

(論文)

アルミニウム合金製鍛造サスペンション部材のひずみ状態の評価

Evaluation of Strain Distribution in Forged Suspensions of Aluminum Alloy



細井寛哲*¹
Hiroaki HOSOI



小西晴之*¹ (博士(工学))
Dr. Haruyuki KONISHI



岡田慶太*²
Keita OKADA



住本啓行*³
Hiroyuki SUMIMOTO

The process of verifying simulation accuracy is indispensable for utilizing hot-forging simulation to shorten the development time of complex-shaped forged aluminum suspension parts. Therefore, a study has been conducted on a forged aluminum suspension part made from a billet in which multiple round aluminum bars of a small diameter are embedded. The change in the cross-sectional dimensions of the small-diameter round bars was examined. The total strain theory has been adapted to calculate the equivalent plastic strain, ϵ_p , in order to evaluate simulation accuracy. The interfaces between the round bars and matrix were clear at each process step, enabling the evaluation of the strain states. The value of ϵ_p has turned out not necessarily to increase between the rough shape and the final shape, indicating that there are complicated strain paths including the reverse of incremental strain. Although the ϵ_p values obtained in numerical simulation are slightly lower than the experimental values, a strong correlation has been found between the two values. This technique has been proved adaptable for experimentally determining the strain distribution in a forged aluminum suspension part and enabling the reliability validation of the numerical simulation.

まえがき = 世界各国での燃費規制の強化を背景に自動車の軽量化が本格化しており、比強度とコストに優れたアルミニウム合金（以下、アルミ合金という）の自動車部材への採用が増加している。なかでも、重要保安部品であるサスペンション部材には、機械的性質や形状自由度に優れた6000系アルミ合金を用いた鍛造品（以下、アルミ鍛造サスペンション部材という）が多く採用されている。

アルミ鍛造サスペンション部材は一般的に、単純な丸棒形状を熱間温度域で2～4回程度連続的に鍛造し、所定の熱処理と機械加工を施すことで製造される¹⁾。非常に複雑な形状への熱間加工のため、ひずみ状態は複雑な分布を示し、製品内部で機械的性質がばらつく要因となっている。

当社では、熱間鍛造工程を対象とする数値シミュレーション技術を約10年前より導入し、アルミ鍛造サスペンション部材の欠陥予測や機械的性質の改善に活用している。しかし、熱間鍛造には、材料の流動応力の温度依存性やひずみ速度依存性、素材と金型との間での過渡的な熱のやりとりの影響、複雑な摩擦特性など、正確なモデル化が困難な現象が複数含まれているため、数値シミュレーションは、構造設計分野でみられる実験の代替の役割を完ぺきには果たせていない。

競争力の観点からは今後、本分野においても数値シミュレーションの役割を拡大させ、製品の開発期間短縮や品質向上に積極的に活用していくことが重要と考えられ

る。そのためには、数値シミュレーション結果の精度検証と、モデルへのフィードバックを繰り返す作業が欠かせない。いっぽうで、鍛造サスペンション部材のような複雑形状のひずみ状態を、実験的に評価した事例は見当たらない。鍛造材のひずみ状態を実験的に評価する方法としては、マーカとなる複数の細径丸棒を素材に埋め込み、それらの変形状からひずみ状態を求める方法が報告されているが、比較的単純な形状に限定されている²⁾。

本稿では、一般的なアルミ鍛造サスペンション部材を対象に、ひずみ状態評価用の細径丸棒を素材に埋め込んで熱間鍛造に供し、ひずみ状態を評価した。さらに、その熱間鍛造を模擬した数値シミュレーションを行い、ひずみ状態の予測精度に対しても検討を加えた。

