

板材成形時の応力緩和挙動に粒界面積が及ぼす影響

早稲田大学 基幹理工学研究科
教授 鈴木 進補
(2019 年度 一般研究開発助成 AF-2019016-B2)

キーワード：板材成形，応力緩和，粒界面積

1. 研究の目的と背景

自動車産業では衝突安全性向上や低燃費化のために軽量化要求が高まり、比強度の高い高張力鋼板の利用が拡大している。しかしながら、強度と延性は相反する特性であるため加工による割れやスプリングバックの発生など成形不良が課題となっている。改善策として、サーボプレス機を用いた加工経路の工夫により成形性を向上できるという報告がある¹⁻³⁾。成形性向上の理由のひとつに応力緩和現象による塑性ひずみの分散が考えられている³⁾。応力緩和現象とは、成形中に金型を停止しひずみ一定で保持すると、時間の経過に伴い荷重が低減する現象である。図1の模式図のように応力緩和現象をFEMに組み込むことで、実成形における最適な加工経路をシミュレーションし、金型速度・金型停止位置・停止時間を適切に制御することで効率的な生産が可能になると考えられる。したがって、FEMに組み込む応力緩和挙動の定式化はサーボプレス機を用いたプレス成形性の大幅な向上に貢献できる。また、新たに要求された合金に対してもFEMにて最適な加工条件を見つけることが可能になると期待される。

応力緩和現象は転位運動の熱活性化過程に支配され、引張変形時の流動応力のひずみ速度・温度依存性に依存した関数として統一的に理解できる可能性がある。そこで、研究代表者を含むグループでは式(1)⁴⁾に示すKocks-Mecking(KM)モデルを用いて応力緩和現象の定式化を行ってきた⁵⁾。(2016年度一般研究開発助成AF-2016032)。

$$\frac{\sigma}{\mu} = \frac{\sigma_i}{\mu} + s_I(T, \dot{\epsilon}) \frac{\hat{\sigma}_I}{\mu_0} + s_D(T, \dot{\epsilon}) \frac{\hat{\sigma}_D}{\mu_0} \quad (1)$$

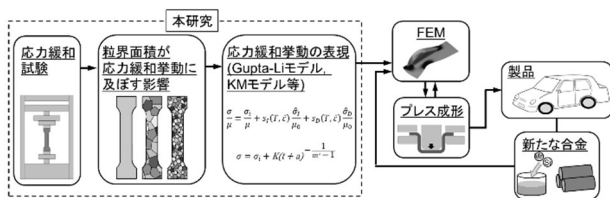


図1 研究の位置づけ

本モデルにおいて流動応力 σ は転位の運動を妨げる内部応力項(第一項)と固溶強化項(第二項)および加工硬化項(第三項)の重ね合わせとして表現される。しきい応力 $\hat{\sigma}$ は0 Kまたは $\dot{\epsilon} \rightarrow \infty$ での熱的応力を表し、 $\hat{\sigma}_D$ はひずみの関数として表される。 μ は剛性率、 μ_0 は0 Kでの剛性

率である。また s_I および s_D は式(2)の i をIおよびDに置き換えて表される。

$$s_i = \left[1 - \left(\frac{kT}{g_{oi}\mu b^3} \ln \frac{\dot{\epsilon}_{oi}}{\dot{\epsilon}} \right)^{\frac{1}{p_i}} q_i \right] \frac{1}{p_i} \quad (2)$$

k はボルツマン定数、 g_{oi} は規格化活性化エネルギー、 b はパーガスベクトルの大きさ、 $\dot{\epsilon}_{oi}$ は定数、 p_i 、 q_i は強化機構の種類による定数である。このようにKMモデルの各パラメータは物理的意味合いをもっているため、本モデルの発展により変形機構の本質的な理解が深まることが期待される。また、KMモデルでは引張試験の結果から様々な温度・ひずみ速度における応力緩和挙動の予測が可能であり、様々な加工条件でシミュレーションが可能になると期待される。図2に過去に報告⁵⁾した応力緩和挙動の実験値と、KMモデルにより求めた予測値を示す。実験値と予測値で近い挙動を示しており、引張試験から応力緩和挙動の予測が可能であることが示された。しかしながら、高い精度が求められるシミュレーションに適用するための予測精度の向上や、各因子の物理的な意味の詳細な検討が必要である。

