

金属粘塑性現象の解明

高村 正人^{*}, 村澤 皓大^{**}, 楠田 義徳^{***}, 鈴木 進補^{***}, 池田 義雅^{*}, 須長 秀行^{*}, 大竹 淑恵^{*}

^{*}理化学研究所 光量子工学研究領域 光量子技術基盤開発グループ 中性子ビーム技術開発チーム,

^{**}早稲田大学 基幹理工学研究科, ^{***}早稲田大学 基幹理工学部

takamura@riken.jp

1. はじめに

自動車車体軽量化の要請から、高張力鋼板の適用拡大が進んでいる。高張力鋼板は難成形材料であるため、適用拡大のためには成形技術の高度化が不可欠である。これに対して、近年普及しているサーボプレスを活用して、加工時のひずみ速度を最適制御することにより、成形限界の向上やスプリングバックの低減を図ることなどが、有力な手段の一つとされている。材料の基礎特性、特に塑性変形時の流動応力のひずみ速度依存性、すなわち粘塑性特性に基づいた成形性改善メカニズムは必ずしも十分解明されていない^{1), 2)}。

また、製品の遅れ破壊や疲労破壊の可能性を評価、対策するためには、塑性加工後の残留応力を精度良く予測することが重要である。その際、材料の粘塑性特性により、加工速度や加工完了後の保持時間が残留応力に影響する。このため、塑性加工過程における成形性だけでなく、疲労寿命などを中心とした製品性能の予測、評価、対策においても、材料の粘塑性特性を理解することは極めて重要である。

流動応力のひずみ速度依存性、応力緩和特性、クリープ特性の一部などは「粘塑性特性」としてすべて同一のメカニズムから発現している現象と考えられる。しかしながら、それらを統一的に議論し、統一的な力学モデルの構築を試みた例は極めて少ない。このため、成形中、成形後を含めた応力の時間変化を追跡するシミュレーションが不可能である。

これまで筆者らは、応力緩和のメカニズム解明を中心に、上記問題に取り組んできた^{3), 4)}。本稿では、応力緩和を考慮した薄鋼板成形解析事例、材料試験を中心とした応力緩和メカニズムに関する検討結果を述べるとともに、中性子回折を活用した今後の取り組みの展望についても述べる。

2. 応力緩和を考慮した薄鋼板成形解析事例³⁾

本研究では、サーボプレスによるステップモーションのスライド停止時における応力緩和挙動、及びスライド速度の影響を考慮するために、式(1)に示すNortonのクリープ則を、静的陽解法弾塑性FEMソフトウェア「Stamp3D⁵⁾」に導入した。

$$\dot{\epsilon}^{cr} = A\bar{\sigma}^M \quad (1)$$

ここで、 $\dot{\epsilon}^{cr}$ は相当クリープひずみ速度、 $\bar{\sigma}$ は相当応力、 A 及び M はクリープ挙動に関する材料定数である。

式(1)から有限時間増分に対するクリープ応力増分が、

$$\Delta\sigma^{cr} = \mathbf{D}^e : \Delta\boldsymbol{\varepsilon}^{cr} \quad (2)$$

のように求まる。ただし、 \mathbf{D}^e は弾性の構成テンソルである。これを用いて応力値を修正し、生じた不釣り合い力を後続の時間増分において消去するアルゴリズム⁶⁾を適用した。このモデルにより、加工中に塑性変形と同時にクリープが進行する効果によって応力緩和挙動と流動応力のひずみ速度依存性を同時に表現することを試みた。

Table 1に、引張試験、応力緩和試験から同定した材料パラメータを示す。

Norton		Swift*		
A [MPa ^{-M} · s ⁻¹]	M	C [MPa]	n	ε_0
1.0×10^{226}	80	1350	0.4	8.3075×10^4

*Approximated by $\sigma = C(\varepsilon_0 + \bar{\varepsilon}^p)^n$

Fig. 1に、本研究で用いた絞り成形品形状を示す。絞り深さは53.8mmである。材料は、前章と同様の590MPa級のDual Phase鋼板（板厚1.2mm）とした。

Fig. 2に実験で用いたスライドモーションカーブを示す。SPM=6程度に相当するクランクモーション(a)、及び相似形のまま5倍の速度にしたもの(b)の、計2条件を用いて成形を行った。