1. 試験条件

当社が開発した6000系アルミ合金KD610³⁾製のφ60×520mm 鋳造ビレットを供試体として、図1に示す位置に、同じくKD610製のφ3.0mm 細径丸棒を埋め込んだ。なお、埋め込んだ細径丸棒は、素材との界面の識別を容易とするため、アルマイト処理を施した。埋め込み位置は、ビレット端面からそれぞれ430、390、260、208mmの断面A、B、C、Dであり、供試体の軸方向および鍛造方向に対して直交する方向に10mmピッチで各5本ずつ、計20本とした。

供試体は、一般的な略L字形の鍛造サスペンション

*¹ アルミ・銅事業部門 技術部 *² アルミ・銅事業部門 大安工場 サスペンション部 *³ アルミ・銅事業部門 大安工場

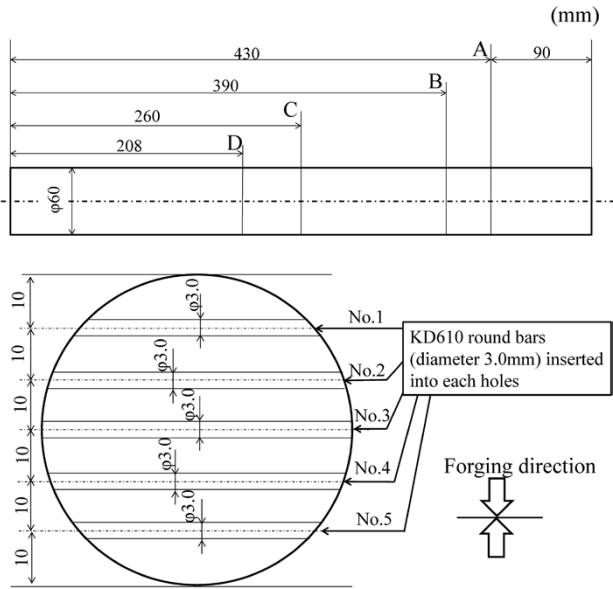


図1 供試体の概略図
Fig. 1 Schematic illustration of test piece



図2 鍛造サスペンション部材
Fig. 2 Forged suspension member

部材(図2)の鍛造用金型を使用し、6,300トンメカニカルプレスを用いて熱間鍛造した。供試体は約500℃に加熱し、プリフォーム、曲げ加工、荒鍛造、仕上鍛造の計4工程の加工を施した。荒鍛造および仕上鍛造金型は約100℃に加熱し、焼付き防止のため上下金型に白色系潤滑剤を塗布した。荒鍛造と仕上鍛造は半閉そく鍛造であり、過剰な体積はバリとして排出した。

2. ひずみ状態の評価方法

荒形状および仕上形状に対しては、ひずみ状態を評価するため、細径丸棒の軸方向および鍛造方向と直交するように切断し、切断面をバフ研磨して水酸化ナトリウムによるエッチングの後、光学顕微鏡で細径丸棒の変形形状を観察した。

細径丸棒を含んだ切断面の模式図を図3に示す。細径丸棒断面は略だ円形状に変形すると仮定し、 ϕ_0 、 d_1 、 d_2 はそれぞれ、変形前の直径(今回は3.0mm)、変形後の長径寸法、および短径寸法とおいた。ひずみは、スカラー量である相当塑性ひずみで評価することとし、その計算

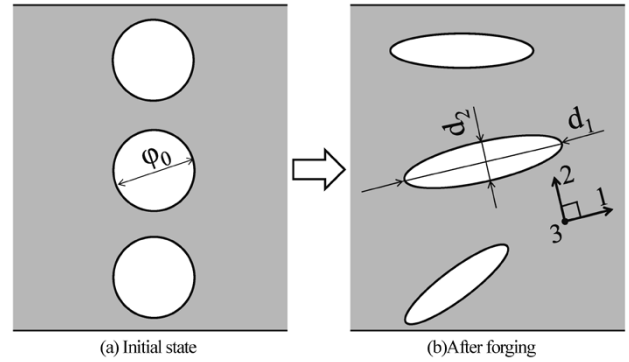


図3 ひずみ評価方法の模式図と記号
Fig. 3 Schematic diagram and symbols of strain evaluation model

