

CAE解析及び物理シミュレーションの 冷間鍛造工程への適用

高須 一郎^{*1}・笠井 貴之^{*2}・中崎 盛彦^{*2}

Practical Use of Numerical Analysis and Physical Simulation to Cold Die Forging Process
Ichiro Takasu, Takayuki Kasai and Morihiko Nakasaki

Synopsis: Computer aided engineering technologies were developed to assist the process designers of precision forging. Sanyo developed plasticity simulation system for hot die forging and has adopted it for practical forging process. Since this system is based on two different fundamental technologies, plasticine model and FEM, it has high reliability and large applicability, and is also useful for prediction of forging load and pressure, metal flow and slipping on the tool surface. Since plasticine model simulation was used in this system, however, there were some difficulties in its application for cold die forging because of little workhardening and large spring back of plasticine. In this article, an alternative model simulation method was considered and aluminum alloy method was introduced on precision forging method and adopted to cold forging such as extrusion.

Key words: die forging; cold forging; process simulation; CAE; FEM; physical simulation; metal flow; work hardening; friction coefficient; strain; pressure on tool surface; material slipping on tool surface; plain strain; aluminum alloy.

1. 緒言

有限要素法 (FEM) 解析に代表される数値シミュレーションは、近年のコンピュータの発展と共に、一部の限られた分野の技術からかなり広範囲かつ一般的な技術として根づきつつあり、今では通常のPCにおいてもその解析ができるようになってきている。現在、2次元の数値シミュレーションは十分に実務レベルで利用可能な能力を保有し、専用ソフトを導入している企業も多く見られる。また3次元の数値シミュレーションについても、ソフトおよびハードのめざましい性能向上により、1~2年ほど前から一部実用化されるまでに至っている。

しかし数値シミュレーションでの取扱いが困難、あるいは、解析できない場合には、実機を模擬した代替材を用いたシミュレーションを行う事がある。このシミュレーションを数値シミュレーションに対し、以下、物理シミュレーションと呼ぶ。実際、複雑な3次元形状では、メッシュ作製、計算コストおよびメッシュ等が困難なため、物理シミュレーションを用いて検討する場合があります、今でも物理シミュレーションの要求・利用価値は高いと考えられる。また、物理シミュレーションは、解析シミュレーションの精度の検証や、しわや割れなどの表面欠陥の再現を目

的に利用する場合もある。

当社では数年前からS.H.P.S.S. (Sanyo Hybrid Plasticity Simulation System) と称する鍛造解析システムを構築している。このシステムの特長は、数値シミュレーションと物理シミュレーションを併用し、両者を比較することで妥当な解が短期間のうちに容易に得られるところにある。熱間加工における物理シミュレーションには、シミュレーション材としてプラスチック、潤滑剤として炭酸カルシウムを用いる事で、鋼の熱間加工をよく再現できるという知見があり、S.H.P.S.S.では本知見を利用して、主に熱間加工プロセスについて取り組んできた¹⁻⁴⁾。それに対し、冷間加工プロセスについては、一部プラスチックを適用している例はあるが、プラスチックでは冷間での鋼の加工硬化、摩擦係数の制御に関する問題、またスプリングバックが大きいことなど、冷間加工プロセスの物理シミュレーションへの適用には考慮すべき問題点があった。

そこで本報では、冷間鍛造プロセスにおける物理シミュレーション法の確立を目的に、プラスチックに代わるシミュレーション材および選定したシミュレーション材に最適な潤滑剤について調査を行った。また、冷間鍛造の基本工程である前方押し出しについて実機、物理シミュレーションおよびCAE解析結果を比較し、物理シミュレーションの

*1 技術研究所 プロセス開発グループ, PhD

*2 技術研究所 プロセス開発グループ

精度および有効性を明らかにした。

2. 冷間加工プロセスにおける物理シミュレーション方法の確立

2.1 物理シミュレーションにおいて具備すべき事項

前述したように物理シミュレーションは、金属材料を加工する際の、金属材料の荷重特性、変形形状、材料流動などの変形挙動、加工製品の性状などの予測、加工条件が適切か否かの評価などを目的として行われる。物理シミュレーションでは、加工機械や工具の負担軽減、摩擦係数および変形過程における形状など実機試験では得られにくい情報の収集などが目的とされるため、代替材を用いることが多い。

