

応力緩和現象を利用したひずみ分散化による 深絞り性向上技術

Technology to Enhance Deep-drawability by Strain Dispersion Using Stress
Relaxation Phenomenon

山下 裕之* 上野 宏明*
Hiroyuki YAMASHITA Hiroaki UENO
中井 浩之* 檜垣 貴大*
Hiroyuki NAKAI Takahiro HIGAKI

要 旨

金属の引張試験中にひずみの導入を一時停止すると、応力が経過時間とともに低下する応力緩和現象が発生することが知られており、この現象は弾性ひずみが塑性ひずみに変わることとして説明されている。

本報告では、ひずみ分散を目的として応力緩和現象のプレス成形への応用を提案し、成形中に金型を一時停止するステップモーションを新たに考案して深絞り成形限界を向上させることに成功した。

また、実際のプレス成形試験に加え引張試験でも検証した結果、その深絞り成形限界向上のメカニズムはステップモーションによりひずみの分散化が図られたことに起因すると結論付けられ、停止時間と温度に依存することも確認した。

ABSTRACT

When the introduction of strain is temporarily stopped during tensile testing of a metal, a stress relaxation phenomenon is known to occur whereby the stress diminishes with the passage of time. This phenomenon has been explained as the change of elastic strain into plastic strain.

The present report suggests the application of the stress relaxation phenomenon to stamping for the purpose of strain dispersion. A new step motion that pauses the die during forming was devised and succeeded in modifying the deep-draw forming limit.

Verification was conducted by tensile testing in addition to actual stamping tests. As a result, it was concluded that the mechanism that modifies the deep-draw forming limit arises from the use of step motion for the dispersion of strain, and this was also confirmed to be dependent on the stop time and the temperature.

1. はじめに

1990年代以降、自動車会社各社では車両の軽量化と安全性の両立のため高張力鋼板の適用が積極的に進められてきた。高張力鋼板の開発においては日本の鉄鋼メーカー各社が先陣を切り、より高強度へ、より成形性の高い材料へと技術開発が進み、その適用はホワイトボデーの重量ベースでおよそ60%以上にも達している⁽¹⁾。

一般に鉄鋼材料は、強度の向上とトレードオフの関係で伸びが減少する。そのため高張力鋼板は軟鋼板に比べて本質的に成形性が低く、引張強度が780 MPaを超えるような材料のプレス部品を得ることは容易ではなかった。

これに対し、材料技術では加工性に優れるフェライト

と強度を担保するマルテンサイトの2相組織としたDual Phase鋼(DP鋼)をベースとした伸びに優れ変形抵抗が小さい低降伏鋼や、ひずみの集中を防ぎながら成形後に高強度を得られる応力誘起マルテンサイト変態を活用したTRansformation Induced Plasticity鋼(TRIP鋼)などが開発されてきた。さらに最近では、高張力鋼板の成形性向上には穴広げ性を改善することが効果的であることがわかり、材料内部組織をそれぞれ硬さの差が小さい組織同士の組合せにすることで局部延性を向上させた穴広げ性に優れた材料の開発が進んでいる。

一方、プレス技術による成形性の向上を図る取り組みとしては、金型との潤滑性向上や多段化した加工工程の工夫により加工ひずみの集中を避けるアプローチなどがあげら

*四輪 R&D センター

れる。さらに近年サーボプレス機が登場し、今までにない複雑なプレスモーションが可能になった。玉井ら⁽²⁾はサーボプレスによる複雑な動きを活用し、成形途中にスライドを戻すことでblank材と金型の間に潤滑油を再流入させ、成形後期の潤滑性を向上させることで金型との摩擦を低減し、材料へのひずみ導入量を低減することで成形性を高めることに成功している。しかしながら、成形途中にスライドを戻すという動作を数回繰り返すことはトータルのプレス加工時間の延長を招き、生産性の低下によるコストアップが懸念される。

