

# 高速変形域におけるバウシंगा効果の特性取得と 塑性加工の成形性に及ぼす影響

地方独立行政法人東京都立産業技術研究センター 研究開発本部 物理応用技術部 機械技術グループ  
副主任研究員 村岡 剛  
(2021年度 奨励研究助成 (若手研究者枠) AF-2021036-C2)

キーワード：バウシंगा効果，ひずみ速度，引張圧縮試験

## 1. 研究目的と背景

計算機の発展にともない、塑性加工においては、成形性の評価に数値解析による成形シミュレーションが頻繁に行われている。数値解析結果を定量的に評価するためには、適切な解析条件の入力が必要不可欠である。解析条件の中でも材料特性は、成形形状、応力・ひずみ分布、工具荷重など様々な評価指標に影響を及ぼす。

材料特性において、解析精度に影響を及ぼす重要な因子として、図1に示すバウシंगा効果とひずみ速度が挙げられる。バウシंगा効果は素材に一方方向の荷重を加え、塑性変形させた後に、逆方向に荷重を加えた際に、初めに降伏した時よりも降伏応力が低下する現象である<sup>1)</sup>。応力-ひずみ関係が材料の変形状態によって変化するため、解析精度に影響を及ぼす。また、金属材料は変形速度により変形抵抗が変化することが知られており<sup>2)</sup>、成形形状にも影響を及ぼす<sup>3)</sup>。そのため、材料のひずみ速度依存性も、数値解析上では解析結果に影響を及ぼす。

バウシंगा効果やひずみ速度を考慮した数値解析の研究はいくつか報告されている<sup>4,5)</sup>。特にバウシंगा効果を考慮したスプリングバックの予測には、移動硬化型の降伏関数が提案され、広く利用されている<sup>6)</sup>。しかしながら、多くの研究では、ひずみ速度の領域としては、図2<sup>7)</sup>の $10^{-4} \sim 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ の静的なひずみ速度によって得られた材料特性を利用しており、実加工にて利用されているひずみ速度の領域まで考慮されていない。材料特性を取得する研究においても、ひずみ速度を考慮してバウシंगा効果の特性を取得した例は、引張と圧縮を別々の装置によって測定した研究が一例<sup>8)</sup>報告されているのみである。

本研究では、ひずみ速度を考慮したバウシंगा効果の特性取得のために、(1) 万能試験機によるひずみ速度を考慮したバウシंगा効果の特性取得、(2) 高速引張圧縮試験装置の開発を行った。(1)では、市販の万能試験機を用いてひずみ速度毎に引張圧縮試験を行い、バウシंगा効果とひずみ速度の両方を考慮した材料特性の取得を試みた。(2)では、市販の万能試験機では測定困難な最大  $10^2 \text{ s}^{-1}$  程度までの高速度かつ荷重反転負荷機構を兼ね備えた専用の試験装置を開発することにより、高速度域でのバウシंगा効果の特性取得を試みた。