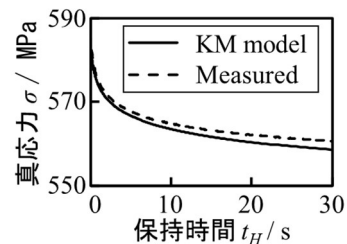


図2 KMモデルによる応力緩和挙動の予測⁵⁾

KMモデルの第一項である内部応力 σ_i は転位の運動を妨げる成分であり、図3のように転位の運動が強く妨げられる堆積転位や粒界の周辺では局所的な内部応力が大きくなる。KMモデルにおいて内部応力はひずみの関数として表現されており⁶⁾、塑性変形の進行に伴う転位密度の増加が考慮されているが粒界面積の影響は考慮されていない。内部応力は転位密度だけでなく結晶粒界にも依存することから、図3のように、単位体積当たりの粒界面積(以下粒界面積、 S_v)の増加にともない、内部応力も増加すると考えられるため、内部応力の粒界依存性に関する研究が必

要である。

結晶粒径が 1 μm 以下である超微細粒材は合金添加なしで強度と靱性を高くできるため資源循環材料として有望である⁷⁾。超微細粒材は、結晶粒径が 1 μm 以上の粗大粒材とは変形挙動が異なることが知られている。粗大粒材では粒内の転位による変形が支配的であるのに対し、超微細粒材では粒界が占める割合が増加し、粒界の転位源が主に変形を支配するためだと考えられている⁸⁾。一方、単結晶材については航空機のタービン翼にも使われ始め、今後用途の多様化する可能性も考えられる。粒界のない単結晶においては、転位は結晶粒界の影響を受けないため粗大粒材と変形メカニズムが異なる。したがって、粗大粒材に加えて今後加工の多様化が予想される単結晶材や超微細粒材も含めて包括的に応力緩和挙動を把握する必要がある。

転位運動に影響を与える因子のひとつに結晶粒径 d が挙げられるため、粒界は応力緩和挙動に影響を与える因子のひとつと言える。引張過程における粒界の影響については、流動応力が $d^{1/2}$ に対して線形的に増加する Hall-Petch(H-P)則が広く知られている。従来は $d \geq$ 数十 μm の範囲における粗大粒材で研究されていたが、近年では $d \leq$ 1 μm の超微細粒材が開発され実験可能となった。超微細粒材は結晶粒内に対する粒界の割合が多いことから、粒界すべりの発現⁹⁾や流動応力が H-P 則に沿わない¹⁰⁾など超微細粒特有の現象が報告されている。また、粒界のない単結晶に関しては引張方位によって加工硬化挙動が異なると報告されている¹¹⁾。一方、応力緩和挙動については単結晶から超微細粒の広い範囲における評価が行われていない。

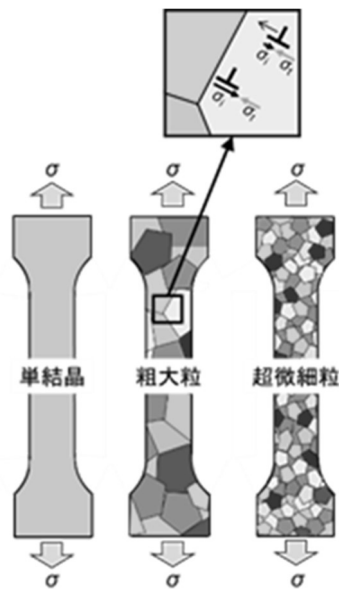


図 3 各材料における材料内部の概略図

そこで、粒径が応力緩和挙動に与える影響を定量的に明らかにし、粒界が応力緩和挙動に影響を与えるメカニズム

を解明することを目的とする。本研究では粒径の影響を評価するために、粒径と 1 対 1 の対応関係をもつ粒界面積 S_V をパラメータに用いて評価する。熱処理にて粒界面積を様々に振った粗大粒材に加え超微細粒材、単結晶材の引張試験片を用いて応力緩和試験を行う。本実験により、粒界が応力緩和現象に及ぼす影響を知ることができることに加えて、超微細粒材や単結晶材と極端な粒界面積における応力緩和挙動を包括的にとらえることができる。将来的には、これらの知見を FEM に組み込み、精度の高いシミュレーション活用による材料組織に適した加工実施の一助になると期待できる。

