

鍛造金型の損傷予測法とそれによる型寿命の改善

金沢憲一*

1. 緒言

鍛造加工では、経験的に十分なマージンを考慮して型設計を行っても、時として型寿命の低下や予期せぬ破損に見舞われることがある。加工中の高い成形荷重は、金型内に大きな応力を発生させるが、この定量的評価が不十分なためである。

本報告では、有限要素法プログラムによるシミュレーション計算を用いて、特に高負荷にさらされる冷間鍛造金型の損傷について、その予測手法を提案している。また、高寿命化のいくつかの対策を示している。

2. 有限要素法シミュレーションによる応力解析

2.1 計算条件

実際の成形過程を有限要素法によるシミュレーション計算により再現し、金型内部の応力状態を調べることで、損傷の原因を調べることが可能である。本報告では自動車部品成形用の冷間鍛造用金型を対象とした。その成形は4つの工程で構成されるが、本研究では図1に示すような工程で使用されている金型(斜線部の下型)を対象とした。

本報告で使用した有限要素法プログラムは、汎用パッケージソフトMSC.Marc (K7.3) である。作成したモデルを図2に示す。2次元軸対称問題として扱っている。実

際にはパンチが複雑な3次元形状をしているが、断面積が同じになるような径を持つ回転対称体として扱うことで、2次元軸対称問題として近似した。被加工材は弾塑性体、下部金型とバックアップリングは弾性体として定義し、パンチ、上部金型およびノックアウトピンは剛体とした。被加工材、下部金型およびバックアップリングの弾性定数および被加工材の加工硬化曲線は、引張試験によって得られた結果を使用した(表1および図3参照)。被加工材を被加工材の境界条件については、被加工材の対称軸上の節点について、半径方向に拘束した。

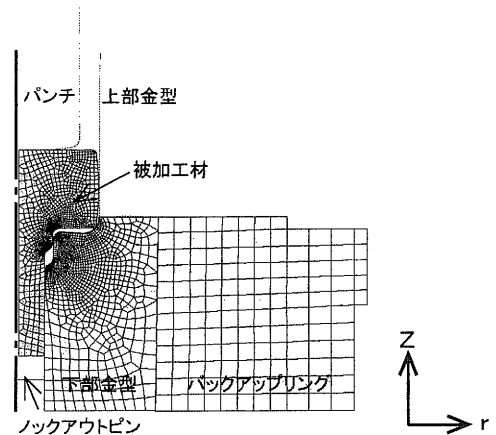
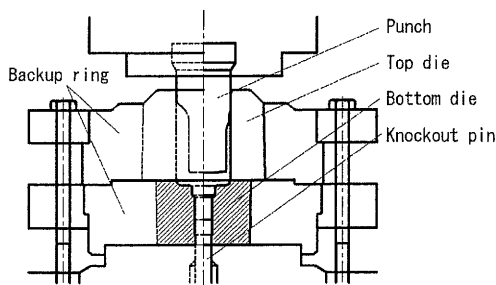
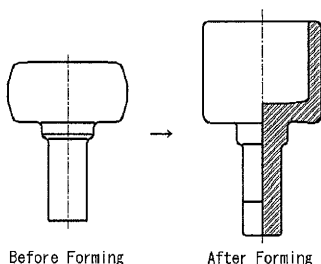


図2 計算モデル



(a) 工具配置



(b) 被加工材形状

図1 工具配置および被加工材形状

表1 材料定数

	ヤング率 MPa	ポアソン比	降伏応力 MPa
被加工材	208000	0.3	490.35
下部金型	187166	0.3	—
バックアップリング	187166	0.3	—

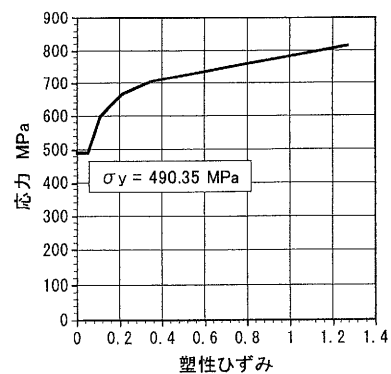


図3 被加工材の加工硬化曲線

また、下部金型およびバックアップリングは剛体上にあるものとするため、底面にあたる節点を対称軸方向に拘束した。被加工材との接触面にはせん断摩擦が作用するものとし、摩擦係数を0.09とした。実際の下部金型はバックアップリングに圧入されているため、計算においても、あらかじめ金型内に圧縮応力を発生させる必要がある。本報告では、バックアップリングの温度を下げて収縮させることにより、圧入を再現した。