ところで、金属材料には室温中の一定荷重下で応力が低下するという応力緩和現象が知られており、応力低下を評価する応力緩和試験も規格化されている⁽³⁾。当初この現象に対する研究の多くは金属物理学的な解析に用いるもので純金属に関するものが多かったが、最近構造用鋼でもその検討例が報告されており⁽⁴⁾、室温での引張試験中にクロスヘッドを一旦停止した時の応力の変化を観察した結果、極短時間に大きな応力の低下が認められている。応力緩和のメカニズムは粘弾性のマクスウェルモデル (Fig. 1) で説明され⁽⁵⁾、可動転位の粘性移動により材料の変形初期に発生する弾性ひずみの一部が室温クリープで生じた塑性ひずみに置換されることにより発生するとされている。また、転位の粘性移動には内部摩擦を伴い、内部摩擦が小さい方が移動速度は速くなる。この内部摩擦には非緩和型と緩和型があるが、マクスウェルモデルで説明できる弾性ひずみの塑性ひずみ化による内部摩擦は緩和型で、内部摩擦の大きさはボルドニー (Bordoni) ピークと呼ばれる温度依存性を示すことが知られている⁽⁶⁾。

そこで、本研究では高強度鋼板を用いて従来にない高深絞り性を得るために、応力緩和現象を利用した塑性ひずみ導入過程のコントロールの可能性を期待し、サーボプレスによる複雑なプレスモーションを活用した材料成形限界向上技術の検討をおこなった。

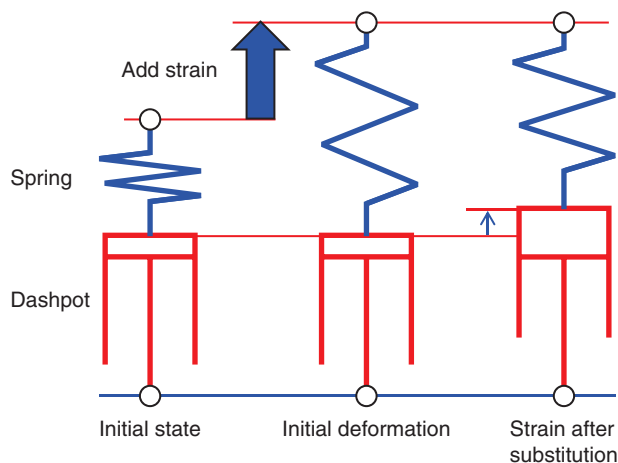


Fig. 1 Maxwell's model

2. ひずみ分散化による高深絞り加工方法の原理

通常のプレス成形加工における破断やネッキングといったプレス成形の不良が発生する過程は以下のとおりである。まず最初に加工中の材料に材料の不均一さに起因する弾性変形がミクロ的に起こる。この変形部にさらに応力集中が続くと、局部的にこの部分が材料の弾性限を超えてしまうことで塑性変形が発生し、やがてマクロな形状変化であるネッキングというくびれが生じる。さらに加工を続けるとこのネッキング位置にマクロな形状変形に起因する応力集中が進行し、最終的に破断に至る。

ここで筆者らは、加工初期に起こる材料のミクロな弾性変形からマクロな形状変形の発生を遅らせることで材料の変形能を活かし、深絞り性の向上を図る方法を考案した。その原理は、応力緩和現象による弾性ひずみの塑性ひずみへの置換現象をプレス加工中に導入し、最初に弾性変形が起こるミクロな材料の弱点部位を塑性ひずみの導入により強化し、他の部位に変形を移すことで材料全体にひずみの分散を起こすというものである。すなわち、材料の当初の弱点部位であるミクロな弾性変形部位に、あらかじめ応力緩和現象による塑性ひずみを導入することでこの部位の転位密度を上げて降伏強度を向上させ、塑性変形を他の低降伏強度部位に移すことでひずみの分散化を図り、マクロな局部変形を遅らせることでプレス成形性を向上させるというものである。

本加工法の原理を材料引張試験中の応力-時間曲線で説明する (Fig. 2)。通常の一定速度でおこなう引張試験の場合、まず弾性ひずみが導入される (1)。さらに引張続けると応力集中部では弾性ひずみが部分的に塑性ひずみに変化する (2)。この時、材料には組織の不均質があるためミクロな弱点部位に弾性ひずみと一部塑性ひずみが集中的に導入される。その後材料の弱点部位にさらにひずみが集中した結果マクロなくびれが生じ、さらに応力集中が進行する (3)。最終的にくびれが進行し破断に至る (4)。