2. 実験方法

固溶原子や析出物の影響を排除するために純銅を供試材とした。図 4 に各実験試料の作製条件、試験片概略を示す。

単結晶材は Bridgman 法により作製されたものを用い、超微細粒材は 2 サイクルの繰り返し重ね接合圧延¹¹⁾により作製されたもの (ARB 材) を用いた。粗大粒材は 7 つの条件 (300 $^{\circ}\text{C}$ -25200s, 600 $^{\circ}\text{C}$ -2400s, 5400s, 25200s, 800 $^{\circ}\text{C}$ -2400s, 5400s, 2520 s) で熱処理を施した。これら 9 種類の試料について、応力緩和挙動を明らかにする目的で引張試験を行った。両試験は万能試験機を用いて行った。引張試験片は JIS-14B 号 (単結晶材, 粗大粒材) と JIS-13B 号 (ARB 材) を用い、単結晶材の引張方位は $\langle 100 \rangle$ とした。応力緩和試験はクロスヘッド速度 2.82 $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ (ARB 材は 5.04 $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$) で公称ひずみ 0.07 (ARB 材は 0.015) まで引張り、その後 100 s 間ひずみを一定に保持し、荷重の時間変化を測定した。引張試験は応力緩和試験と同様のクロスヘッド速度で引張り、応力緩和試験の保持ひずみに達した時点で除荷した。また、 S_V と HV は引張試験後の試験片から取得した。 S_V は切断法にて測定し、 HV はマイクロピッカース硬さ試験機で結晶粒内に圧痕を打ち取得した。ただし、ARB 材はナノインデンテーションにより HV を取得した。




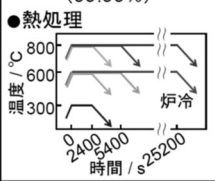
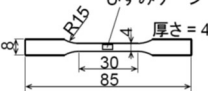
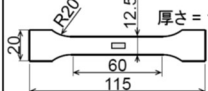
S_V			
試料	単結晶材 純銅 (99.9999%) ●作製法 Bridgman法 ●引張方位 $\langle 100 \rangle$	粗大粒材 純銅 (99.99%) ●熱処理 	超微細粒材 純銅 (99.99%) ●結晶粒微細化 繰り返し重ね接合圧延 (ARB)
試験片	JIS 14B号 	JIS 13B号 	

図 4 各実験試料の作製条件、試験片概略

3. 実験成果

図5に各試料の S_V と HV の関係を示す。ここで、全試料の HV は標準偏差の範囲内に分布しているため、結晶粒内の組織が応力緩和挙動に与える影響は全試料で同程度であると判断した。

まず、応力緩和挙動初期を評価するために $t_H = 0.2$ sの応力緩和速度 $\dot{\sigma}_{0.2s}$ を取得した。図6には一例として単結晶材における $\dot{\sigma}$ の時間変化を示している。各 S_V の $\dot{\sigma}_{0.2s}$ を図7に示す。単結晶を除いた S_V 範囲では、 S_V の増加に伴い $\dot{\sigma}_{0.2s}$ は増加した。さらに、 $\sqrt{S_V} \leq 10$ mm^{-1/2}では線形傾向を示したがARB材は線形傾向を下回った。転位が掃いた面積の指標となる活性化体積 V^* を各試料で算出したところ、 $\sqrt{S_V} \leq 10$ mm^{-1/2}では466~843 b^3 であったが、ARB材は133 b^3 と顕著に小さい値を示した。ただし、 b はバーガースベクトルの大きさである。 $\dot{\sigma}_{0.2s}$ と V^* の検討よりARB材は転位運動以外の要因によって応力が低下したと言え、粒界すべりの発生が線形傾向を下回った要因のひとつと考えられる。