一方、FEM解析においては、前々章で述べたアルゴリズム及びTable 1のパラメータを採用し、(a)と(b)の各スライドモーションに相当する条件で解析を実施した。

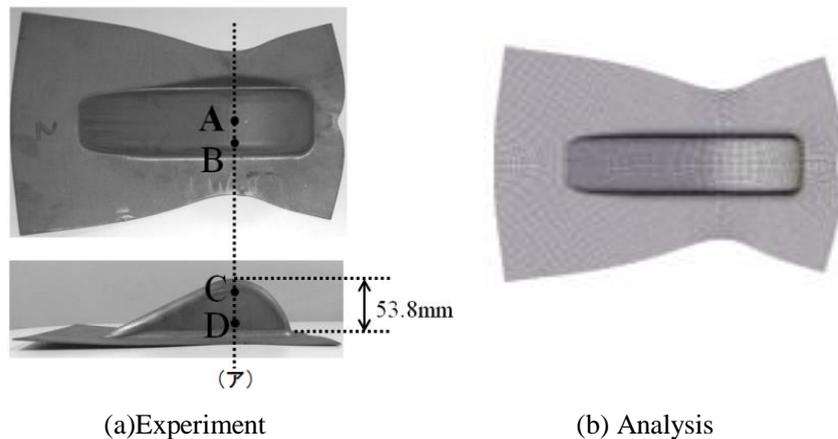


Fig. 1 Formed shape in drawing tests³⁾

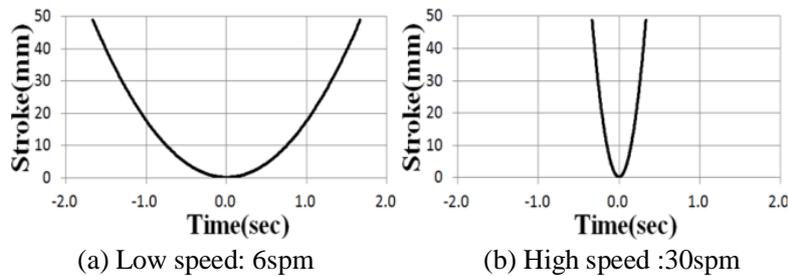


Fig. 2 Slide motion profiles³⁾

各条件に対するワレ（ネッキング）発生の有無をTable 2に、成形品，及びFEM解析結果から得られた板厚分布の比較をFig. 3にそれぞれ示す．板厚は，Fig. 1(a)の（ア）で示した位置で計測した．点Aを原点として点Dまでの成形品形状の面沿い位置をグラフの横軸とし，板厚減少率を縦軸として解析結果と比較した．