計算が進行するにしたがって、被加工材を構成する要素は徐々に変形する。このまま計算を続けると、計算精度が悪化するだけでなく、計算そのものが進行しなくなることがある。したがって、計算途中で要素形状を修正する“リメッシュ”という作業が必要になる。本報告ではパンチストローク7.5mm以降、2.5mm進むごとにリメッシュを行った。

2.2 計算結果および考察

【変形履歴と成形荷重】 パンチストローク10mm、20mm、30mmにおける変形図を図4に示す。同図(a)パンチストローク10mm、(b)20mm、(c)30mmの結果である。最初は、被加工材は下部金型のカップ底部と肩部のみで支えられているが、パンチストロークが8mmに達すると被加工材はフランジR部と接触する。パンチストロークが12mmに達すると被加工材はロックアウトピンに接触し、これ以降は後方押し出しの形となっている。

シミュレーション計算の結果から、成形荷重を算出することは容易である。この成形荷重によってシミュレーション計算と実際の加工との一致を調べることができる。図5に成形荷重の履歴を示す。被加工材が下部金型のカップ底部と肩部で支えられている成形初期では、成形荷重は急激に上昇する。フランジR部に接触すると成

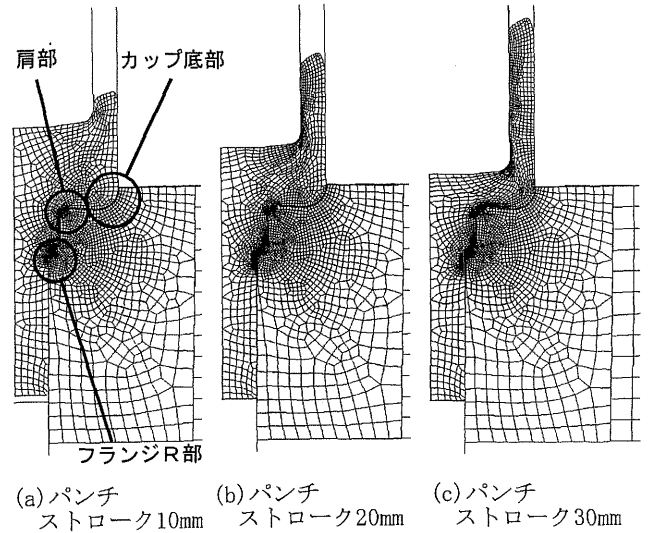


図4 変形図

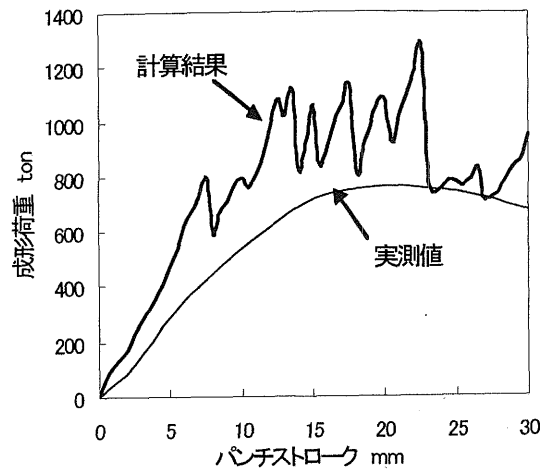


図5 成形荷重

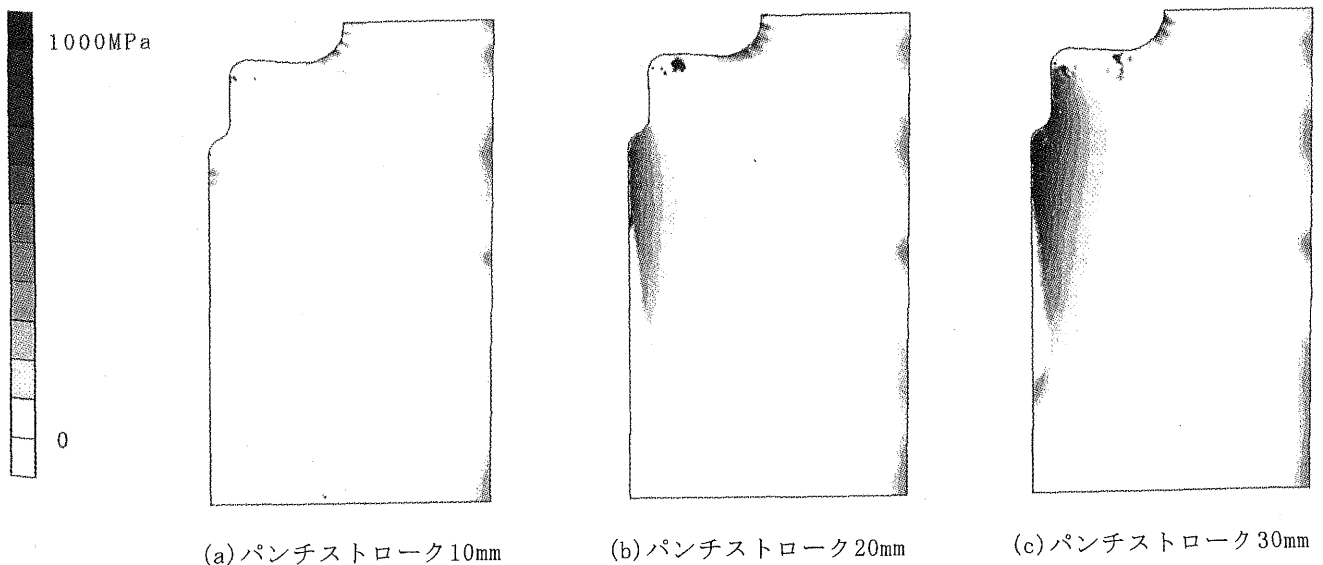