にあたって次の仮定をおいた。

(i)加工過程でのひずみ経路の変化は評価できないため、各ひずみ成分が一定の比率で変化することを前提とする全ひずみ理論に基づく相当塑性ひずみ ε^p で評価する。

(ii)切断面は細径丸棒の軸方向に直交し、細径丸棒の主ひずみ方向は、長径方向、短径方向、および軸方向に一致する。

xyz直交座標系の全ひずみ理論に基づく相当塑性ひずみ ε^p は次式となる。

$$\varepsilon^p = \sqrt{\frac{2}{3}(\varepsilon_{p,xx}^2 + \varepsilon_{p,yy}^2 + \varepsilon_{p,zz}^2) + \frac{1}{3}(\gamma_{p,xy}^2 + \gamma_{p,yz}^2 + \gamma_{p,xz}^2)} \quad \dots (1)$$

ここで、添え字 p は塑性ひずみ、 ε は垂直ひずみ成分、 γ はせん断ひずみ成分を表す。x軸、y軸、z軸をそれぞれ細径丸棒の長径方向、短径方向、軸方向と考えると、せん断ひずみ成分はすべて0とでき、 $\varepsilon_{p,xx}$ 、 $\varepsilon_{p,yy}$ 、 $\varepsilon_{p,zz}$ は次式とできる。

$$\varepsilon_{p,xx} = \ln\left(\frac{d_1}{\phi_0}\right) \quad \varepsilon_{p,yy} = \ln\left(\frac{d_2}{\phi_0}\right) \quad \varepsilon_{p,zz} = -\varepsilon_{p,xx} - \varepsilon_{p,yy} \quad \dots (2)$$

式(2)では体積一定条件($\varepsilon_{p,xx} + \varepsilon_{p,yy} + \varepsilon_{p,zz} = 0$)を用いた。式(2)を式(1)へ代入すると、全ひずみ理論に基づく相当塑性ひずみ ε^p として次式が得られる。

$$\varepsilon^p = \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{\left|\ln\left(\frac{d_1}{\phi_0}\right)\right|^2 + \left|\ln\left(\frac{d_2}{\phi_0}\right)\right|^2 + \ln\left(\frac{d_1}{\phi_0}\right) \cdot \ln\left(\frac{d_2}{\phi_0}\right)} \quad \dots (3)$$

3. 数値シミュレーション条件

熱間鍛造試験条件を模擬し、数値シミュレーションを行った。ソルバは、有限要素法に基づく市販の塑性流動解析ソフトFORGE 2011(Transvalor社)を用いた。数値シミュレーションでは、プリフォーム形状を初期モデルとし、曲げ加工、荒鍛造、仕上鍛造の3工程を連続して計算した。形状、ひずみ、温度は、工程間で引き継いだ。要素は四面体1次要素を用い、大変形要素に対しては自動リメッシュを適宜施した。計算時間を考慮し、初期メッシュサイズおよびリメッシュサイズは5mmを与えた。流動応力には、KD610円柱丸棒のひずみ速度、温度をパラメータとした高温圧縮試験の結果を、Spittel's equation⁴⁾を用いて近似した結果を与えた。一例として、ひずみ速度 $10s^{-1}$ 条件でのKD610の流動応力と対数ひずみの関係を図4に示す。

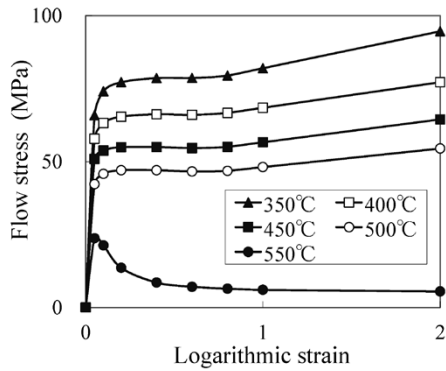


図4 KD610の流動応力と対数ひずみの関係 (ひずみ速度 $10s^{-1}$)
 Fig. 4 Relationship between flow stress and logarithmic strain of KD610 (strain rate $10s^{-1}$)