これに対しひずみ分散化を図る成形法では、以下のような過程をたどる。(1)から(2)までは通常の引張試験と同じである。次に(2)でミクロな弱点部位に弾性ひずみと一部塑性ひずみが導入された状態で金型の動きを一旦止めることにより、応力緩和現象による弾性ひずみの一部の塑性ひずみ置換が起こり、結果としてミクロな弱点部位が加工硬化により強化される (A)。この現象は Fig. 1 の変形初期からひずみ置換後に相当する。次に再引張をおこなうと (B)、弾性ひずみが塑性ひずみに置換された部位は転位密度が上昇することで他の部位より強度が上がっているためこの部位にさらなる塑性ひずみの導入は進行せず、強度が相対的に低い他の部位 (新たな弱点部位) に弾性ひずみおよ

び一部塑性ひずみの導入が始まる (C)。

ここで筆者らは、このひずみ置換の繰り返しによりひずみの分散化を起こすことが可能となり、局部変形を抑制し応力集中を緩和することで破断発生を遅延できるという仮説を立てた。

本実験ではこの仮説をプレス加工に適用し、加工を一時停止することによりひずみの分散化を起こすことで成形限界の向上が期待できると考えた。

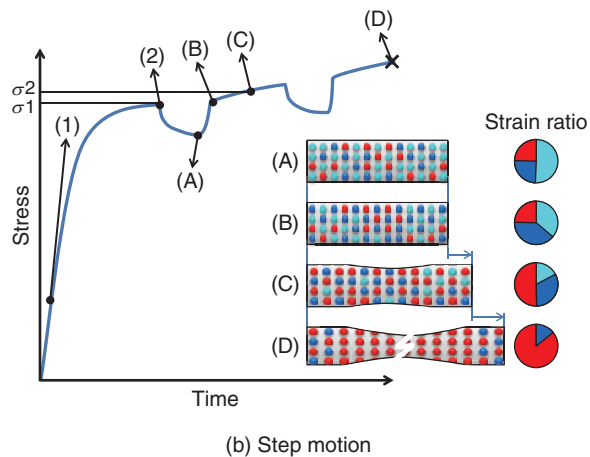
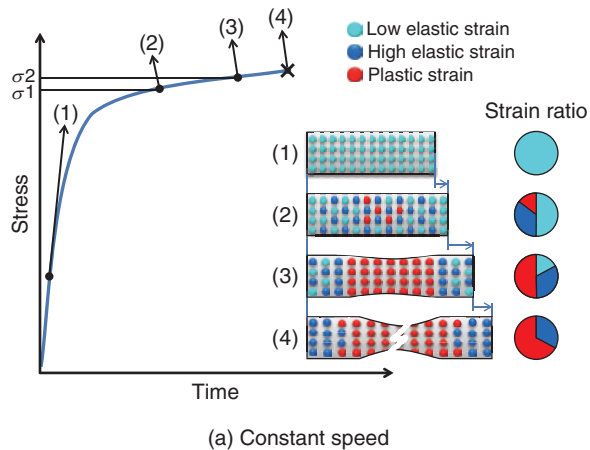


Fig. 2 Concept of forming

3. 試験方法

ひずみ分散の効果確認のため、実際に深絞り形状の金型を用いてプレス成形試験を実施した。

3.1. 試験条件

試験条件を Table 1 に示す。

通常のプレス成形(クランクモーション)では、Fig. 3 に示すようにスライド位置が時間に対して正弦波を描く。本研究では、応力緩和現象により弾性ひずみから塑性ひずみへの置換を促すため、成形途中で金型の動きを一時的に停

Table 1 Test conditions

Item	Data
Blank holding force	100 [kN]
Strokes per minute	1
Blank material	JAC440W 1.4t
	JAC590Y 1.4t

止させた。時間とスライド位置の関係は Fig. 4 に示す通りで、サーボプレスの長所を生かして一時停止時には金型の動きを停止しながらも荷重をかけ続け、なおかつ位置制御をおこなった。以下このプレス加工方法をステップモーションと呼ぶ。