冷間加工の特徴として、熱間加工と比べ、(A)表面性状が良好、(B)変形抵抗が大きい、(C)加工硬化する、(D)金型 - 材料間の摩擦が小さい、などが挙げられる。特に加工硬化は、熱間加工ではほとんど起こらないのに対し冷間加工ではその影響が大きい。また熱間加工と冷間加工では潤滑方法や潤滑状態も全く異なり、熱間では摩擦係数 μ が約0.3であるのに対し、冷間でのそれは約0.1程度である。この加工硬化指数と摩擦係数の両特性は変形形状に大きく影響をおよぼすため、シミュレーション材は、(C)および(D)の条件について実鋼と同程度のものを用いる事が重要である。

上記の点を考慮し、熱間加工と冷間加工の物理シミュレーションモデルについて、比較したものをFig.1に示す。図に示したように、冷間加工プロセスにおける物理シミュレーションを精度良く行うためには、プラスチックに代わるシミュレーション材の検討が要求される。冷間加工プロセスにおけるシミュレーション材として具備すべき点を、以下に要求の高い順に示す。

- 変形抵抗が低い (簡便な設備でシミュレーションを行える)
- 加工性が良い (限界据込み率 > 70%)
- メタルフローの可視化が可能
- 加工硬化指数が実鋼と同程度
- 金型との摩擦係数を自由に再現できる潤滑方法が存在
- 試験片作製が簡便
- 材料費が安価
- 環境にやさしい (リサイクル可能、有害な材料でない)

2.2 物理シミュレーション材の選定

まず上記のシミュレーション材に対する要求項 を考慮して、数ある金属材料の中から比較の変形抵抗が低いと思われる、(A)銅合金 (8種)、(B)銅 - 亜鉛合金系 (2種)、(C)アルミニウム合金 (7種) を選定した。各材料を用いて冷間据込み性試験を行い、 および について検討を行った。

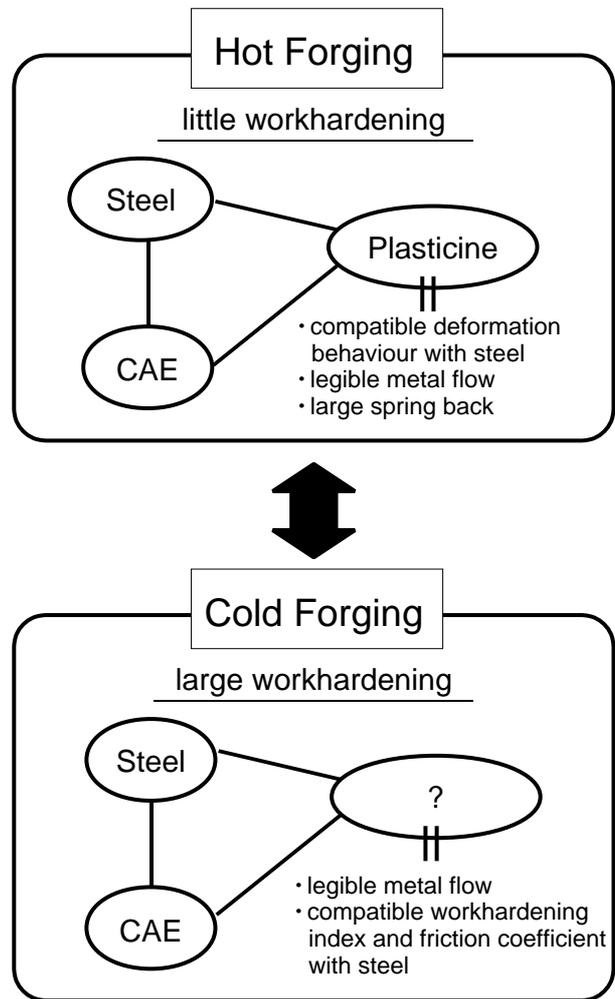


Fig. 1. Comparison between hot and cold forging simulation.