図6 下部金型の最大主応力分布（引張成分）

形荷重の上昇は緩やかになり、ロックアウトピンに接触する前後においてピークを迎え、その後は緩やかに減少する傾向にある。実測値と比較すると荷重の変動が大きい、成形荷重の推移は比較的良く一致している。シミュレーション計算における成形荷重はリメッシュ直前で大きくなり、リメッシュ直後には小さくなる傾向が見られる。一般的に要素のゆがみが大きくなると変形抵抗も大きくなるため、適切なリメッシュ作業が必要になる。

【金型内部の応力分布】 図6に下部金型内の最大主応力分布を示す。引張応力のみを示している。同図(a)パンチストローク10mm、(b)20mm、(c)30mmの結果である。パンチストローク10mmのとき、カップ底部に引張応力が発生する。フランジR部では圧縮場になっているが、パンチストロークが15mm以上になると引張応力が発生する。20mm以上になるとフランジ円筒部にもR部にも引張応力が発生する。1回の成形過程において、フランジ円筒部およびフランジR部では、圧縮から引張へと大きな応力振幅が生じており、疲労の存在が推測できる。引張応力の作用方向について調べたところ、図7に示すようにカップ底部ではカップのRに対して接線方向に、フランジR部およびフランジ円筒では円周方向に作用していた。

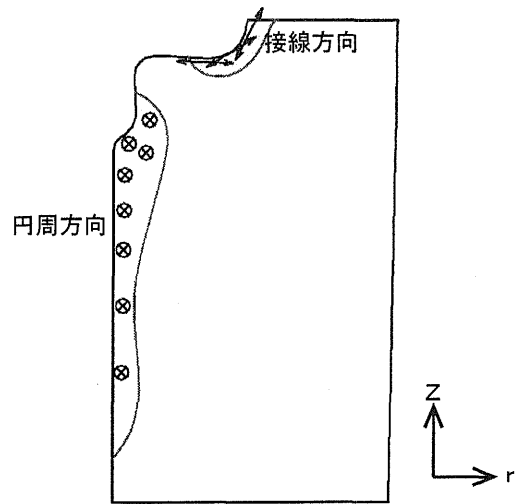
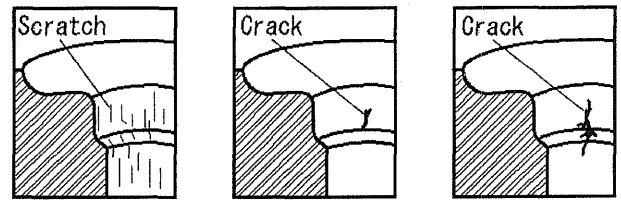


