

# 超合金金型の損傷予測手法の開発

千葉工業大学 機械工学科

教授 金沢憲一

(平成5年度研究開発助成AF-93020)

キーワード：冷間鍛造，高速度鋼，金型

## 1. 研究の目的と背景

冷間鍛造加工に使用される金型には、極めて高い成形荷重が加わり、内部に発生する応力も高い。そのため、ほとんどの場合、表面の摩耗ではなく疲労や劣化により寿命が決定されることが多いと考えられる。とくに耐摩耗性に優れた超合金は高寿命が要求される加工に適しているが、使用の初期に破壊したり、予想される寿命より短くなることが少なくない。

冷間鍛造加工に使用される金型材の破壊や疲労の基礎データに関しては、主として金型材料メーカーが公表しているものが多いが、信頼性が低い。また鍛造加工中に金型が破壊する過程を調べるのが難しいために、破壊に関する研究例も少ない。

本研究では超合金製金型の寿命を向上させるためにどのような対策が必要かを検討するために、新しい寿命予測手法が提案できないか調べている。また、高寿命化のいくつかの対策について提案している。なお当初超合金での研究を開始したが、材料費がきわめて高価なため、高速度鋼に変更して進めた。ただし本研究での成果は超合金にも十分適用可能である。

## 2. 損傷過程の外観調査

本研究で対象とした冷間鍛造用金型は、自動車部品の成形用である。その成形は4つの工程で構成されるが本研究では特に、短寿命が問題となっている図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。中Cr-Mo-V系マトリックス高速度鋼を素材としている。この金型の損傷を模式化したものを図2に示す。成形個数が増すと、図中のカップ底部（a部）では円周方向に、フランジ円筒部（b部）では鍛造方向と平行な縦方向に、フランジR部（c部）では、円周方向と縦方向にき裂が発生する。さらに成形個数が増すとフランジR部において、表面の一部がはく離、脱落する。このような脱落が生じると、破片が被加工材に埋没することが多く、後の機械加工で工具等の破損を引き起こしたり、また製品形状が変化する。したがってこの時点が金型寿命になる。脱落が生じるまでの成形個数を耐用寿命と呼ぶ。

本研究ではまず、き裂の発生時期およびその進展過程を明確にするために、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。その結果、まず1～256個の成形個数では、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