ひずみ状態を比較するため、荒形状、仕上形状それぞれの細径丸棒観察位置における全ひずみ成分を出力し、式(1)を用いて全ひずみ理論に基づく相当塑性ひずみ ϵ^p を計算した。

4. 結果と考察

4.1 鍛造サスペンション部材のひずみ状態

数値シミュレーションで得られた各工程の変形形状を図5に示す。この結果をもとに、荒形状、仕上形状まで鍛造したときの断面A, B, C, Dの位置を、ソルバの追跡機能を利用して求め、細径丸棒の観察位置を決定した。図5に、断面A, B, C, Dの細径丸棒が観察された概略位置と断面観察位置 (A, B, Dは3箇所, Cは4箇所)も示した。

一例として、A1, C2断面の荒、仕上形状の切断面写真を図6に示す。図中には鍛造方向も示した。すべての切断面で、細径丸棒と素材との間に隙間は確認されず、界面の視認が可能であった。

(a) C2断面のように高さ寸法の小さい断面では、細径丸棒は鍛造方向に極端につぶれ、へん平な断面形状に変化した。いっぽう、A1断面のように高さ寸法が比較的大きい断面では、細径丸棒の変形は比較的小さいことを確認した。

(b) A1断面では、細径丸棒の近傍に隆起部が形成されていくため、荒形状、仕上形状で隆起部へ向かうように流動する変形を確認した。

A1, C2断面で観察された細径丸棒の全ひずみ理論に基づく相当塑性ひずみ ϵ^p を図7に示す。

(c) 細径丸棒の変形の小さかったA1断面では、 ϵ^p は

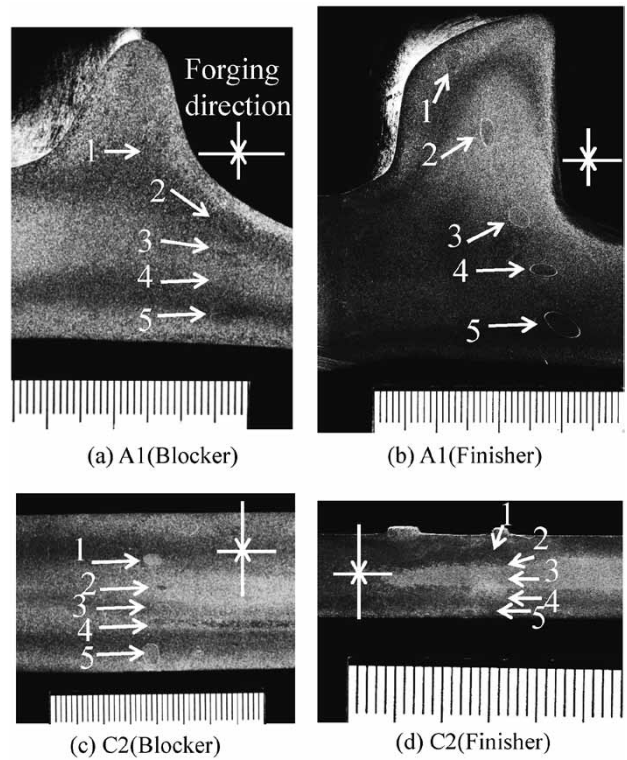


図6 切断面写真
 Fig. 6 Cross sectional pictures

荒、仕上形状いずれも1.0以下となった。細径丸棒の変形の大きかったC2断面では、 ϵ^p は荒、仕上形状いずれも最大で約3.0に達し、大きなひずみが生じていることを確認した。

(d) 荒形状から仕上形状にかけて ϵ^p は必ずしも増加しておらず、多くの部位において、ひずみ増分の反転を含む複雑なひずみ経路を経て変形する可能性が示唆された。