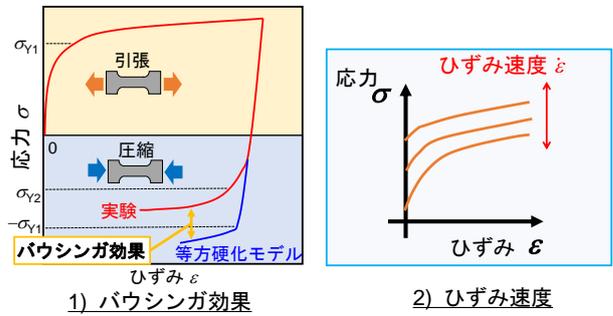


図1 バウシंगा効果およびひずみ速度の影響

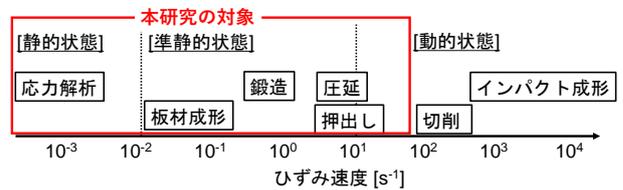


図2 塑性加工の数値解析におけるひずみ速度領域

## 2. 万能試験機を用いた引張圧縮試験

### 2.1 引張圧縮試験および試験条件

表1に引張・圧縮試験条件を示す。本試験では、供試材として、オーステナイト系ステンレス鋼 SUS304 の板材を用いた。引張圧縮試験には、万能試験機「AllroundLine Z100THW」(ZwickRoell 社製)を用いた。「AllroundLine Z100THW」は、試験片つかみ部が油圧式チャックになっており、試験中の試験片とつかみ部の滑りを防止できる。ひずみは、レーザー変位計を用いて試験片表面のひずみを測定した。試験では、ひずみ1%狙いで引張圧縮変形を制御した。標点間距離は10 mmとし、最速0.5 mm/sまでの試験速度にて実施した。なお、0.5 mm/sよりも速い試験速度も実施したが、レーザー変位計および試験装置の制御の都合により、試験を実施することができなかった。

試験片形状、座屈抑制治具および試験機外観を図3、図4および図5に示す。引張圧縮試験では、圧縮変形中に試験片が座屈を生じる可能性があり、座屈により正確な応力-ひずみ関係が測定できなくなる。座屈の防止には様々な手法が用いられているが、本研究では、先行研究<sup>9)</sup>を参考に試験片と治具の間に微小な隙間を設ける隙間型の治

具を用いた。試験片をはさみこむように治具を配置し、治具間にワッシャーを入れることにより、隙間を固定した。ワッシャーは1.9 mmの厚さを用意し、実板厚から0.02mmの治具と隙間が存在する状態とした。試験中のクロスヘッドの移動のために、治具により試験片が拘束されていない箇所が存在するが、非拘束箇所では試験片の幅を大きくすることにより、座屈を抑制した。治具には、レーザー変位計にてひずみ測定ができるように測定用の窓を設けた。

表 1 試験条件

材料	SUS304 (JIS)
製造工程	冷間圧延 → 焼鈍 → 酸洗 → 調質圧延
板厚 $t_0$ / mm	2 (実厚さ 1.88)
試験装置	AllroundLine Z100 THW
標点間距離 $l_0$ / mm	10
試験速度 $v_f$ / mm·s <sup>-1</sup> (公称ひずみ速度 $\dot{\epsilon}_n$ / s <sup>-1</sup> )	0.0015, 0.015, 0.15, 0.5 (0.00015, 0.0015, 0.015, 0.05)
目標ひずみ / %	1
荷重測定	ロードセル
ひずみ想定	レーザー変位計
座屈防止方法	隙間法
隙間 $G$ / mm	0.02

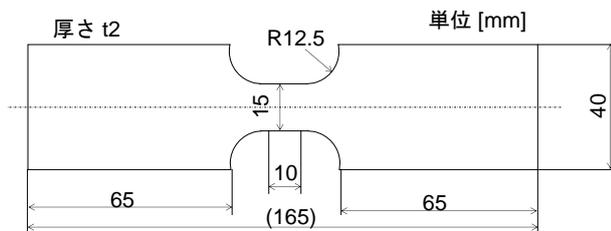


図 3 試験片形状

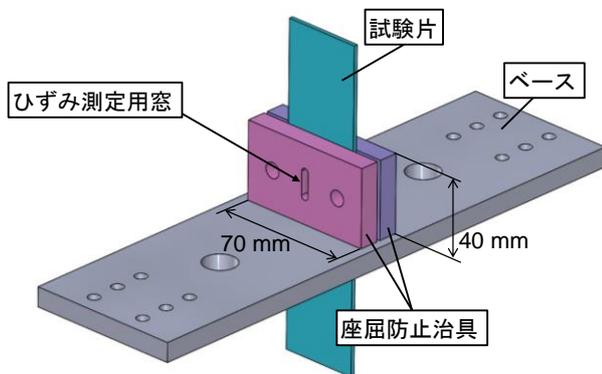


図 4 座屈抑制治具

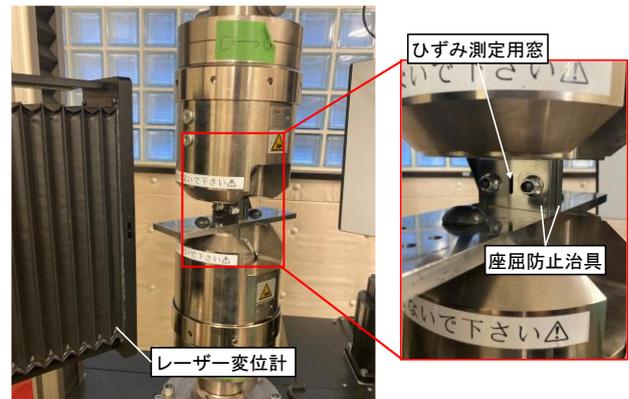


図 5 試験機外観

## 2・2 試験結果

引張圧縮試験によって得られた公称応力-公称ひずみ線図を図 6 に示す。試験速度が速いほど、変形抵抗が増加していることがわかる。反転負荷時の変形抵抗についても、試験速度が速いほど増加している。したがって、ひずみ速度が反転負荷時の降伏応力にも影響を及ぼすことがわかった。

