

塑性加工における金型内部応力のリアルタイム可視化技術

(株)鹿児島頭脳センター 研究開発部 牟禮 雄二

1. はじめに

面圧2000MPaにも達する状況下で加工される冷間鍛造においては、応力集中に起因する金型寿命低下がしばしば問題となる。そのため加工中に金型内部で応力がどの程度、どの様な分布で発生しているかを知る事は金型を設計する上で重要となる。過去に金型表面に圧力センサーを取り付ける事例は報告されているが、合金製(SKD11)の金型を用いて金型全体の応力分布を把握する事は行われていなかった。本研究では、冷間鍛造時の金型内部応力を容易に、高精度に可視化する事を目的に、物理シミュレーションにより加工開始から終了までの弾性ひずみをリアルタイムで計測し、任意に選択した経過点あるいは連続点における弾性応力分布をグラフィック表示する技術を開発したので報告する。

2. システム概要

構築したシステムの構成を図1に、鍛造用金型を図2に示す。このシステムは、金型、ひずみセンサー、電圧増幅機能を持つリモートスキャナー及びPCで構成される。金型のダイス内部に5素子ひずみセンサーが約150点埋め込んである。素材の塑性変形に伴うダイスへの反力により発生する弾性ひずみをひずみセンサーが感知し、電圧信号としてリモートスキャナーへ送る。この時、信号は増幅されリモートスキャナーにより1秒間隔で計測し、Excel(*.CSV)データとして保存する。以上より鍛造時の金型内部弾性ひずみをリアルタイムで計測する事ができる。特定の位置で計測された弾性ひずみは、新規に開発したソフトウェアPre(条件設定)、Solver(応力計算)により線形補間で計算格子点上の値へ変換され、次式(円筒座標系)に代入し弾性応力分布を計算する。最後にPost処理でダイス全体の応力分布をグラフィック出力する。



図1 システム構成

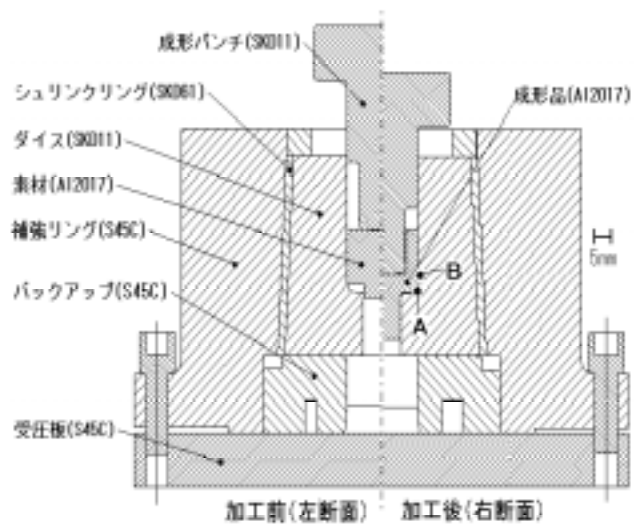


図2 冷間鍛造用金型

$$\sigma_r = \frac{E}{1+\nu} \left\{ \varepsilon_r + \frac{\nu}{1-2\nu} (\varepsilon_r + \varepsilon_\theta + \varepsilon_z) \right\}$$

$$\sigma_\theta = \frac{E}{1+\nu} \left\{ \varepsilon_\theta + \frac{\nu}{1-2\nu} (\varepsilon_r + \varepsilon_\theta + \varepsilon_z) \right\}$$

$$\sigma_z = \frac{E}{1+\nu} \left\{ \varepsilon_z + \frac{\nu}{1-2\nu} (\varepsilon_r + \varepsilon_\theta + \varepsilon_z) \right\}$$

ここで、 σ_r : 弾性応力 (r, θ , Z方向) , ε_r : ひずみセンサーの出力値 (r, θ , Z方向)
 E : ヤング率 , ν : ポアソン比

3. 実験方法

鍛造金型は、ダイスを補強リングヘテーパー圧入する事で内部に圧縮応力を発生させ、鍛造による引張り応力と相殺させて寿命伸長を図る。今回は、鍛造現象と共に圧入工程も可視化した。圧入速度は0.5mm/sで行った。実験（金型は図2）には、アルミニウム合金Al2017の素材を用いた。素材は焼鈍（415℃で2H加熱後、炉冷）後、ショットブラストし、潤滑処理した。加工速度は0.5mm/s及び30mm/sとした。

