、潤滑効果が高い結果を示した。**Fig. 11** に、成形速度 8.5 mm/s の場合にて割れが発生したしわ押え力と潤滑条件の関係を示す。割れが発生したしわ押え力は、無潤滑の場合と比較してエマルジョン型潤滑剤 B-1 では 3.2 倍、水溶性型 A-1 では 1.5 倍となり、熱間鍛造潤滑剤 (B-1) はホットスタンピングにおいても摺動性向上に効果的であることがわかった。エマルジョン型の

Fig. 7 Effects of forming height, forming speed, and blank holder force on formability in draw bending (forming start temperature was 700 °C)

Fig. 8 Relationship between minimum forming speed and blank holder force when fractures occurred

方が水溶性型よりも高い潤滑性が得られる理由としては、成形中に高温の被加工材と潤滑剤が接触して水分が蒸発する際に、水分と油分が分離しているエマルジョン型では潤滑成分が残存しやすいと推察される。上記のように、潤滑性に優れた熱間鍛造潤滑剤を水分が残存した状態で用

Fig. 9 Friction coefficient in the hot Timken test

Fig. 10 Effect of hot forging lubricant on the relationship between minimum forming speed and blank holder force when fractures occurred

Fig. 11 Effect of hot forging lubricant on blank holder force when fracture occurred (forming speed was 8.5 mm/s)

いた場合でも流入抵抗が低下して、ドローベンド成形性は大幅に向上することが明らかとなった。なお、実生産においてはプレス回数とともに温度上昇が生じるため、水分の蒸発を考慮した適用検討を行う必要があると考えられる。

3.3 成形解析結果とドローベンド成形性支配要因

有限要素法解析の結果、実験結果と同様に成形開始温度

800 °C、成形速度 10 mm/s ではネッキングが生じたが、成形開始温度 700 °C、成形速度 10 mm/s および成形開始温度 800 °C、成形速度 7 mm/s ではネッキングが生じなかった。パンチ肩部近傍に生じる引張応力が鋼板の破断応力を超えるとネッキングが生じるものと考え、検討した結果を以下に述べる。

Fig. 12 にネッキングが生じる直前の成形高さ 22.5 mm での鋼板の温度分布の解析結果を示す。ここで成形開始温度を T 、成形速度を V と示す。以降の図も同様である。パンチ肩近傍の破断危険部は、工具と接触していないため高温であることがわかる。成形開始温度 800 °C、成形速度 10 mm/s の場合、他の条件と比較して、パンチ肩近傍部の温度が高いことがわかる。Fig. 13 にパンチ肩近傍部での対称面の最大主応力分布を示す。この部位では引張応力が発生しており、190 MPa 付近の値を示した。最大主応力の方向はブランクの流入方向であった。

Fig. 14 に材料の破断応力とパンチ肩近傍に発生した応力の関係を示す。材料の破断応力としては、パンチ肩近傍部の変形と同程度のひずみ速度 0.1 s^{-1} で取得した応力-ひ

Fig. 12 Temperature distributions calculated by finite element simulation with the forming height of 22.5 mm (T : forming start temperature, V : forming speed)

ずみ特性から公称応力の最大値, すなわち引張強さを求め, その真応力を示した. パンチ肩近傍に発生した応力は Fig. 13 で示した値の最大値を示した. 成形開始温度 800 °C, 成形速度 10 mm/s の場合, 材料の破断応力を超える最大主応力が生じており, その後の成形でネッキングに至ったものと推定される. 一方, 成形開始温度 700 °C, 成形速度 10 mm/s および成形開始温度 800 °C, 成形速度 7 mm/s では上記の結果よりもパンチ肩近傍の温度が低下しており, 生じた最大主応力が材料の破断応力を下回ったため, ネッキングが生じなかったものと推定される.

以上より, ホットスタンピングのドローバンド成形性は破断危険部であるパンチ肩近傍の温度が大きく影響し, 成形温度が低い, もしくは成形速度が小さい場合には破断危険部の温度が低下して変形抵抗が高くなり, 成形性が良好となったと考えられる.