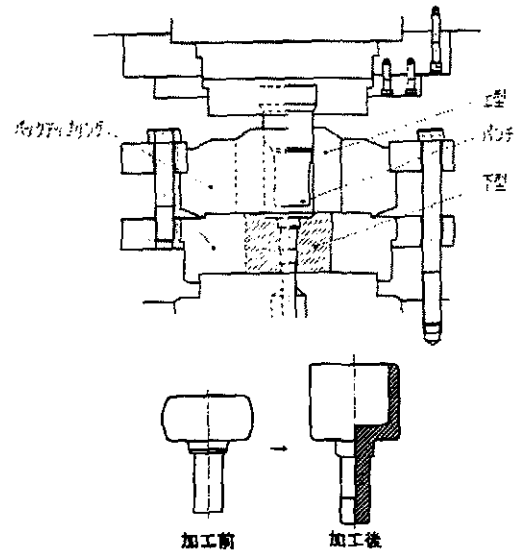


図1 工具配置および被加工材形状

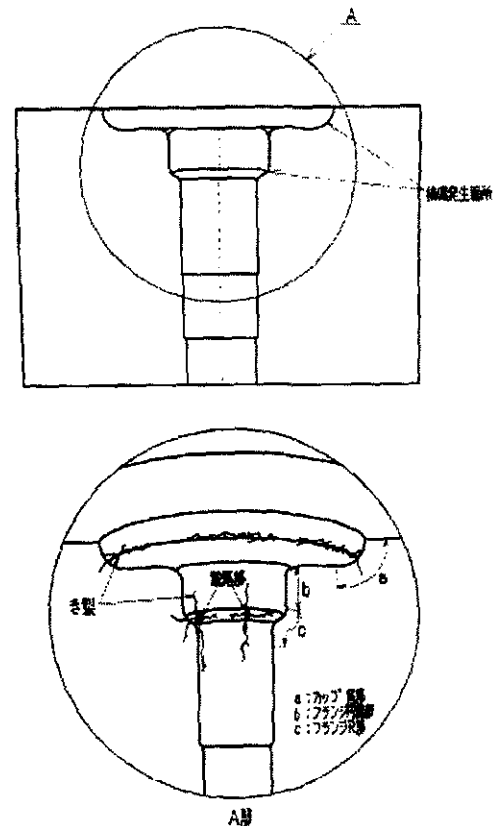


図2 金型損傷模式図

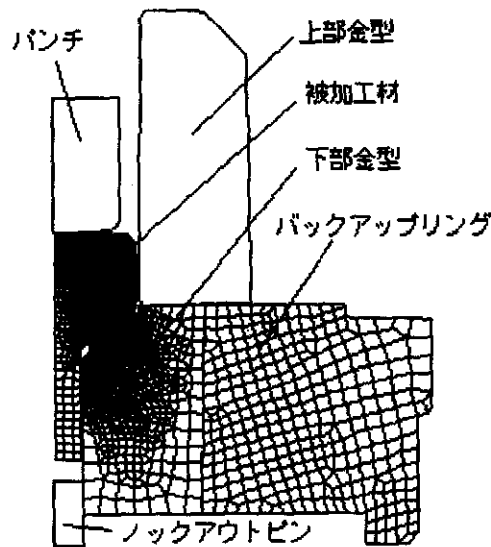


図3 計算モデル

表1 材料定数

	ヤング率 GPa	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	—

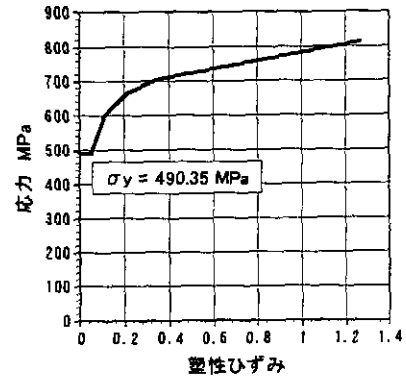


図4 被加工材の加工硬化曲線

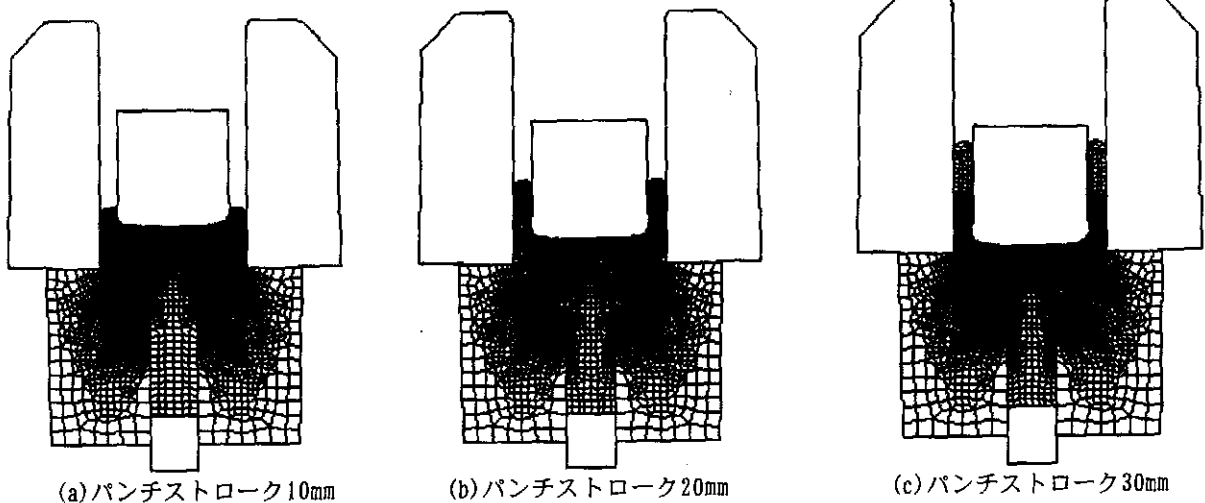


図5 変形図

発生した。このキズは成形が進むにつれて多くなったが、この段階ではき裂の発生を確認できなかった。その後1000個の成形を終えた時点で、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。はく離した表面を走査型電子顕微鏡で観察したところ、このき裂は、疲労き裂として結晶粒内を進展していることがわかった。

### 3. 有限要素法シミュレーションによる応力解析

#### 3.1 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た。計算に使用したプログラムは鍛造シミュレーションシステム DEFORM-2D (Ver. 7.0) である。作製したモデルを図3に

示す。2次元軸対称問題として扱っている。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。実際の加工と同様に、被加工材の材質としてS48C、金型として中Cr-Mo-V系マトリックス高速度鋼を想定した。被加工材、下部金型およびバックアップリングに与えた材料定数を表1に、被加工材の加工硬化曲線を図4に示す。