続いて、応力緩和の終着応力である内部応力 σ_i を評価した。各 S_V の σ_i は式(3)に示すGLモデル¹³⁾を応力緩和試験の結果にフィットすることで取得した。

$$\sigma = \sigma_i + \{k(m^* - 1)(t_H + a)\}^{-\frac{1}{m^* - 1}} \quad (3)$$

ここで k は、試験機系弾性定数 E_0 、幾何学因子 ϕ 、 b 、転位の易動度 B 、可動転位密度 ρ_m を掛けた値である。 m^* は転位速度-応力指数、 a は積分定数である。図8に示す通り、単結晶を除いた S_V 範囲で σ_i は S_V の増加に伴い増加した。単結晶の σ_i が高いのは銅単結晶の引張方位<100>では多重すべりにより加工硬化が大きい¹³⁾ためと考えられ、単結晶は S_V よりも引張方位の影響が強いことが示唆された。さらに粗大粒材の範囲ではH-P則に沿い、その傾きは(保持開始応力)-($\sqrt{S_V}$)グラフの傾きと同等であった。また、ARB材はH-P則を下回った。粒内の転位源が枯渇し、転位の堆積が抑制されたためと考えられる。

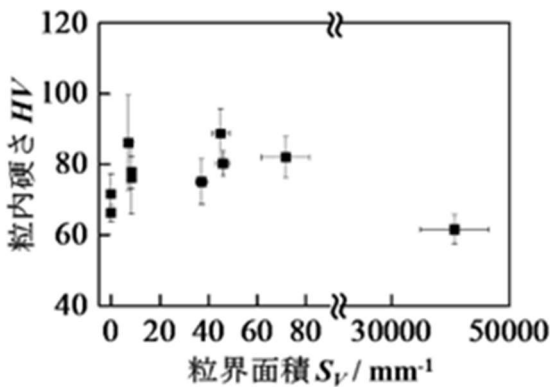


図5 粒界面積と硬さの関係

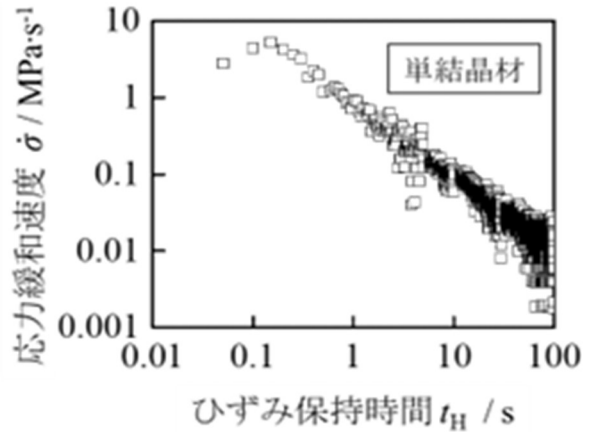


図6 応力緩和速度 $\dot{\sigma}$ の時間変化

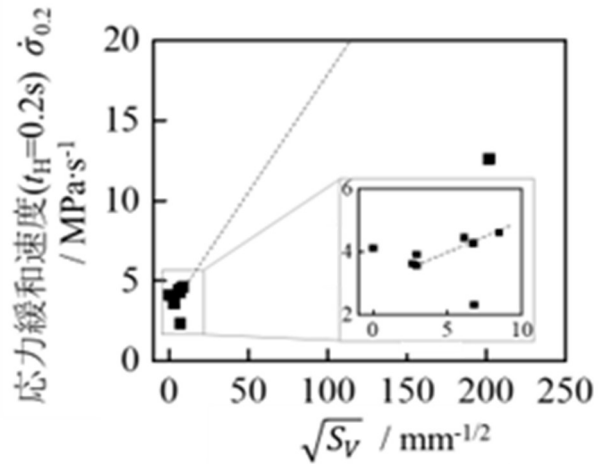


図7 $\sqrt{S_V}$ と $\dot{\sigma}_{0.2s}$ との関係

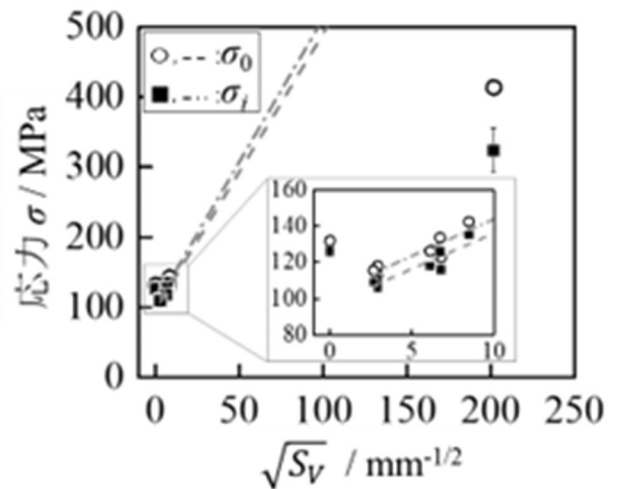


図8 $\sqrt{S_V}$ と σ_i との関係

4. 結言

・粒界面積の増加に伴い、応力緩和速度と内部応力は増加する。ただし<100>単結晶では引張方位の影響の方が大きく多重すべりにより加工硬化が大きくなり、他の粒界面積範囲における応力緩和速度、内部応力の増加傾向よりも高い値を示す。

・上記の増加傾向に関して、粗大粒材の範囲では応力緩和速度と内部応力は $\sqrt{S_V}$ に対し線形的に増加する。ただし粒界すべりや転位源の枯渇が生じる超微細粒材の範囲では線形傾向を下回る。

本研究および 2016 年度一般研究開発助成 AF-2016032 を通じた結果を、3 件の査読付き投稿論文¹⁵⁻¹⁷⁾として発表した。

謝 辞

本研究は、公益財団法人天田財団 2019 年度一般研究開発助成 (AF-2019016-B2) のご支援を受け実施いたしました。ここに謝意を表します。本研究を遂行するにあたり、多大な貢献をいただきました早稲田大学 大学院生 (当時) 鈴木優里菜氏、共同研究者の理化学研究所 高村正人博士 (早大客員教授)、大竹淑恵博士、池田義雅博士、京都大学大学院 浜 孝之教授、岐阜大学 箱山智之助教、ならびに日本製鉄株式会社 村澤皓大氏、早稲田大学 大学院生 (当時) 上野孝太氏、楠田義徳氏、銅試料をご提供いただきました三菱伸銅株式会社に厚く御礼申し上げます。