Fig. 13 Distribution of maximum principal stress near punch shoulder (T : forming start temperature, V : forming speed)

Fig. 14 Relationship between breaking stress of material and stress of blank near punch shoulder (T : forming start temperature, V : forming speed)

4. 結 言

フランジ部の変形のないドローバンド成形にて, ホットスタンピングにおける深絞り性におよぼす成形条件(成形開始温度, 成形速度)の影響を調査した. さらに, ホットスタンピングに適した潤滑剤を調査した. その結果, 以下の

知見を得た.

- (1) 成形開始温度が低く, 成形速度が遅く, しわ押え力が小さいほどドローバンド成形性は良好となった.
- (2) 破断危険部は工具と非接触となるパンチ肩近傍部であり, この部位は周囲よりも温度が高く変形抵抗が局所的に低下するためと考えた. 成形速度が小さく, 成形開始温度が低い場合には成形温度が低下して, パンチ肩近傍部の材料の破断応力が増加するため成形性が良好になったと推察した.
- (3) 潤滑剤を水分が残存した状態で用いるホットスタンピングの場合には, エマルジョン型白色系熱間鍛造潤滑剤は水溶性型潤滑剤や熱間圧延油, 黒鉛と比較して良好な潤滑性が得られることがわかった. 潤滑を施すことによりホットスタンピングにおいても流入抵抗が減少してドローバンド成形性は改善した.

参 考 文 献

- 1) Takahashi, M.: J. Jpn. Soc. Technol. Plast., **58**-673 (2017), 105-109.
- 2) Yoshida, T.: J. Jpn. Soc. Technol. Plast., **52**-606 (2011), 777-781.
- 3) Karbasian, H. & Tekkaya, A.E.: J. Mater. Process. Technol., **210**-15 (2010), 2103-2118.
- 4) Kusumi, K., Yamamoto, S., Takeshita, T. & Abe, M.: 56th Jpn. Jt. Conf. Technol. Plast., (2005), 435-436.
- 5) Kusumi, K. & Yamamoto, S.: 58th Jpn. Jt. Conf. Technol. Plast., (2007), 83-84.
- 6) Japan Sheet Metal Forming Research Group: Press-Seikei-Nani-Handbook 4th Ed, (2017), 79, Nikkan-Kogyo-Shinbunsha.
- 7) Nakagawa, T., Abe, K., Hayashi, Y.: Usuita-no-Press-Kakou, (1977), 99-101, Jikkyo-Shuppan.
- 8) Maeno, T., Mori, K. & Nagai, Y.: J. Jpn. Soc. Technol. Plast., **53**-622 (2012), 1013-1017.
- 9) Kusumi, K., Nomura, N., Yamamoto, S., Nakata, M., Abe, M. & Suehiro, M.: Procedia Engineering, **81** (2014), 1719-1724.
- 10) Uemori, T. & Yoshida, F.: J. Jpn. Soc. Technol. Plast., **50**-579 (2009), 317-322.
- 11) Hama, T., Kariyazaki, Y., Ochi, K., Fujimoto, H. & Takuda, H.: Mater. Trans., **51**-4 (2010), 685-693.
- 12) Ikeda, N.: J. Jpn. Soc. Technol. Plast., **54**-630 (2013), 581-585.
- 13) Ikeda, J., Inagaki, S. & Arikawa, Y.: 56th Jpn. Jt. Conf. Technol. Plast., (2005), 323-324.
- 14) Wilsius, J., Hein, P. & Kefferstein, R.: 1. Erlanger Workshop Warmblechumformung 2006, (2006), 83-103.
- 15) Suehiro, M., Maki, J., Kusumi, K., Ohgami, M. & Miyakoshi, T.: Nippon Steel Tech. Rep., 378 (2003), 15-21.
- 16) Semoto, S. & Kita, Y.: Proc. 40th Petroleum-Petrochemical Symp. JPI (Kobe), (2010), 150-154.
- 17) Uda, K. & Azushima, A.: J. Jpn. Soc. Technol. Plast., **55**-637 (2014), 132-136.