パンチは実際には複雑な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った。パンチのストロークは30mmとした。境界条件については、被加工材の対称軸上の節点を半径方向に拘束した。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し、底面にあたる節点を対称軸方向に拘束した。被加工物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、計算においても圧入を再現し、あらかじめ金型内に圧縮応力を発生させた。

### 3.2 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5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部と接触した。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た。成形荷重の履歴を図6に示す。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している。フランジR部に接触すると成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している。パンチストローク18.1mmのときに成形荷重は最大値を示し、その値は731tonであった。2

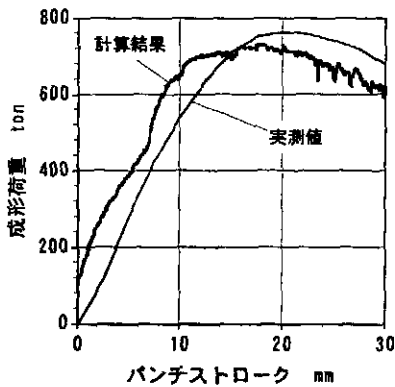


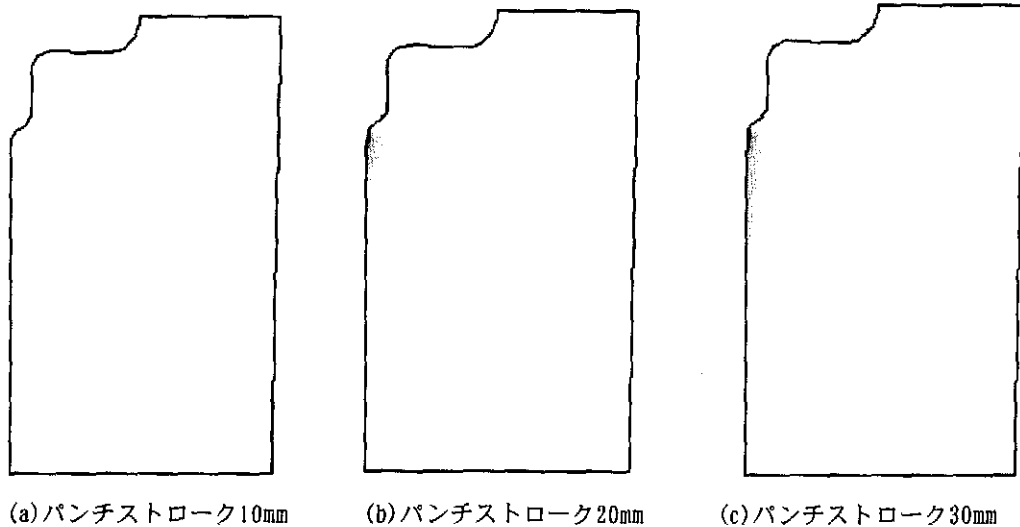
図6 成形荷重履歴

単位：MPa

1000



0



(a)パンチストローク10mm

(b)パンチストローク20mm

(c)パンチストローク30mm

図7 最大主応力分布(引張成分)