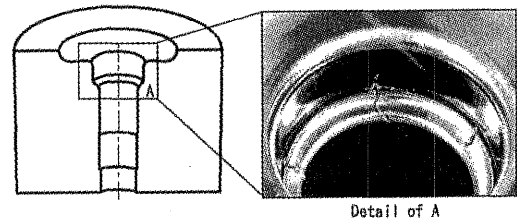
図7 最大主応力の方向（成形荷重最大時）



(a) 1-256 shot (b) 1000 shot (c) 3000 shot

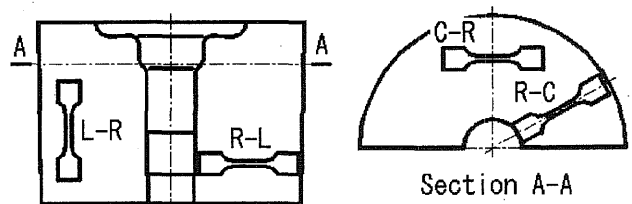
2.3 損傷過程の外観調査

シミュレーション計算で用いた事例について実際に加工を行い、金型の損傷過程を調べた。特定の成形個数に達した時点でプレス機を止めて金型を取り出し、その表面をCCDカメラで観察した。結果を図8に示す。まず1~256個の成形個数では、図8(a)に示すような被加工材との摩擦によるものと思われる縦方向のキズが発生した。成形が進むにつれてこのキズは多くなったが、この段階ではき裂の発生を認められなかった。その後1000個の成形を終えた段階で、図8(b)に示すようにフランジ部において縦方向のき裂が発生しているのを確認した。このき裂は図8(c)に示すように成形個数が増すにつれて縦方向および円周方向に進展していき、5000個の成形を終えた段階で、金型表面の一部がはく離しているのを確認した。き裂が発生する箇所はシミュレーション計算において大きな引張応力の発生する箇所とほぼ一致していた。そしてき裂の方向は鍛造方向と同じであり、最大引張応力の方向と直角であった。

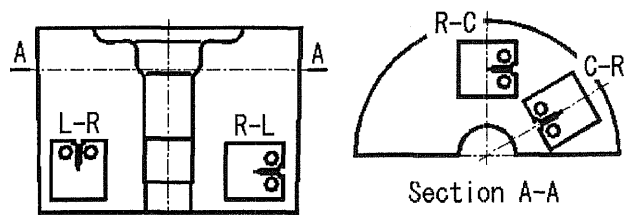


(d) 5000 shot

図8 金型の損傷過程



(a) 引張試験片



(b) 破壊靱性試験片および疲労き裂進展試験

以上の結果から、シミュレーション計算により金型の損傷を予測可能であることがわかる。本報告で対象とした冷間鍛造用金型の破壊プロセスは次のようなものであると考えられる。①まず初期に素材との接触部に擦過キズが縦方向に生じ、②そのキズに対して直角方向に発生する高い引張応力がキズをき裂に成長させ、③さらに繰り返し負荷によりき裂が進展し破壊に至る。したがって、金型材料の機械的特性、破壊・疲労特性と内部応力場を比較すれば、金型の寿命予測は可能であると考えられる。

図9 試験片

3. 金型材の機械的特性

3.1 試験条件

金型材料の機械的特性を調べるために、引張試験、破壊靱性試験、疲労き裂進展試験を行った。対象とした金型は、実際の成形に使用されて寿命に至ったもの3個(耐用寿命=成形個数7950, 11200, 16750個)と、未使用型1個である。引張試験片は平行部長さ17.5mm, 幅3mm, 厚さ1.5mmの板状のもの、破壊靱性試験片はASTM E399規格に準拠したコンパクトタイプのもの(厚さ10mm)、疲労き裂進展試験片はASTM E647規格に準拠したコンパクトタイプのもの(厚さ5mm)を使用した。各試験片は、き裂が発生する方向(L-R, C-R), および進展する方向(R-L, R-C)の計4方位から採取した(図9参照)。

3.2 試験結果

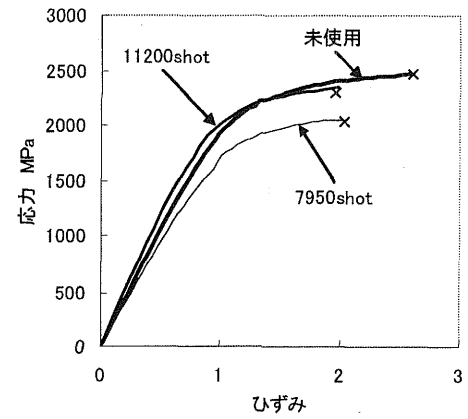
【引張試験】 引張試験の結果を図10に示す。同図(a) L-R, (b) R-L, (c) C-R, (d) R-Cの結果である。(a) L-Rの方位から採取した試験片は、塑性変形を示した後に破断しているのに対して、他の方位では、すべて弾性域内で破断しており、異方性が大きい。耐用寿命と引張強さの関係を図11に示す。寿命が長かった金型ほど、引張強さが高くなっている。金型の破壊が単純な引張破壊型に近いことを示唆している。