その結果、(A)の銅合金は、半数の4種については限界据込み率が40%程度であり、残り4種のうち2種は、純金属に近いメタルフローの観察が不可能に近く、残りの2種についても非常に困難であった。(B)の銅 - 亜鉛合金系は2種ともメタルフローの観察が非常に困難であった。これらのことから、(A)銅合金 (8種) および(B)銅 - 亜鉛合金系 (2種) については、メタルフローの観察に不適であることから、今回のシミュレーション材としての採用を見送った。それに対し、(C)のアルミニウム合金は、選定した7種全てにおいて上記要求項の ~ を満たしたため、引き続き および の要求項目について検討を行った。Table 1に選定したアルミニウム合金を示す。

2.3 加工硬化指数と潤滑方法の検討

選定したアルミニウム合金について、シミュレーション材に対する要求項 「加工硬化指数が実鋼と同程度」の条件を満たすか否かを調査するため、加工硬化指数を冷間据込み性試験⁵⁾にて測定した。試験には冷間据込み試験1号拘束型 (日本塑性加工学会冷間鍛造分科会基準) 試験片を用い、油圧制御式万能試験機にて規定の試験方法に基づいて行った。Fig.2に実験により得られたアルミニウム合金

Table1. Chemical compositions of aluminum alloys.

Alloy	JIS	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti
Al-Cu	2011	0.40	0.7	5.0~6.0	-	-	-	0.30	-
	2017	0.2~0.8	0.7	3.5~4.5	0.40~1.0	0.40~0.8	0.10	0.25	-
	2024	0.50	0.50	3.8~4.9	0.3~0.9	1.2~1.8	0.10	0.28	-
Al-Mg	5052	0.25	0.40	0.10	0.10	2.2~2.8	0.15~0.35	0.10	-
	5083	0.40	0.40	0.10	0.40~1.0	4.0~4.9	0.05~0.25	0.25	0.15
Al-Mg-Si	6061	0.40~0.80	0.7	0.15~0.40	0.15	0.8~1.2	0.04~0.35	0.25	0.15
Al-Zn-Mg	7075	0.40	0.50	1.2~2.0	0.30	2.1~2.9	0.18~0.28	5.1~5.6	0.20

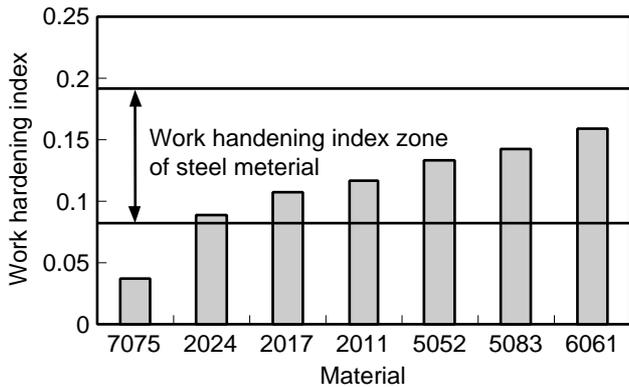


Fig. 2. Work hardening indexes of aluminum alloys.

の加工硬化指数を示す。Fig.2から選定したアルミニウム合金により冷間加工鋼材の加工硬化指数の範囲をほぼカバーできることが分かる。

また上記要求項「金型との摩擦係数を自由に再現できる潤滑方法が存在」する事を調査するため、アルミニウム合金と金型（材質...SKD11）との摩擦係数を、リング圧縮試験⁶⁾により測定した。摩擦係数の同定は、CAE解析により摩擦係数と相関性の高い変形量（内径）の関係性を予め較正曲線として求め（Fig.3）、実験により得られた内径変化率と較正曲線との比較により、その潤滑条件における摩擦