次元軸対称問題として扱ったにもかかわらず、計算で得られた成形荷重は、実測値とよく一致している。なお実測値での最大値は、パンチストローク20mm前後で生じ、その値は764tonである。

### 3.3 主応力分布

図7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。カップ底部では、10mmの段階ですでに引張応力が発生している。このときフランジ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、疲労の存在が推察される。また引張応力が発生する箇所は、実際の金型においてき裂が発生する箇所とほぼ一致している。そしてその方向は、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部では円周方向であり、いずれも最大引張応力の方向と直角であった。これらのことから、この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。

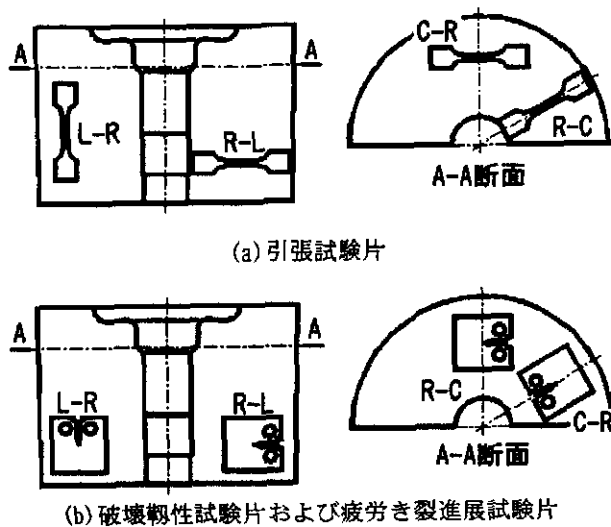


図8 試験片採取方位

#### 4. 金型材の機械的特性

##### 4.1 試験条件

金型材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8参照)。

##### 4.2 試験結果

《引張試験》 引張試験の結果を図9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10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破壊靱性値 $K_{Ic}$ と耐用寿命との関係を図11に示す。この図から $K_{Ic}$ は耐用寿命の長さや試験片の採取方位に関係なく、20~25 $MPa\sqrt{m}$ 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耐用寿命を決定し、個々の金型の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12に示