Table 2 Experimental results – occurrence of crack

Motion curve	spm = 6 (Fig. 2(a))	spm=30 (Fig. 2(b))
Result	× Crack	○ Good

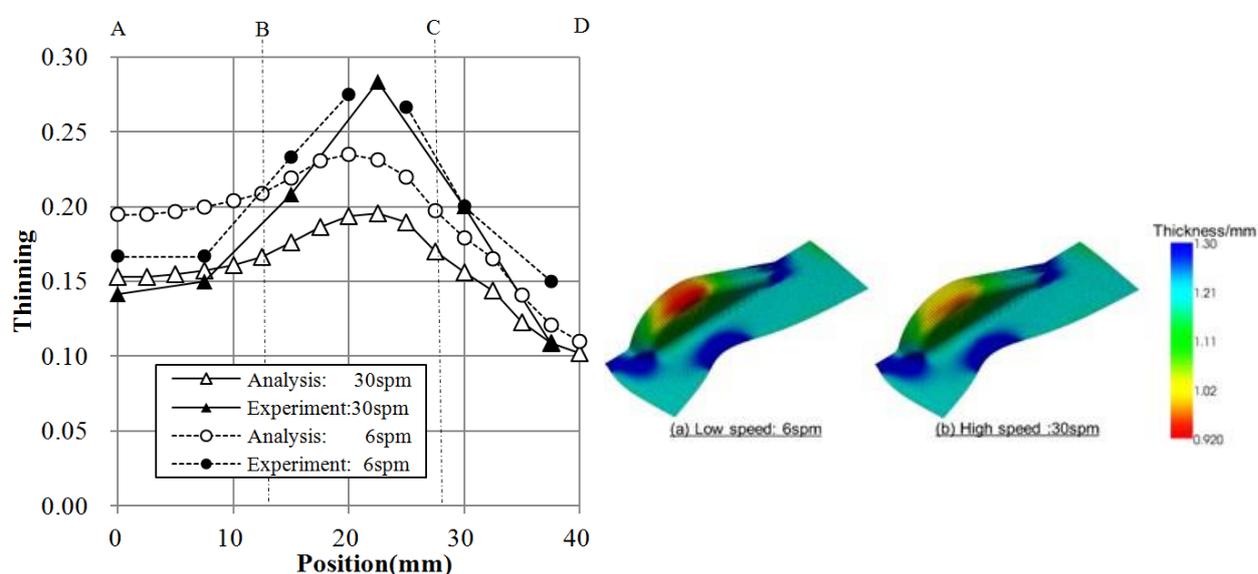


Fig. 3 Comparison of thinning obtained at different slide speeds³⁾

Fig. 3において板厚減少率が最大となっている部位（position=22mm付近）が，スライドモーション(a)における破断発生位置である．局所的な板厚減少率ピーク値については，実験と解析との間で差異がある（破断部位については比較不可）ものの，成形速度が大きいほど板厚減少が緩和される傾向にあることが，実験及び解析結果の双方に明確に表れていることがわかる．

従って，成形シミュレーションにより応力緩和を考慮することによってひずみ速度依存性を表現することで，実験における成形速度依存の成形限界が予測できる可能性があることが示唆された．

3. ひずみ速度感受性指数による応力緩和挙動のモデル化⁷⁾

ひずみ速度感受性指数 m 値により引張変形挙動のひずみ速度依存性を表現できる m 乗則の式（式（3））に着目した．ここでは m 乗則に基づいた応力緩和挙動および引張変形挙動を統一的に表現する構成式の構築，および応力緩和現象の究明を目的として実験を行った．

$$\sigma = \sigma_i(\varepsilon) + B\dot{\varepsilon}_p^m \quad (3)$$

ここで、 $\sigma_i(\varepsilon)$ はひずみ ε における内部応力（非熱的応力）， $\dot{\varepsilon}_p$ は塑性ひずみ速度， B 及び m は材料定数である．式（3）に基づいて，引張試験における張力負荷後，クロスヘッド保持中の保持時間 t_H に対する，応力の推移を表すと，式（4）のようになる．

$$\sigma = \left[\frac{1-m}{m} E' B^{-\frac{1}{m}} t_H + (\sigma_0 - \sigma_i)^{-\frac{1-m}{m}} \right]^{-\frac{m}{1-m}} + \sigma_i \quad (4)$$

ここで， E' は試験機剛性を考慮した見かけの弾性率， σ_0 は，クロスヘッド保持開始時の流動応力である．

590MPa級高張力鋼板を用いてひずみ速度を $8.3 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ から $8.3 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ まで振った単軸引張試験を行い，その結果からひずみ5%において $m = 0.060$ ， $B = 125 \text{ MPa} \cdot \text{s}^m$ を得た．この値を式（4）に代入し，実験で得られた応力緩和曲線と比較した結果をFig. 4に示す．

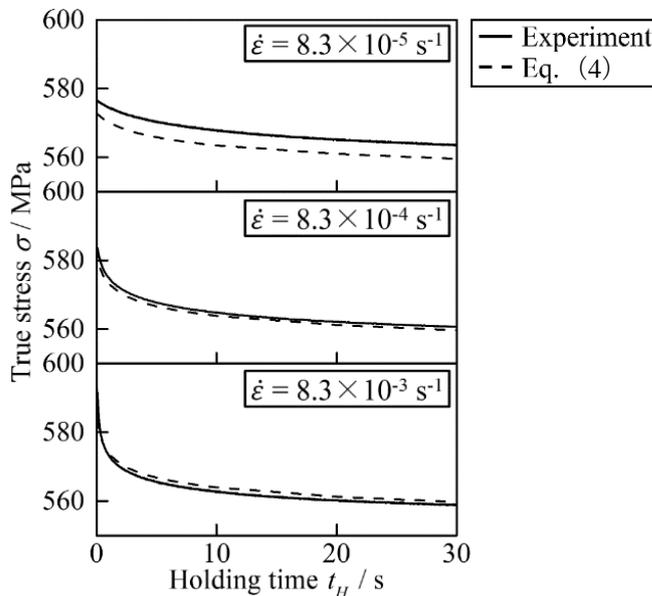


Fig. 4 Relationship between holding time and true stress for various strain rate⁷⁾