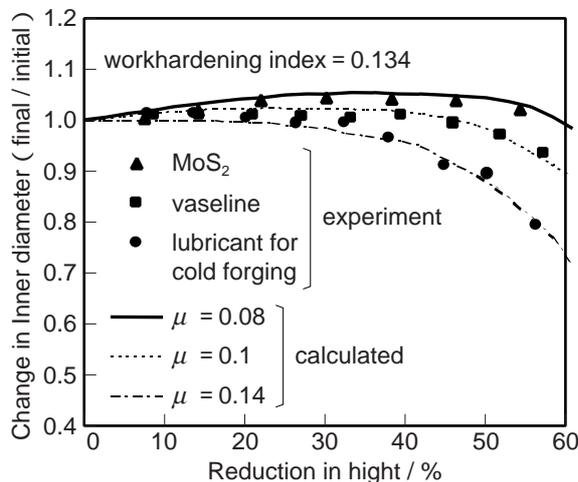


Fig. 3. Friction coefficients of lubricants (A5052).

係数を推定する。潤滑剤としては、(A)二硫化モリブデン、(B)ワセリン、(C)冷間圧延用潤滑剤の三種類を用意した。試験片には、各アルミニウム合金の棒材から外径18mm、内径9mm、高さ6mmのリングを旋削したものを使用し、各潤滑剤での各種アルミニウム合金と金型との摩擦係数を測定した。

Fig.4に、実験により得られたアルミニウム合金の各潤滑剤の摩擦係数を示す。これからわかる通り、冷間鍛造における摩擦係数の範囲をこの3種類の潤滑剤でほぼカバーできることが分かる。また後述のFig.6に示すように、アルミニウム合金は明瞭にメタルフローの観察が行えることが分かる。以上の結果から、冷間加工のシミュレーション材にアルミニウム合金を用いる事は有効であることがわかった。

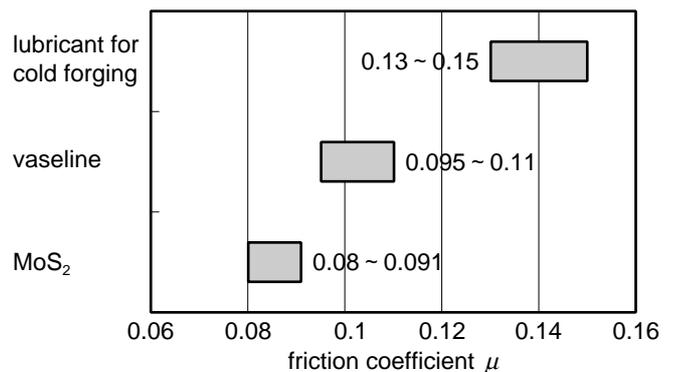


Fig. 4. Friction coefficients of lubricants.

3. 前方押しへの適用

3.1 実験方法

上述のように、冷間加工シミュレーション材として、アルミニウム合金を用いる事の有効性が示された事から、冷間前方押し実験を行い、シミュレーションの精度についての検討を行った。実験に使用した前方押し金型の模式図をFig.5に示す。金型材質はSKD11で、Table 2に示すように、入口部径 D_1 を固定し出口部径 D_2 ダイス絞り半角 θ の異なる2種類の金型形状A,Bを用意した。実験は油圧制御式万

能試験機を用い、パンチ速度は10 mm/minで行った。

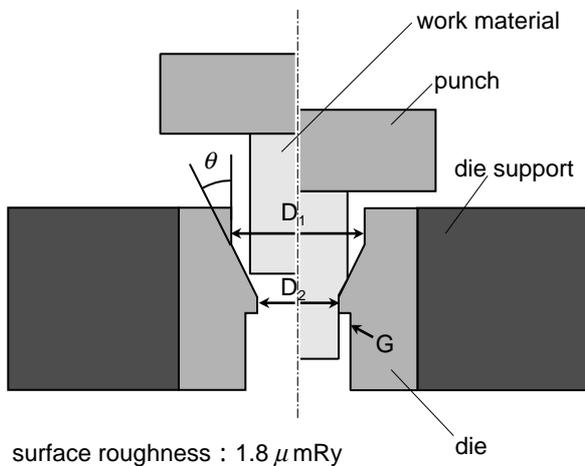


Fig. 5. Schematic diagram of the metal mold for cold extrusion.