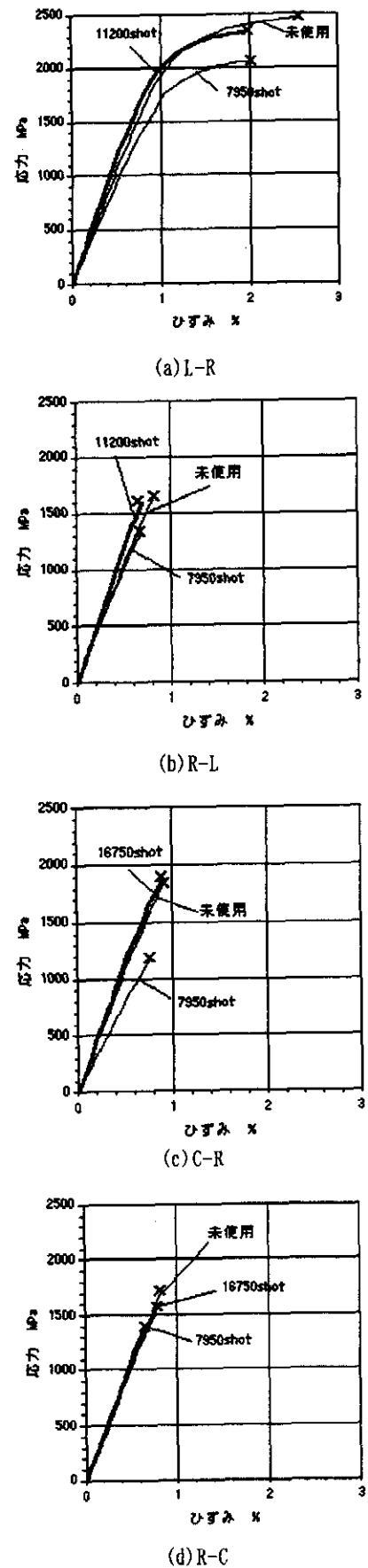


図9 応力-ひずみ線図

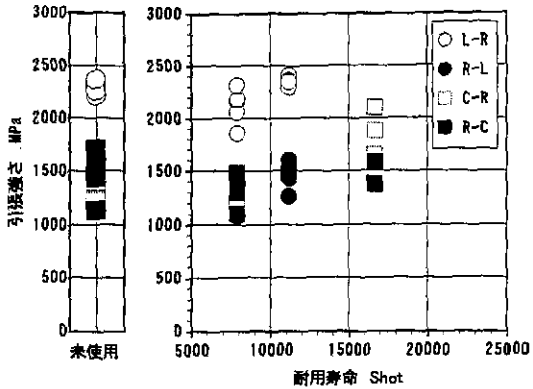


図10 耐用寿命と引張強さの関係

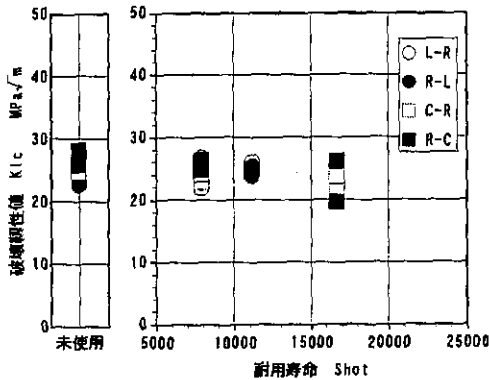


図11 耐用寿命と破壊靱性値の関係

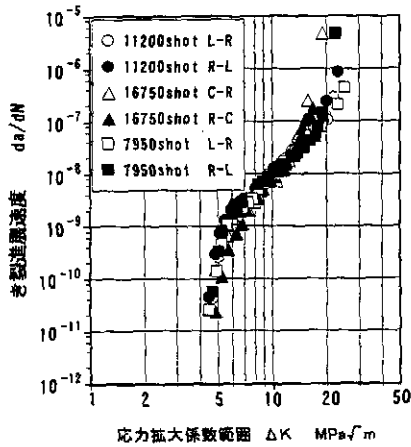
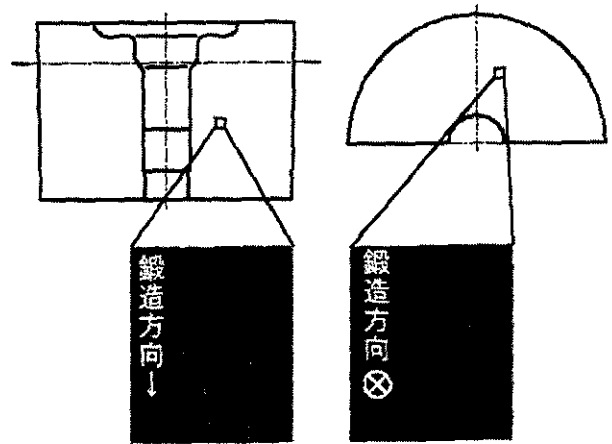


図12 疲労き裂進展特性

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。

### 4.3 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



(a)縦方向断面 (b)横方向断面

図12 組織写真 (耐用寿命7950Shot)



図13 組織写真

(横方向断面, 耐用寿命11200Shot)

を行った。図13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個ともっと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。寿命が長い金型ほど、引張強さが高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労き裂進展特性が、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。

## 5. 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熟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。