以上により，応力緩和と引張による塑性変形挙動を同一の構成式で表現できることがわかり，応力緩和は塑性変形の進展により発生する現象であることが示唆された．

4. 応力緩和メカニズムの探求

粘塑性現象は，可動転位の熱活性化過程に支配されていると考えられている．応力緩和過程においてもその仮説が成り立つことを検証するために，筆者らはJ-PARC 物質・生命科学実験施設にて応力緩和中にin-situの中性子回折を実施し，CMWP (Convolutional Multiple Whole Profile)⁸⁾による修正Williamson-Hall / Warren-Averbach法⁹⁾による，転位密度変化等の分析を実施中である．また，中性子回折と結晶塑性論との組み合わせにより，格子ひずみや集合組織が応力緩和中にどのように変化するかについて，解明していく計画である．

J-Parc MLF BL19（「匠」）における実験の様子を，Fig. 5に示す．

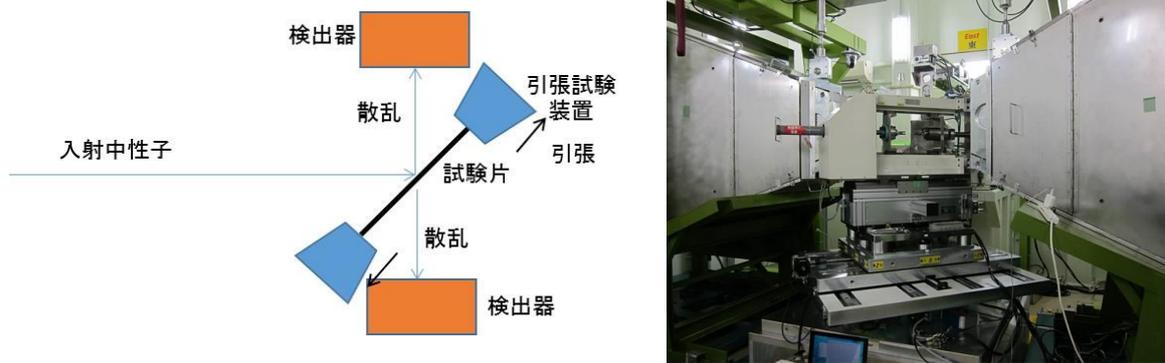


Fig. 5 Schematic view and photograph of experimental setup at J-PARC MLF BL19

5. まとめ

弾塑性有限要素法においてクリープの定式による粘塑性挙動を考慮することにより，サーボプレスによる加工速度制御技術のシミュレーション技術開発を試み，加工速度が成形限界に及ぼす影響を定性的に予測することができた．粘塑性現象を統一的に理解，モデル化するために，様々な引張速度で変形させた後の緩和過程の計測を進め，ひずみ速度感受性指数を用いた応力緩和過程のモデル化に成功した．今後は，中性子回折を用いた転位密度，格子ひずみ，集合組織変化の計測，及び結晶塑性解析と組み合わせ，応力緩和メカニズムの解明を進めていく．

謝辞

本研究は，京都大学 浜孝之准教授，東京都市大学 熊谷正芳講師，原子力研究開発機構 鈴木裕士氏のご指導，ご協力のもと推進されております．ここに感謝申し上げます．また，本稿に掲載した実験の一部は，大強度陽子加速器施設（J-PARC）物質・生命科学実験施設（MLF）BL19（「匠」）で実施されました．装置関係者の方々に感謝申し上げます．

参考文献

- 1) 中原：素形材，49-510，(2008-10)，1.
- 2) 山下ほか：平 24 塑加春講論，(2012)，107.
- 3) M. Takamura, et al., Key Eng. Mater., Vols. 554-557 (2013), 1331-1337.
- 4) K. Murasawa, et al., Key Eng. Mater., 716 (2016), 948-953.
- 5) Banu, M., et al., J. Material Process. Technol., 173-2 (2006-4), 178-184.
- 6) Takamura, M., et al., Proc. NUMISHEET 2002, (2002), 379-384.
- 7) 村澤ほか，第 67 回塑性加工連合講演会，(2016-10)，南埼玉郡，313-314.
- 8) G. Ribárik et al., Mat. Sci. Eng. A, 387-389 (2004), 343.
- 9) T. Ungár, Appl. Phys. Lett., 69 (1996), 3173.