Table2. Mold shape factors.

mold	D1 / mm	D2 / mm	θ / deg	reduction in area/%
A	16.6	13.2	10	10
B	16.6	12.9	15	15

前方押し出し加工実験には、切削加工により直径14mm、高さ21mmの円柱形に仕上げたもの（表面粗さ:7~8 μ mRz）を用いた。材質としては、実鋼として、SNCM420（97.6 HRB）、モデルシミュレーション材として、SNCM420と同等の加工硬化指数を持つアルミニウム合金A5052（31.1 HRB）を用いた。

実鋼としてのSNCM420、シミュレーション材としてのA5052、それぞれの変形抵抗式は次式で示される。

$$\text{SNCM420} : \sigma = 1118.9 \varepsilon^{0.132} \quad (\text{MPa}) \quad (1)$$

$$\text{A5052} : \sigma = 337.12 \varepsilon^{0.134} \quad (\text{MPa}) \quad (2)$$

実験はすべて室温（約25℃）で行い、実鋼（SNCM420）の潤滑剤には二硫化モリブデンを用い、摩擦係数については、リング圧下試験結果より算出した。その結果実鋼（SNCM420）と工具との摩擦係数は0.085とわかった。Fig.4よりシミュレーション材（A5052）との潤滑剤には、実鋼での潤滑状態を再現できる二硫化モリブデンを選び、その摩擦係数を0.08とした。

3・2 CAE解析条件

有限要素法解析には小坂田らの開発したRIPLS-FORGE⁷⁾を用いた。前方押し出し加工の解析には、モデル実験に使用した金型と同様の断面減少率およびテーパ角を用い、また、実験により求めた変形抵抗式を用いた。尚、FEM計算条件としては、要素数：700、ステップ数：100で行った。

3・3 実験および解析結果

3・3・1 メタルフローおよび外観形状

CAE解析の妥当性を見るために、実験結果と計算結果を比較した。

まず、据え込み加工でのメタルフローを比較した。実鋼およびシミュレーション試験片の断面マクロ写真およびCAE解析で得られたメタルフローをFig.6に示す。

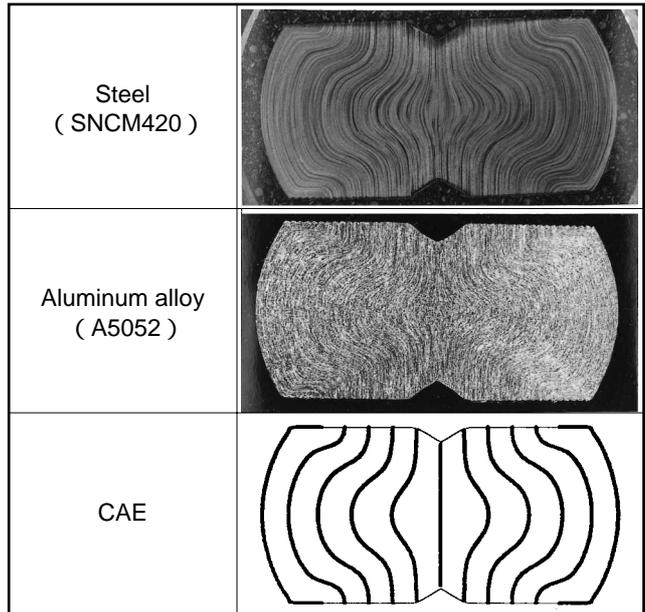


Fig. 6. Metal flow of work materials (SNCM420, A5052, CAE analysis).

CAE解析では、端部の摩擦条件を「固着」とし、変形抵抗式についてはシミュレーション材のものを用いている。これらを比較すると、実鋼（SNCM420）、シミュレーション材（A5052）およびCAE解析、それぞれのメタルフローがよく一致していることがわかる。

また、前方押し出し加工後の試験片の変形形状について、Fig.7に示した端部くぼみ量と最大直径について比較した。その結果をFig.8に示す。この図から分かる通り、解析結果と実験結果はよく一致し、実鋼とシミュレーション材で、

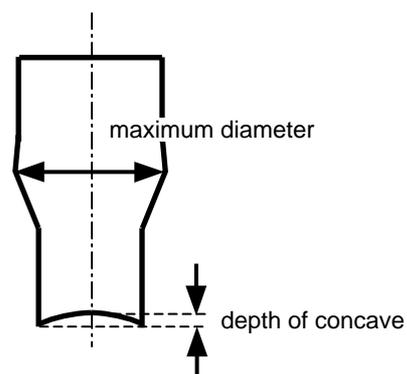


Fig. 7. Schematic diagram of extrusion test piece.