また、プレスの停止時間は 1.0 秒を基本としたが、ひずみの置換は時間とともに進行するため停止時間による効果の差についても検証した。

なお、停止回数については 1 回でも効果は期待できるが、より明確にするために複数回の停止(加工開始 10 mm から 5 mm ごとに下死点まで停止)をおこなった。

成形深さの評価方法は、成形深さを 5 mm ずつ増していき、破断やネッキングを起さない限界深さを成形限界深さとした。

供試材には、強化機構の違いによる影響を確認するため、固溶強化鋼として JAC440W⁽⁷⁾、組織強化鋼として DP 鋼の JAC590Y⁽⁷⁾を用いた。

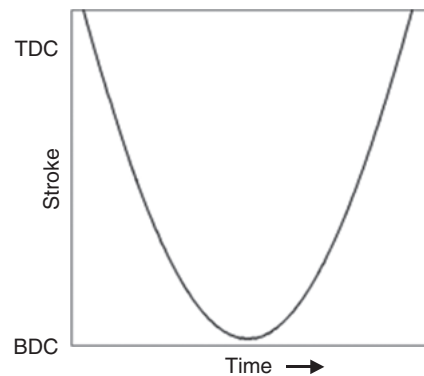


Fig. 3 Motion profile of crank motion

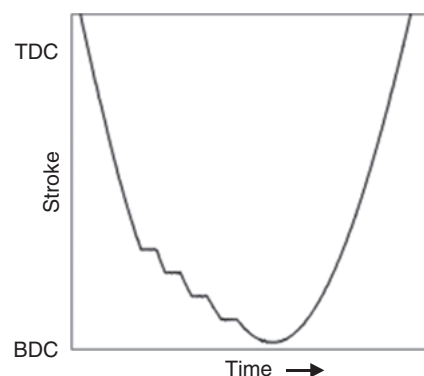


Fig. 4 Motion profile of step motion

3.2. 試験装置

Fig. 5 に示す金型により深絞り性能評価をおこなった。パンチ下部にある円柱にひずみゲージを貼り付けてあり、3 点で成形荷重を測定した。

プランク形状を Fig. 6 に示す。板厚は 1.4 mm である。

プレス機はアイダエンジニアリング社製 NC1 2500(D) 2500 kN を用いた。このプレス機は、NC サーボ機構によりスライドの動きを自在に制御できるという長所を有する。

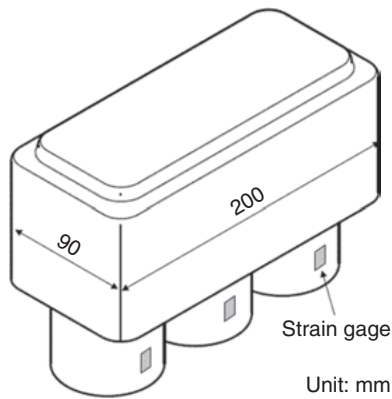


Fig. 5 Punch

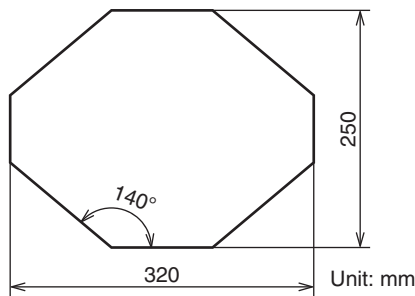


Fig. 6 Blank shape

4. 結果と考察

4.1. ステップモーション適用効果

JAC440W を用いたクランクモーションでの成形結果を Fig. 7(a) に、ステップモーションでの成形結果を Fig. 7(b) に示す。クランクモーションでは成形深さ 60 mm までは成形できたが、65 mm ではコーナ部に破断の発生が認められた。以上のことからクランクモーションでの成形限界は 60 mm と判断した。同様にステップモーションで成形すると成形深さ 70 mm でも破断することなく成形することができた。以上の結果から、ステップモーションを適用することで約 10 mm の成形限界向上の効果が認められた。

クランクモーションおよびステップモーション適用時の各スライド位置に対する成形荷重を Fig. 8 に示す。図から各スライド位置における成形荷重はクランクモーションも