(e) 荒形状ではピレット中心部の ϵ^p が最も高くなる傾向があり、仕上形状ではその傾向が緩和される傾向が伺えた。

4.2 ひずみ予測精度の評価

数値シミュレーションで得られた全ひずみ理論に基づく相当塑性ひずみ ϵ^p と試験結果との比較を図8に示す。数値シミュレーションにおいても、試験と同様に、荒形状と仕上形状の間で ϵ^p は必ずしも増加しなかった。数値シミュレーションで得られた ϵ^p の多くは、試験結果と比較的一致したが、ひずみ集中やひずみ勾配が大きい場所では、試験結果との乖離(かいり)が大きくなる傾

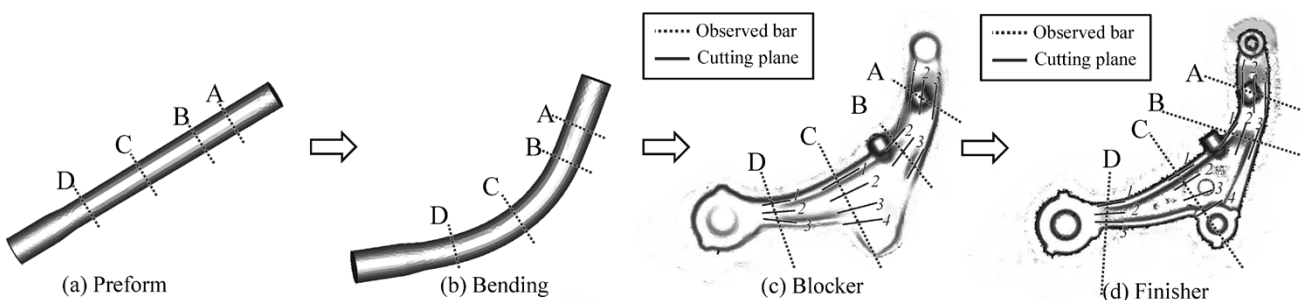


図5 各工程の変形形状
 Fig. 5 Deformed shapes of each process

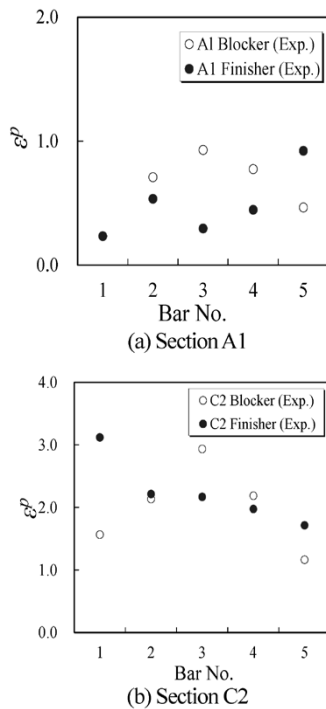


図7 全ひずみ理論に基づく相当塑性ひずみ ϵ^p

Fig. 7 Equivalent plastic strains ϵ^p estimated by total strain theory

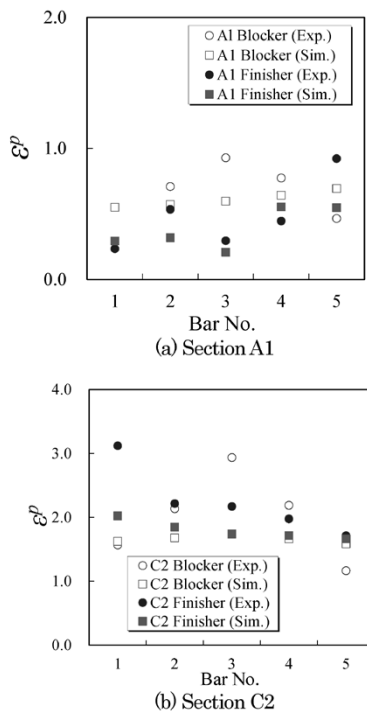


図8 全ひずみ理論に基づく相当塑性ひずみ ϵ^p の試験結果と数値シミュレーション結果の比較

Fig. 8 Comparison of equivalent plastic strains ϵ^p estimated by total strain theory between experimental results and simulation results