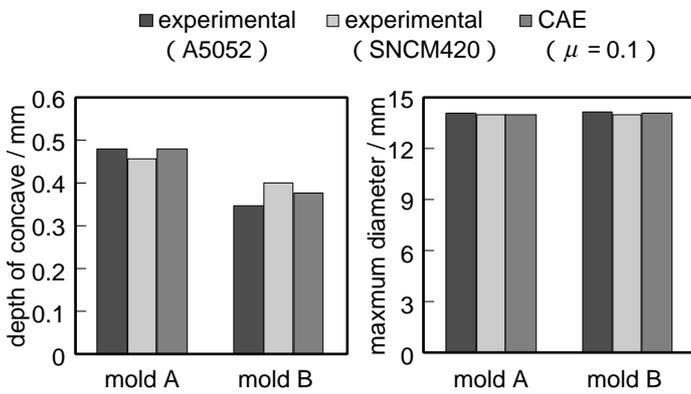


Fig. 8. Effects of mold shape with extruded materials.

共に、ほぼ同様な形状が得られた。メタルフローおよび外觀形状の比較から、シミュレーション材によるシミュレーションにより実鋼での変形挙動を正確に推定できることがわかった。

3.3.2 パンチ荷重

金型形状Aにて前方押し出し加工を行った際の実鋼およびシミュレーション材の荷重 - ストローク曲線をFig.9に示す。実鋼およびシミュレーション材の摩擦係数は、ともに、リング圧縮試験により求めた摩擦係数（シミュレーション材： $\mu = 0.08$ ，実鋼： $\mu = 0.085$ ）より若干高い値（シミュレーション材： $\mu = 0.11$ ，実鋼： $\mu = 0.1$ ）で解析することにより、実験結果とよく一致した。これは、絞り部において潤滑膜が薄くなる等の潤滑状態の劣化が原因と考えられる。

また、既報⁹⁾にて示した前方押し出し加工時の荷重予測式について、今回の実験で得られた（加工終期のほぼ定常状態時）荷重に適用し、比較検討を行った。Fig.10に示した通り、実鋼、シミュレーション材、どちらにおいても実験値と予測値はよく一致した。

3.3.3 金型ひずみ

金型ひずみについても実験により測定した加工時の金型表面のひずみとCAE解析で得られた結果と比較した。金型

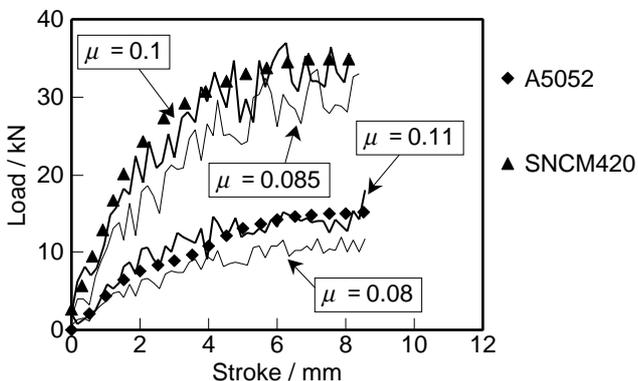


Fig. 9. Load history of steel (SNCM420) and aluminum alloy (A5052).

$$L^* = L/L_1 = 0.14 + 0.25 \mu - 0.31n + 0.016 \theta + 0.012R$$

L : mold load L₁ : flow stress at $\epsilon = 1$
 μ : friction coefficient n : work hardening index
 θ : die half angle R : area reduction ratio