ステップモーションもほぼ同等であることがわかる。ところが、Fig. 9 に示すステップモーションでの時間に対する成形荷重の変化を観察すると、成形途中に一時停止している間に成形荷重が低下していることがわかった。その後、プレス金型が再び動き出すと停止前の荷重とほぼ同じ値まで回復し、その後はクランクモーションでの加工とほぼ同じ荷重曲線を描いた。

また、JAC590Y を用いて成形試験をおこなった結果、クランクモーションでは 50 mm が成形限界だったが、ステップモーションでは 70 mm まで成形可能で、材料の強化機構が異なる場合でもステップモーションでの成形性向上効果を確認できた。

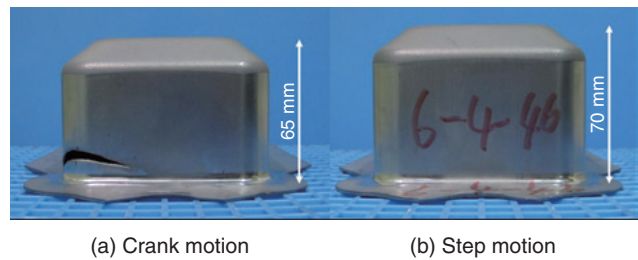


Fig. 7 Results of forming test

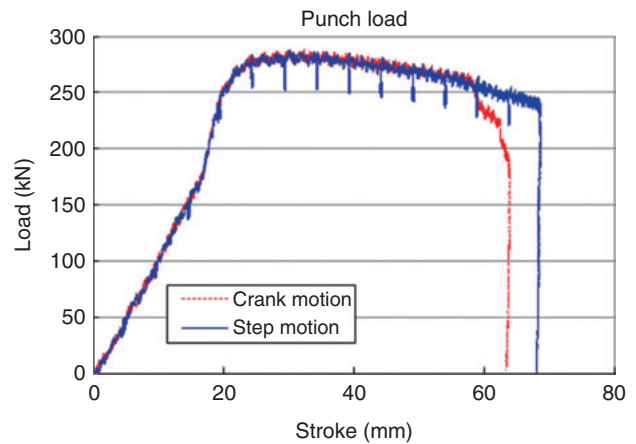


Fig. 8 Forming load in crank motion and step motion

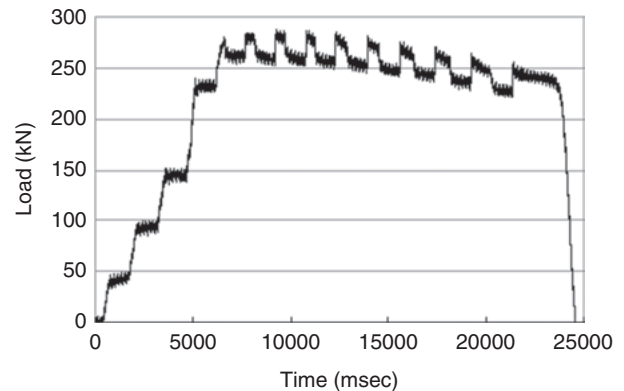


Fig. 9 Forming load in step motion (Time-Load)

4.2. ステップモーション停止時間の影響

先にも述べたように応力緩和現象によるひずみの置換は時間と共に進行するが、今回のステップモーション適用試験結果においても時間と共に荷重が低下しており、停止時間の成形性向上効果に及ぼす影響が考えられる。生産性を考慮すると停止時間は極力短くするのが好ましく、プレス成形性向上の効果を得るために必要な最短の停止時間の検証試験をおこなった。停止時間は Fig. 10 に示す通りで、0 秒、0.1 秒、0.3 秒、0.5 秒、1.0 秒と変化させた。停止時間 0 秒がクランクモーションである。クランクモーションでは破断が認められたが、停止時間 0.1 秒、0.3 秒では破断はなくなり局所的な板厚減少によるネッキングが現れた。さらに停止時間を 0.5 秒以上に延長すると、ネッキングもなくなり良品を成形することができた。以上の結果から、ステップモーションにおける効果は停止時間に依存し、今回のプレス部品形状では金型停止時間 0.5 秒以上で良好なプレス成形品が得られることがわかった。