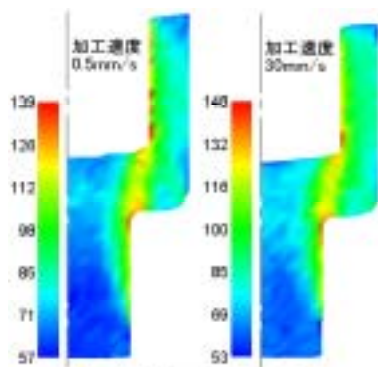


図3 成形品の硬度分布[Hv]

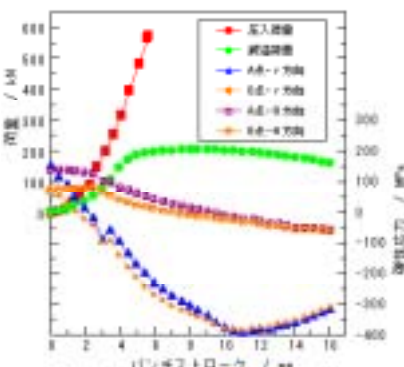


図4 加工荷重とダイス内部弾性応力

4. 実験結果と考察

成形品の硬度分布を図3に示す。加工速度の影響は無い事が分かる。この事から塑性変形中に金型と素材が接触する時系列的な状況とそれらが累積して得られる成形品形状など変形状況が一致していればそれに伴う金型への時系列的な反力の変化状況も一致すると考えられる。すなわち、本システムでは計測速度（300点/秒）の制約で低速加工で実験する必要があるが、冷間鍛造の様にひずみ速度依存性がほぼ無視できる場合は十分実用的である。

圧入・鍛造時の荷重及び図2の点A、Bにおけるr及びz方向の弾性応力を図4に示す。圧入、鍛造荷重の最大値はそれぞれ60kN、20kNであった。荷重はストローク6mmまでは上昇するがその後は定常状態となる。弾性応力のピーク値は鍛造荷重の最大値と一致しない事が分かる。ダイスの成形面付近の弾性応力は加工の進行に従い0あるいは圧縮状態となり良好な状態を示している。

圧入後のダイス内部弾性ひずみ分布を図5、6に、圧入後の初期応力状態を考慮した鍛造時（最終ストローク）のダイス内部の弾性応力分布を図7に示す。r方向においてはダイスの成形部で理想的な圧縮ひずみが発生している。z方向では除荷後の反発で引張りひずみが発生している。圧入時の余圧の効果で鍛造時のダイス成形部は0あるいは圧縮応力が発生し、理想的な状態である事が分かる。

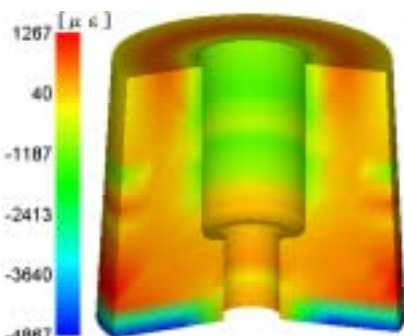


図5 圧入後のθ方向弾性ひずみ

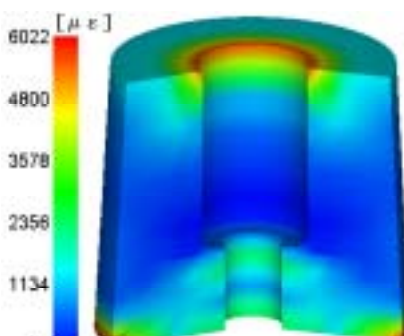


図6 圧入後のz方向弾性ひずみ

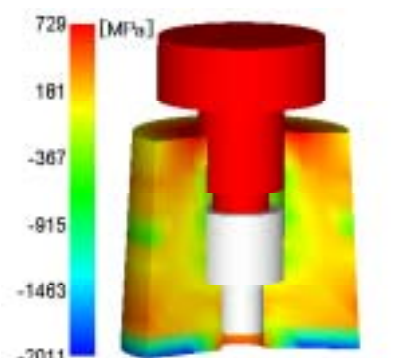


図7 鍛造時のθ方向内部弾性応力

5. おわりに

金型内部ひずみをリアルタイムで計測し、弾性応力をグラフィック表示する技術を開発した。システムを冷間鍛造金型へ適用し、ダイス内部の弾性応力分布を明瞭に可視化でき、金型設計の最適化を図る上で有効な技術である事を確認した。