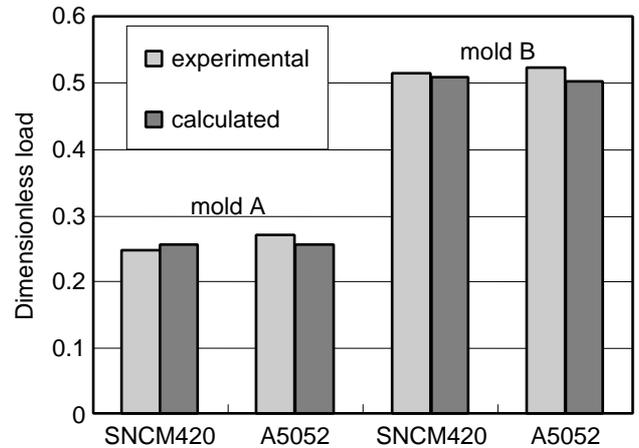


Fig. 10. Comparison between experimental load and calculated load with forging(non-dimensional).

に発生するひずみの測定については、軸加工部下2mmの位置（Fig.5のG部）にひずみゲージを張り付け測定した。金型の応力解析については、弾性解析を用いた。Fig.11にその比較結果を示す。線がCAE解析により得られたひずみ、点が実験により得られたひずみであるが、金型における周方向のひずみ ϵ_θ および高さ方向のひずみ ϵ_z とともに計算結果と実験値はよく一致し、CAE解析により金型の応力状態を精度よく予測できることがわかった。

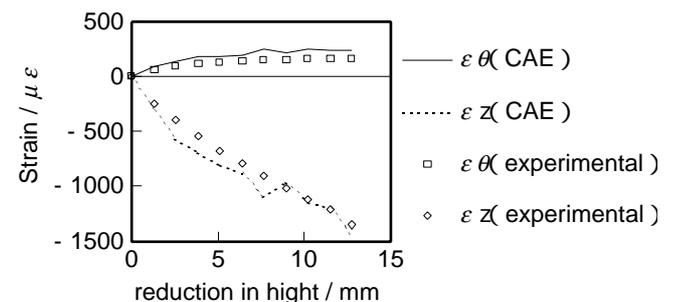


Fig. 11. Comparison between experimental results and CAE simulation with mold strain history.

4. 結論

冷間鍛造におけるシミュレーション材としてアルミニウム合金、潤滑剤として二硫化モリブデンを用いる物理シミュレーション方法を提案した。アルミニウム合金は、冷間における実鋼の加工硬化指数の範囲を十分カバーし、メタルフローの可視化も可能であり、また潤滑剤である二硫化モリブデンとの組み合わせは通常の冷間鍛造時の潤滑状態

をよく再現できるため、精度の良い物理シミュレーションが可能である。

実際、冷間鍛造の基本工程の1つである前方押しに本シミュレーション法を適用し、実鋼による実験結果および解析結果と比較検討したところ、物理シミュレーション、実鋼実験と数値解析結果はよく一致し、当シミュレーション方法の有効性が確認できた。

文 献

- 1) 尾崎勝彦, 矢野正和, 中崎盛彦, 吉田忠継：平成8年塑性加工春季講演会概論集(1996), 190.
- 2) 矢野正和, 尾崎勝彦, 吉田忠継, 笠原義夫：平成8年塑性加工春季講演会概論集(1996), 192.
- 3) 矢野正和, 尾崎勝彦, 中崎盛彦, 吉田忠継, 笠原義夫：第47回塑性加工連合講演会概論集(1996), 99.
- 4) 中崎盛彦, 矢野正和, 尾崎勝彦, 吉田忠継：第47回塑性加工連合講演会概論集(1996), 103.
- 5) 冷間鍛造分科会材料研究班：塑性と加工, 22-241(1981), 139-140.
- 6) K. Osakada and M. Shiraishi：Proceedings of the 2nd. International Conference on Technology of Plasticity, (1987), 925.
- 7) 森謙一郎, 島進, 小坂田宏造：日本機械学会誌, 45A(1979), 396, 965.
- 8) 笠井貴之, 吉田忠継, 尾崎勝彦, 澤井謙一：日本塑性加工学会, 第6回日中精密鍛造シンポジウム論文集, (1998), 180-183.