4.3. プレス成形性向上メカニズムの検討

ステップモーションが材料の変形挙動におよぼす影響を確認するため、JIS13 号 B 試験片⁽⁸⁾を用いて引張試験を実施した。試験方法は、ステップモーションにおける停止の効果を確認するために、引張速度一定とステップモーションの二つのパターンでおこなった。ステップモーションは、 $\Delta l = 2 \text{ mm}$ から 1 mm ごとに 10 秒ずつ停止した。

それぞれ二つのパターンで試験した応力-ひずみ曲線を Fig. 11 に示す。図からわかるように、引張試験にステップモーションを適用することで全伸びが向上した。ここで同じひずみ量に対応する応力は、一定速度もステップモーションも同じ値を示しており、両者に差異は認められなかった。

そこで、材料の破断への影響を検証するため、引張試験片の板厚分布の確認をおこなった。それぞれ二つのパターンにて引張試験をおこない、標点間距離 50 mm に対して伸び $\Delta l = 11 \text{ mm}$ に達したときに荷重を開放した試験片を

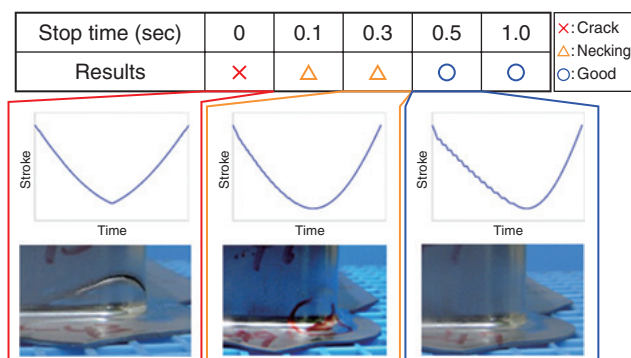


Fig. 10 Influence of stop time

用い、板厚分布を試験片の長手方向で測定し、比較をおこなった。

Fig. 12 に示すように、一定速度で試験したものは、試験片中央付近のみが極端に大きく板厚が減少した(最大板厚減少率=11.3%)。一方、ステップモーションにて加工したものは、それほど極端な板厚減少を起こしておらず、最も板厚が減少した部分でも板厚減少率は 9.5% であり、比較的平均的に板厚減少していた。さらに試験片中央から $\pm 25 \text{ mm}$ の範囲で、最大板厚減少率から最小板厚減少率を引いた差で比較すると、一定速度での試験に対しステップモーションを適用した場合は局所的な変形が約 1/3 に抑制されており、ひずみ分散化による局部変形の抑制効果が確認できた。この変形形態の変化により本来材料の持つ変形能を活かすことが可能となり、材料の全伸びが向上したものと考えられる。

4.4. ステップモーションの停止時間依存性の検討

プレス成形試験において確認された深絞り性向上効果の時間依存性について検証するために、ステップモーションを適用した引張試験を停止時間 1 秒、5 秒、10 秒として