【破壊靱性試験】 破壊靱性試験から得られる平面ひずみ破壊靱性値 K_{Ic} と耐用寿命との関係を図12に示す。この図から K_{Ic} は耐用寿命や試験片の採取方位に関係なく、 $20\sim 25\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ の値を示している。すなわちいったん発生したき裂は短期間で成長し寿命を決定し、個々の金型の破壊靱性に関する個体差は影響がないことを意味している。

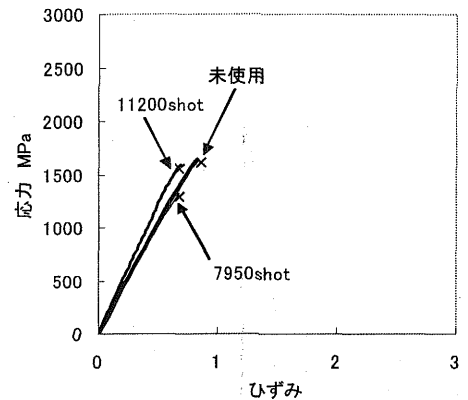
【疲労き裂進展試験】 疲労き裂進展試験により得られる応力拡大係数範囲とき裂進展速度の関係を図13に示す。破壊靱性値と同様に、耐用寿命や試験片の採取方位に関係なく、ほぼ同一の曲線上にある。やはり金型の破壊を支配しているのが疲労現象ではないことを示している。

3.3 組織観察

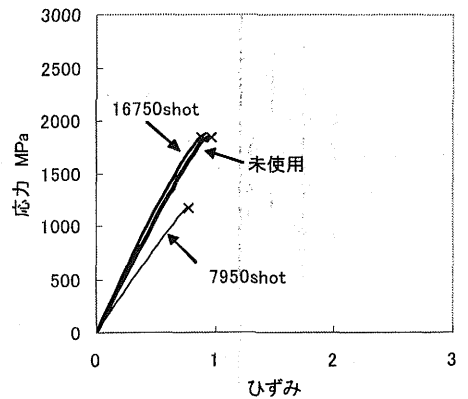
引張試験の結果は、試験片の採取方位や金型の耐用寿命の長さによって大きく異なった。この原因を調べるために、走査型電子顕微鏡による金型の各断面の組織観察を行った。図14は耐用寿命が7950個と短かった金型の組織である。同図(a)縦方向断面(鍛造方向に平行な断面)、(b)横方向断面(鍛造方向に垂直な断面)の写真である。縦方向断面では、鍛造方向と平行に細長く炭化物が偏析していることがわかる。引張試験において、L-R方向の引張強さが高かったのは、炭化物の長手方向と負荷方向が一致していたために、炭化物の影響が少なか