引張圧縮試験では、試験中に試験速度は一定で制御されているが、実際に試験片に生じるひずみの割合は試験中に変化するため、ひずみ速度も試験中に変化する。そこで、取得した応力-ひずみ関係について、代表的なひずみ速度を求めるために、本研究では、次の通りひずみ速度を算出した。まず、引張圧縮試験により得られた公称ひずみ-試験時間の測定データから、相当塑性ひずみ-試験時間の関係を求めた。次に試験開始から引張変形によりひずみ 1% まで変形した際の相当塑性ひずみ-試験時間の関係の傾きから相当塑性ひずみ速度を算出した。試験速度と対応する算出した相当塑性ひずみ速度を表 2 に示す。最速で 0.016 s<sup>-1</sup> の準静的なひずみ速度を有する応力-ひずみ関係を得ることができた。しかしながら、0.1 s<sup>-1</sup> 程度までのひずみ速度の取得は困難であった。本研究では、試験結果に影響を及ぼさないようにレーザー変位計による非接触にてひずみの取得を行ったが、試験速度が速い場合、レーザー変位計と試験機の制御が対応できなくなるため、試験が困難であった。

各応力-ひずみ関係を用いて、0.2%耐力から図 1 に記載した初期の降伏応力  $\sigma_{Y1}$  および反転時の降伏応力  $\sigma_{Y2}$  を求めた。図 7 に各相当塑性ひずみ速度における降伏応力の関係性を示す。バウシング効果により反転時の降伏応力の絶対値  $|\sigma_{Y2}|$  はいずれも初期の降伏応力の絶対値  $|\sigma_{Y1}|$  より低い。また、ひずみ速度の増加にともない、反転時の降伏応力の絶対値  $|\sigma_{Y2}|$  は増加する。

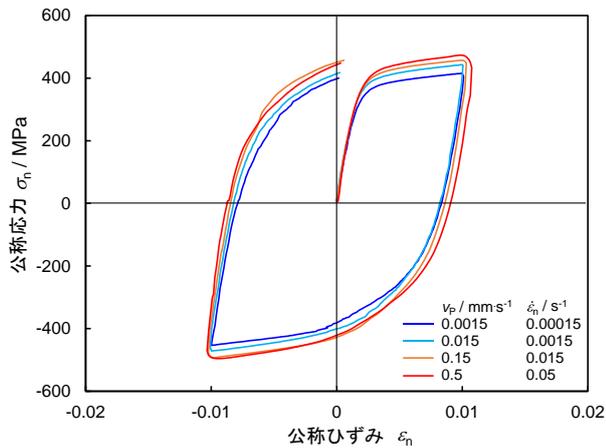


図6 ひずみ速度を考慮した公称応力-ひずみ線図

表2 相当塑性ひずみ速度の換算結果

試験速度 $v_t / \text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$	公称ひずみ速度 $\dot{\epsilon}_n / \text{s}^{-1}$	相当塑性ひずみ速度 $\dot{\epsilon}_p / \text{s}^{-1}$
0.0015	0.00015	0.00007
0.015	0.0015	0.0050
0.15	0.015	0.058
0.5	0.05	0.16