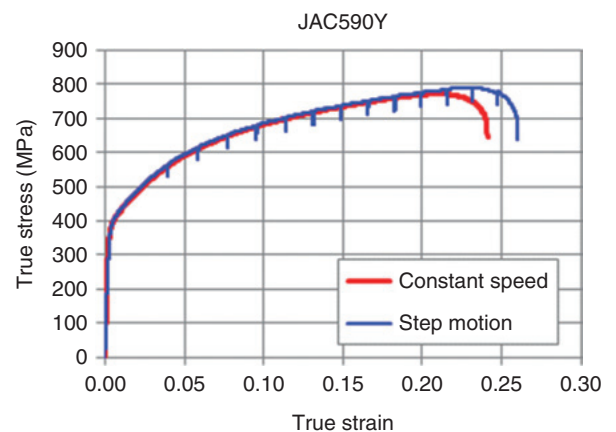


Fig. 11 Strain-stress curve

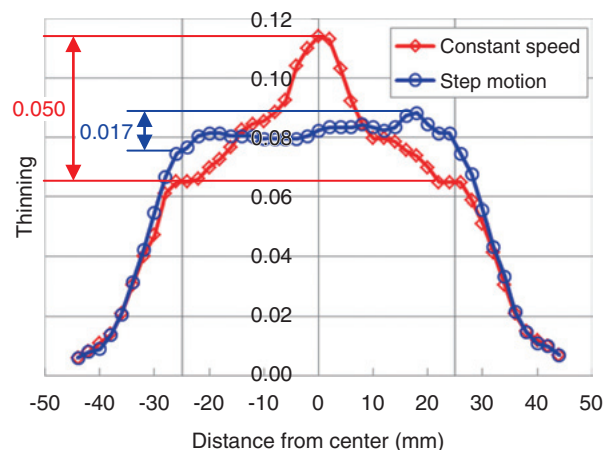


Fig. 12 Comparison of thickness distribution in constant speed and step motion ($\epsilon=22\%$)

おこない、板厚分布の確認をおこなった。Fig. 13 に示すように、まず停止時間 1 秒については一定速度で試験したものと同様に局所的に板厚減少が発生し、最大板厚減少率は 10.8% であった。次に停止時間 5 秒のものは板厚減少率が 9.2% に抑えられており、停止時間 1 秒のものと比較して局所的な板厚減少は抑制傾向にあった。これらについても試験片中央から ± 25 mm の範囲で、最大板厚減少率から最小板厚減少率を引いた差で比較すると、一定速度での試験に対し停止時間 1 秒の場合は局部変形がほぼ同等であるのに対し、停止時間 5 秒では約 2/3 に抑制されていた。以上の結果からステップモーション適用の効果は引張試験においてもプレス成形試験と同様に、停止時間に依存することが確認された。

ところで、プレス成形試験では停止時間が 0.5 秒以上で成形性向上効果が認められたが、引張試験においては 1.0 秒でも効果が現れなかった。停止時の応力の変化を両者で比較した結果を Fig. 14 に示す。プレス成形試験時には引張試験と比較して荷重の低下が極短時間に発生し、1.0 秒停止時の荷重低下率も約 2 倍以上の大きさとなった。

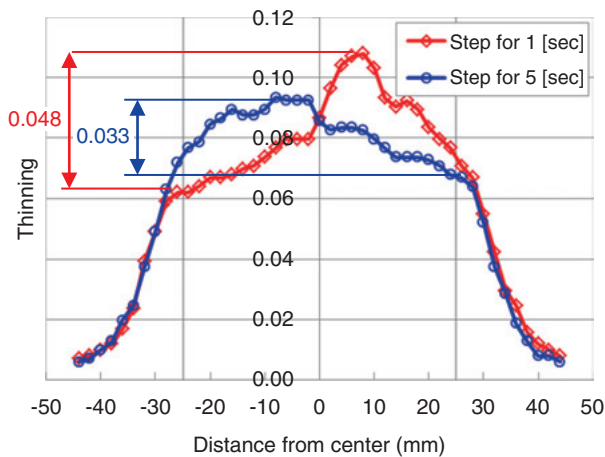


Fig. 13 Comparison of thickness distribution in 1 second stop and 5 second stop ($\epsilon=22\%$)

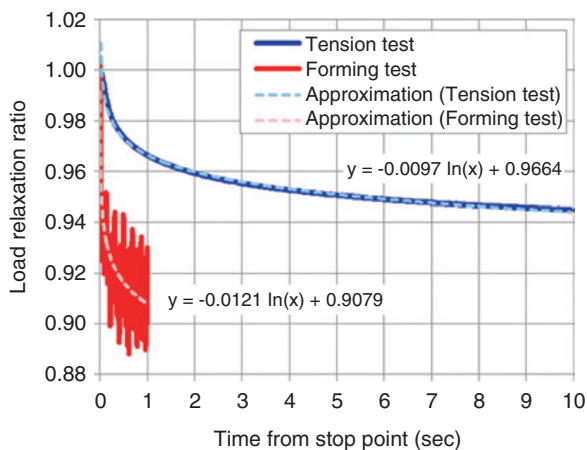


Fig. 14 Time per load relaxation behavior

この両者の相違は、プレス成形は高速加工であるのに対し引張試験は加工発熱を避けるため極低速でおこなうことによる温度差およびひずみ速度差の影響があるためと考えられる。ここで応力緩和現象は一時停止した後に発現するため直接的にはひずみ速度の影響は考えにくく、以下温度による影響を検討した。