向が伺えた。その原因には、数値シミュレーションのメッシュサイズ（5 mm）では、ひずみの急激な変化に対する計算精度が低下した可能性が考えられる。

試験および数値シミュレーションで得られた仕上形状における ϵ^p の相関図を図9に示す。決定係数 R^2 は0.90となり強い相関を確認した。しかし、原点を通る回帰直線の傾きは0.86と、数値シミュレーションの方が ϵ^p を14%低く見積もる傾向があった。この要因として、上述

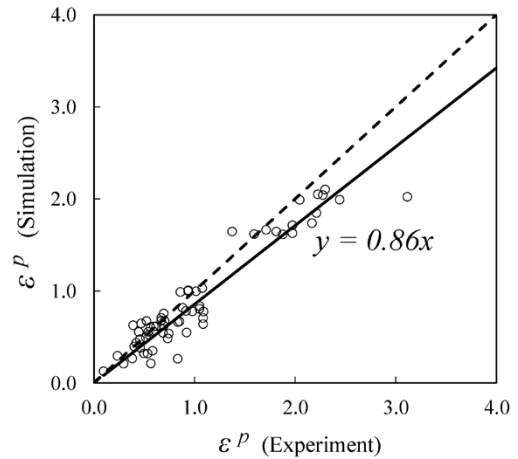


図9 仕上形状における全ひずみ理論に基づく相当塑性ひずみ ϵ^p の試験結果と数値シミュレーション結果の相関図

Fig. 9 Correlation diagram between experimental results and simulation results of equivalent plastic strains ϵ^p estimated by total strain theory in finisher

したメッシュサイズの影響に加えて、数値シミュレーションではプリフォームによるひずみを考慮しなかった影響も含まれると推測する。

むすび=多工程の熱間鍛造で製造される複雑形状のアルミ鍛造サスペンション部材を対象に、同一材料の細径丸棒を埋め込むことによって全ひずみ理論に基づく相当塑性ひずみ ϵ^p 分布を評価した。さらに、数値シミュレーションで得られた ϵ^p と比較し、ひずみ予測精度を検討した。

- (1) 細径丸棒と素材の界面は、複数工程を経た後も明確であり、ひずみ状態の評価が可能であった。
- (2) ϵ^p は、多くの部位で荒形状から仕上形状にかけて必ずしも増加しておらず、ひずみ増分の反転を含む複雑なひずみ経路を経ている可能性が示唆された。
- (3) 隆起部では、素材が鍛造方向と直交方向に圧縮され、隆起部先端方向に向けて塑性流動する様子が観察された。
- (4) 数値シミュレーションで得られた ϵ^p は、試験結果との間に強い相関があることを確認したが、試験結果に比べてやや低く見積もる傾向があった。

今回、アルミ鍛造サスペンション部材のひずみ状態を実験的に求め、数値シミュレーションの信頼性を評価できた意義は大きいと考える。今後、本手法を用いたひずみ状態の精度評価によって数値シミュレーションの信頼性を高め、アルミ鍛造サスペンション部材の開発期間短縮や品質改善への数値シミュレーションの寄与を拡大していきたい。

参考文献

- 1) 福田篤実ほか. R&D神戸製鋼技報. 2002, Vol.52, No.3, p.87-89.
- 2) 秦 寛幸ほか. 平成18年度塑性加工春季講演会講演論文集. 2006, p.159-160.
- 3) 稲垣佳也ほか. R&D神戸製鋼技報. 2005, Vol.5, No.3, p.83-86.
- 4) Hensel A et al. Kraft-und hitsbedarf bildsamer Forn (1978). VEB Deutscher Verlag filr Grundstoffindustrie, Leipzig.