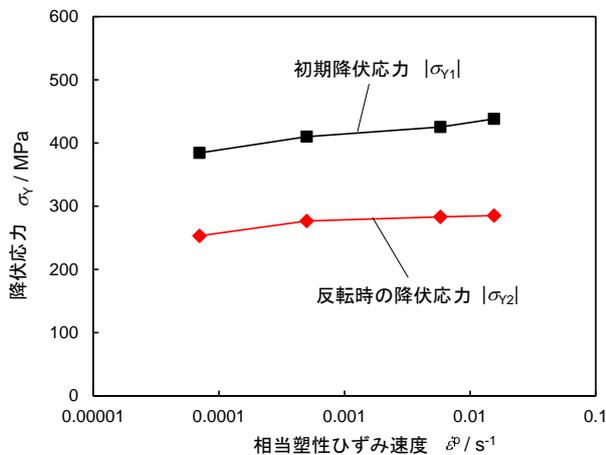


図7 降伏応力に及ぼすひずみ速度の影響

### 3. 高速引張圧縮試験装置の開発

#### 3-1 高速引張圧縮試験装置および試験条件

本研究では、市販の万能試験機では再現できないひずみ速度での試験を実施するために、特注のアクチュエータを使用し、引張圧縮試験を実施した。試験装置構成、装置外観、システム構成を図8、図9および図10に示す。アクチュエータには、電動油圧シリンダ e-Zero (株式会社南武製) を用いた。制御コントローラに指令を与え、シリンダを動作させた。ひずみは、ひずみゲージからブリッジボックス、シグナルコンディショナ、センサインターフェース (全て株式会社共和電業製) を介して電圧を変換し、シリンダから出力された荷重、位置 (速度) と共に、ロガーソフトウェアにより取得した。電動シリンダは最速 843 mm/s まで動作させることができる。標点間距離 10 mm とすると、公称ひずみ速度の範囲ではあるが、10 s<sup>-1</sup> 以上

の高速の試験が実施できる。速い試験速度では、加速度の影響により動作直後では目的の速度に達していない。そこで、図11に示す通り助走機構を設け、電動シリンダの設定速度通りに試験ができる状態とした。