温度に対する内部摩擦の大きさは Fig. 15⁽⁵⁾ に示すボルドニーピークの模式図中の Fe に表され、温度に依存して二つのピークを持つ。今回のプレス成形および引張試験の温度依存性の検討のため、この模式図に今回おこなった引張試験およびプレス深絞り加工時のそれぞれの材料の温度を照らし合わせてみると、図中に示す通りその内部摩擦力の差は大きいことがわかり、この内部摩擦力の差がすなわち応力緩和時間に深くかかわっているものと推察される。

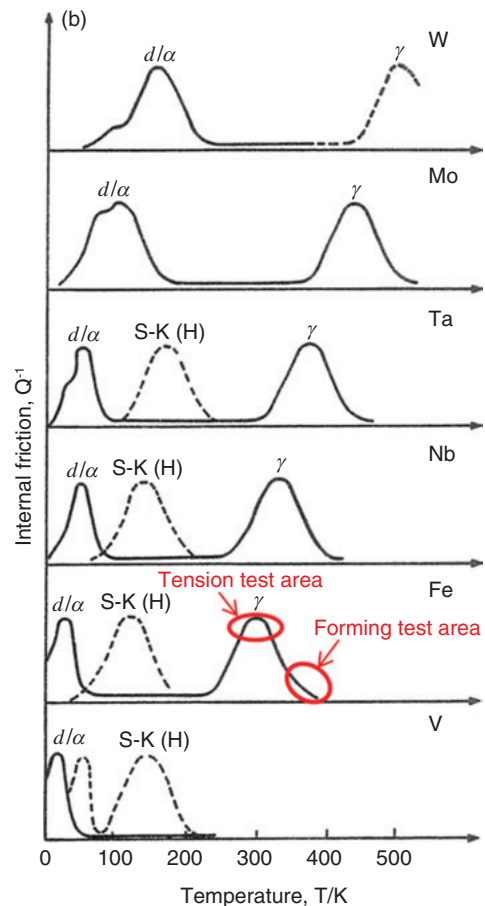


Fig. 15 Image of Bordoni peaks

5. 結言

応力緩和現象を利用したひずみ分散化によるプレス成形性向上を検討した結果、以下の結論を得た。

- (1) プレス成形において、加工途中で金型を一時停止することで応力緩和を発生させるステップモーションの導入により成形限界深さが 40% 向上した。

- (2) 一定速度での引張試験に対し、ステップモーションを再現した引張試験では局部変形の抑制が確認された。
- (3) ステップモーションの成形限界向上の効果は、一時停止の時間に依存することを引張試験およびプレス成形試験にて確認できた。

以上より、仮説として挙げた応力緩和現象を利用したひずみの分散化は成形性向上に有効であることがわかった。

参考文献

- (1) 東雄一, 中川浩樹: サスティナブルな自動車材料技術, 自動車技術会 2011 年春季大会フォーラム, p.1-6
- (2) Y. Tamai, Y. Yamasaki, A. Yoshitake, T. Imura: Technology of improving press formability applying press motion control - Advanced multi-stage forming with servo press -, Proc. IDDRG2006, p.403-408
- (3) ASTM E328-02, Standard test methods for stress relaxation for materials and structures
- (4) 田川哲哉, 孕石泰丈, 南二三吉: 低炭素構造用鋼の応力緩和挙動, 溶接学会論文集, 第 29 巻, 第 1 号, p.48-54(2011)
- (5) 水林博: 非弾性, 材料強度の原子論, 丸善, p.71-88(1985)
- (6) C. minier and J. lauzier: Proc. Yamada Conf. Point Defects and Defects Interactions in Metals, Kyoto, (1981), Univ. Tokyo Press, Tokyo, (1982), p.749.
- (7) 日本鉄鋼連盟規格 JFS A 3011: 2008, 自動車用合金化溶融亜鉛めっき鋼板及び鋼帯
- (8) 日本工業規格 JIS Z 2201: 1980, 金属材料引張試験片

■ 著 者 ■



山下 裕之



上野 宏明



中井 浩之



檜垣 貴大