参考文献

1) 玉井良清・稲積透・真鍋健一：塑性と加工，55-636(2014)，28.

- 2) 菅沼俊治：塑性と加工，49-565(2008)，118.
- 3) 山下裕之・上野宏明・中井浩之・檜垣貴大：Honda R&D Tech. Rev., 24(2012), 142.
- 4) P. S. Follansbee and G. T. Gray: Metall. Trans. A, 20(1989), 863.
- 5) 村澤皓大・楠田義徳・鈴木優里菜・大竹淑恵・高村正人・池田義雅・鈴木進補：第 68 回塑性加工連合講演会 講演論文集(2017)，227.
- 6) 土田紀之・ステファヌス ハルヨ・大貫貴久・友田陽：鉄と鋼，100(2014)，1191.
- 7) 鳥塚史郎：Sanyo Technical Report, 23(2016), 9.
- 8) S. Cheng・J.A. Spenser・W.W. Milligan：Acta Mater., 51(2003), 4505.
- 9) M.S.Mohebbi・A.Akbarzadeh・Y-O.Yoon・S-K. Kim：Mech. Mater., 89(2015), 23.
- 10) M. A. Meyers・A.Mishra・D.J.Benson：Prog. Mater. Sci., 51(2006), 427.
- 11) M. Tagami・K. Kashiwara・T. Okada・F. Inoko：J. Japan Inst. Met. Mater., 64(2000), 535.
- 12) Y. Saito・H. Utsunomiya・N. Tsuji・T. Sakai：Scr. Mater., 39(1998)，1221.
- 13) I. Gupta・J. C. M. Li：Metall. Trans., 1(1970) 2323.
- 14) T.Okada・M.Utani・A.Osue・N.Fujii・M.Tagami・F.Inoko：Mater. Trans., 46(2005)，602.
- 15) Y.Suzuki・K.Ueno・K.Murasawa・Y. Kusuda・M. Takamura・T. Hakoyama・T.Hama・S.Suzuki：Mater. Sci. Eng. A, 794(2020), 139585.
- 16) 上野孝太・村澤皓大・鈴木優里菜・高村正人・浜 孝之・箱山智之・鈴木進補：日本金属学会誌, 84(2020), 326.
- 17) K.Murasawa, K.Ueno, Y.Kusuda, M.Takamura, T.Hama, T.Hakoyama, S.Suzuki：ISIJ Int., 62(2022), 1004.