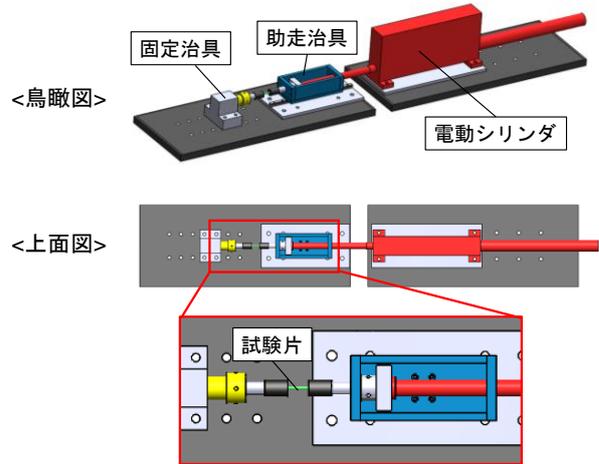


図8 装置構成

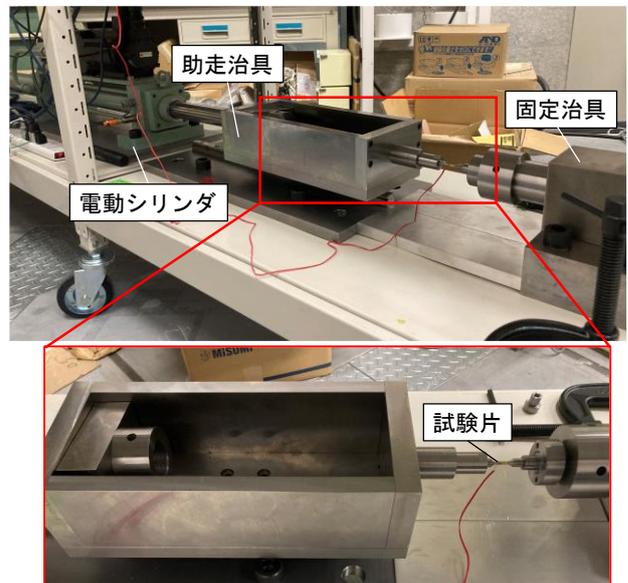


図9 試験機外観

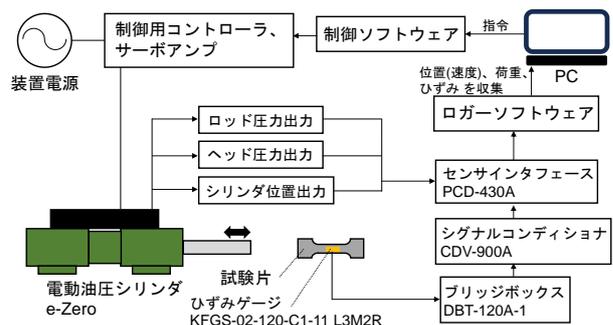


図10 システム構成

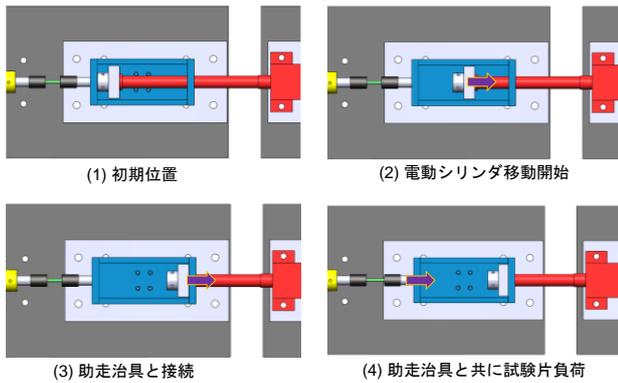


図 1.1 助走機構

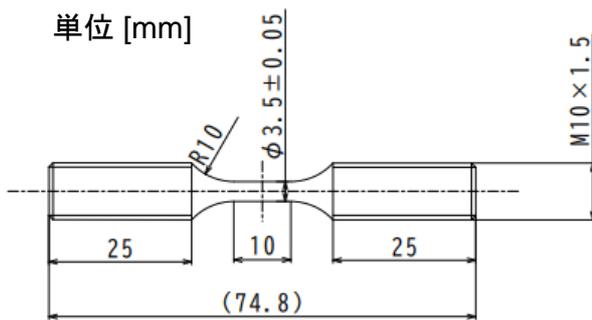
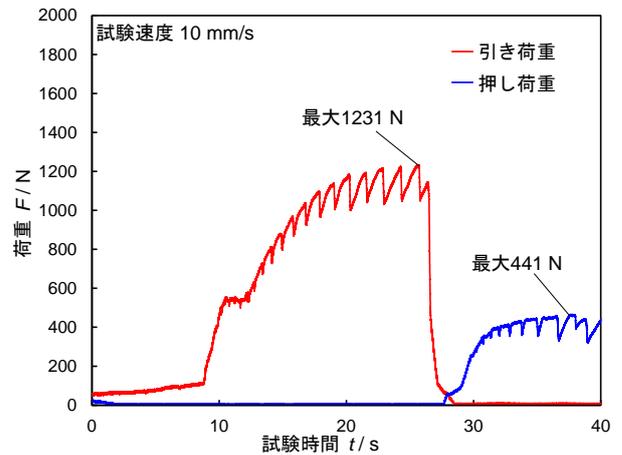


図 1.2 試験片形状

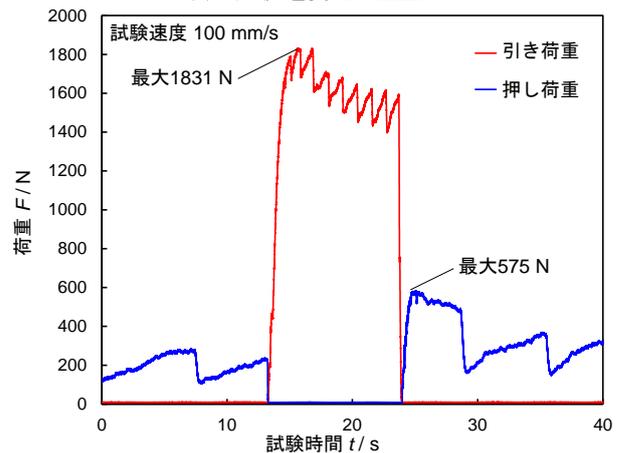
本試験装置を用いて、引張圧縮試験を実施した。試験片は、オーステナイトステンレス鋼の SUS304 の棒材を用いた。試験片形状を図 1.2 に示す。つかみ部は、試験中の滑りを防止するためにねじ式とした。試験は試験速度 10 mm/s と 100 mm/s にて行い、電動シリンダを一定距離まで移動させ、試験片に引張荷重を与えた後に、電動シリンダを初期位置に戻すことにより圧縮荷重を与えた。