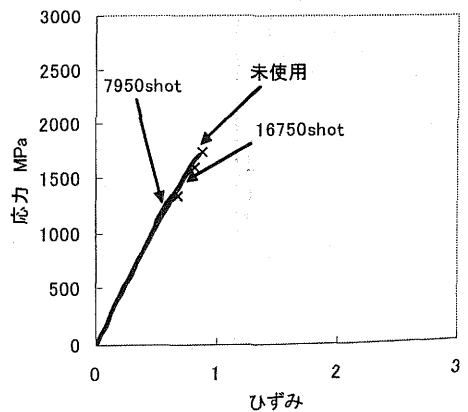
(a) L-R



(b) R-L



(c) C-R



(d) R-C

図10 引張試験結果

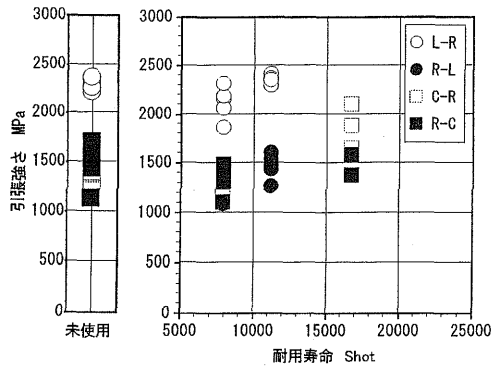


図11 耐用寿命と引張強さの関係

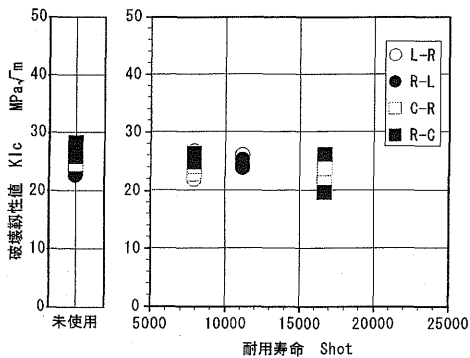


図12 耐用寿命と破壊靱性値の関係

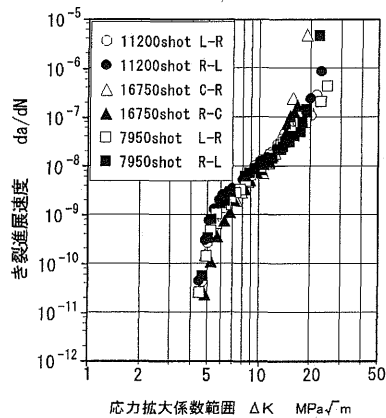
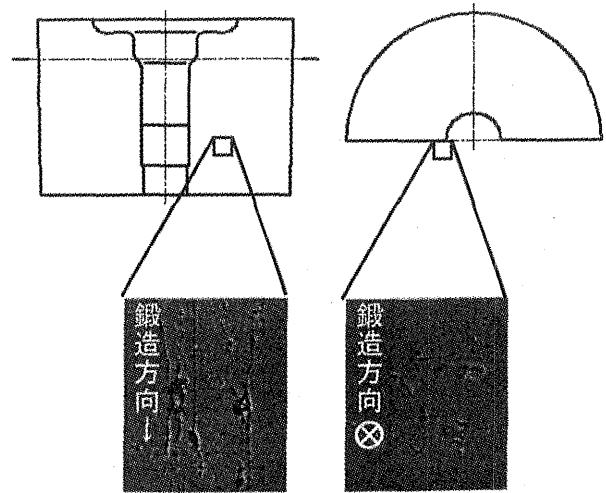


図13 疲労き裂進展特性

ったからであると考えられる。一方それ以外の方向では偏析した炭化物が破壊の起点となったと考えられる。図14は耐用寿命が11200個と長かった金型の組織写真（縦方向断面）であるが、炭化物の偏析は耐用寿命7950個の金型より小さくなっている。また耐用寿命が16750個と最も長かった金型では、炭化物の偏析はほとんど確認できなかった。炭化物の少ない金型ほど寿命が長いといえることができる。

以上の結果から、金型の寿命は主として金型材の引張特性に依存することがわかる。また破壊靱性値および疲



(a)縦方向断面 (b)横方向断面

図14 組織写真（耐用寿命7950shot）



図15 組織写真（横方向断面、耐用寿命11600shot）

勞き裂進展特性が、試験片の採取方位や耐用寿命によらずほぼ同一の結果になることから、金型の寿命はき裂の進展過程ではなくき裂の発生時期によって決まると考えられる。すなわち、き裂が一度発生すると、それ以降脱落が発生するまでに成形可能な個数は、耐用寿命の長短によらずほぼ一定であるといえる。き裂の発生時期は金型材の引張強さによってほぼ決定されることは注目すべきことである。

4. 金型の寿命向上への対策

本報告にあるように鍛造プロセスのシミュレーション計算から金型内に発生する最大主応力の大きさと位置を調べ、それを金型材の引張試験結果と比較することによって耐用寿命の予測は可能である。とくに金型形状の修正とシミュレーション計算を繰り返すことにより、高い応力がはたらく場所の応力集中を緩和させることができるから、寿命を改善することは十分可能である。一般に成形荷重全体を低下させるために、変形応力の少ない被加工材への変更や、バックアップリングでの締め付け力の増加を考えやすいが、合理的な根拠に基づくわずかな金型形状の変更によっても、大きな寿命向上が期待できる。また引張強さを優先した金型材種の選択および熱処理を行うことも効果的である。

なお引張特性については、金型材料メーカーの公表値は信頼性が低く、独自に行う正確な試験により詳細に調べる必要があると考えられる。