### 3.2 試験結果

試験結果を図 1.3 に示す。縦軸はシリンダ荷重、横軸は試験時間である。試験速度が速い方が試験荷重は高く、材料の降伏応力が高くなっていると考えられる。また、初期降伏時の荷重である引き荷重よりも反転負荷後の押し荷重の方が低く、バウシンガ効果の影響が表れていると考えられる。しかしながら、試験結果から応力-ひずみ関係や降伏応力の明確な測定は困難であった。理由としては、試験装置全体の剛性が低く、試験結果が装置全体の变形も含んでしまっていること、試験自体の真直性が保たれておらず、試験片に曲げ荷重が加わってしまったことなどが挙げられる。これらを解決するために、試験機全体の補強や試験片の曲がり、座屈防止の治具などが必要である。



(a) 試験速度 10 mm/s



(b) 試験速度 100 mm/s

図 1.3 高速引張圧縮試験結果

## 4. 結言

本研究では、ひずみ速度を考慮したバウシンガ効果の特性取得のために、万能試験機による引張圧縮試験および電動油圧シリンダを用いた高速引張圧縮装置を開発し、試験を試みた。結果を以下に示す。

- 座屈防止治具を用いることにより、相当塑性ひずみ速度  $0.016 \text{ s}^{-1}$  程度までの引張圧縮試験による応力-ひずみ関係を得ることができた。
- 反転負荷時の降伏応力は、ひずみ速度が速いほど増加するが、線形的に増加しなかった。したがって、降伏応力の低下度合はひずみ速度毎に変化すると考えられる。
- 高速引張圧縮試験装置を設計製作し、実験を行った。試験速度が速くなるほど、荷重が高くなることを確認した。今後、装置全体の剛性向上や試験精度向上のための治具を製作し、高速域のバウシンガ効果の取得を目指す。

## 謝 辞

本研究の実施にあたり、公益財団法人天田財団の奨励研究助成（若手研究者枠）を賜りました。ここに深く感謝の意を表します。また、研究の遂行にあたり、電気通信大学の久保木教授、梶川准教授にはご助言および装置を貸与いただきました。ここに感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) Roostaei, A. A., Jahed, H. (2022), “Experimental observations in cyclic loading of metals”, *Cyclic Plasticity of Metals*, pp. 3-22, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819293-1.00010-3>.
- 2) Paul, S. K., Raj A., Biswas, P., Manikandan, G., Verma, R. K. (2014), “Tensile flow behavior of ultra low carbon, low carbon and micro alloyed steel sheets for auto application under low to intermediate strain rate”, *Materials and Design*, Vol. 57, pp. 211-217, <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2013.12.047>.
- 3) Krinninger, M., Opritescu, D., Golle R., Volk, W. (2016), “Experimental investigation of the influence of punch velocity on the springback behavior and the flat length in free bending”, *Procedia CIRP*, Vol. 41, pp. 1066-1071, <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.12.137>.
- 4) Prakash, V., Kumar, R. D. (2019), “Numerical Simulation Of Warm Deep Drawing Incorporating Strain Rate Effect In Sheet Material Properties”, *materialstoday: PROCEEDINGS*, Vol. 18 Part 7, pp. 2595-2602, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.07.118>.
- 5) Iwata, T., Iwata, N., Hotta, S., Suzuki, T., Suzuki, K., Kuriyama, Y. (2015), “Material Model Incorporating Strain Rate and Sheet Metal Forming Analysis Under Slide Motion”, *JSTP*, Vol. 56 No. 658, pp. 993-998, <https://doi.org/10.9773/sosei.56.993>.
- 6) Yoshida, F., Uemori, T. (2003), “A model of large-strain cyclic plasticity and its application to springback simulation”, *Int. J. Mech Sci.*, Vol. 45 No. 10, pp. 1687-1702, <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.233-236.47>.
- 7) Japan Society for Technology of Plasticity (2018), “Forging Technology -Toward Products with Net Shape and High Function-”, CORONA PUBLISHING CO., LTD., Tokyo Japan, pp. 391-393.
- 8) Watanabe, K., Yoshihara, Natori, K., Tanaka, T., Imaida, Y. (2010), “Strain rate dependence on Bauschinger effect in dual phase steel sheet”, *JSTP*, Vol. 51 No. 594, pp. 674-679, <https://doi.org/10.9773/sosei.51.674>.
- 9) Silvestre, E., Mendiguren, J., Galdos, L., Argandoña, S. E. (2015), “Comparison of the hardening behaviour of different steel families: from Mild and Stainless Steel to Advanced High Strength Steels”, *Int. J. Mech. Sciences*, Vol. 101-102, pp. 10-20, <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2015.07.013>.