



K. Hayakawa

損傷力学による冷間鍛造における工具・素材の欠陥予測

早川 邦夫*

1. 緒言

損傷力学（または連続体損傷力学）は、材料の損傷と破壊の進行過程を連続体力学的な立場から解析するための力学理論である。すなわち、微小空隙あるいは微小き裂の発生・成長から巨視的き裂の発達による最終破壊までの損傷・破壊過程を記述できる連続体力学的枠組みである。この理論を塑性加工に用いることにより、鍛造工程で生じる工具や素材の内外部に発生・成長する欠陥を考慮したの材料のモデル化や、工程中の欠陥の発展に対する数値解析が可能となる。

また、図1に示すように、損傷力学を有限要素解析に用いれば、材料損傷を表現する変数（損傷変数） $D(x)$ がある値に達した要素を消去することにより、き裂の発生・進展を連続的に解析できる。このような解析法を局所的解析法（Local Approach）と呼んでいる。

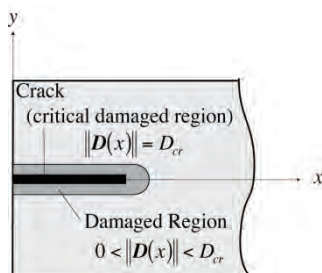


図1 損傷力学による局所的解析法

本稿では、著者らがこれまで行ってきた損傷力学的枠組みを用いた鍛造における工具・素材の欠陥の発展の数値解析について紹介する。

2. 損傷力学による冷間鍛造工具の損傷・破壊予測

近年、コンピューターの発達とともに、鍛造工程に対する有限要素解析が大いに用いられている。これらの解析では、素材の変形状態とともに、工具に作用する応力状態を評価し、その供用寿命向上に用いることも多く行われている。冷間鍛造における工具破壊は、主に過大な応力が繰返し作用することによる疲労き裂伝播によるものが多い。そのため、き裂がどのように伝播するかを予

測することは寿命予測に有効である。そのためには、工具材料に対する精密な弾塑性構成式が必要となる。しかし、従来では、工具の変形・破壊予測は、弾性体モデルで解析され、主に最大主応力の発生箇所により予測されていた。

工具に用いられる材料の特長として大きいものは、引張りりと圧縮挙動の顕著な違い（応力方向依存性）であり、多くの実験結果からこの特徴が明らかにされている。これらは、主に材料の硬度を高めるために内部に分布している炭化物と母材の界面が引張り主応力下ではく離し、微視的な応力集中が生じることが原因であると考えられる。また、工具の破壊の起点では、しばしば引張り主応力が支配的であり、応力方向依存性を考慮した材料モデルは、工具材料の変形、損傷の解析に必要不可欠である。

被加工材の損傷の評価法としては、Cockloft&Latham, Oyane の式など、数多くの延性破壊評価式が提案されており、有限要素解析における簡便な評価法として重用されている。これらにより素材の工程中の内部空洞の発展などを解析することも多く行われている。しかし、これらの評価式は解析で得られた最大主応力や平均垂直応力などの応力に関する式と塑性ひずみ増分の積の経路積分の形で与えられているため、塑性変形がほとんど生じない工具に対しては利用できない。

著者らは、工具材料の異方損傷を表現できる連続体損傷力学的枠組みにより工具材料の構成式を構築した。異方損傷を表現するため、2階対称な損傷テンソル D を用いて、それを弾塑性挙動に組み込んだモデルを作成した。さらに、引張りりと圧縮とで異なる損傷の発展の挙動を表現することで、工具材料における顕著な応力方向依存性を表現できる構成式を定式化した。この構成式を工具鋼 SKD11 ならびに超硬材料 WC-Co (25%Co) に対して適用した。

図2は SKD11 に対する解析結果、図3は WC-Co に対する解析結果と実験結果の比較を示す。応力方向依存性を考慮することで精度の高い予測が可能となった。SKD11 に対しては、等方硬化モデルを用いたため、圧縮側の挙動に差異が生じている。WC-Co に対しては、繰返し挙動をより精度良く表現するため、移動硬化則を採用したため、より精度の高い結果が得られた。図4は WC-Co の圧縮における繰返し挙動の実験結果を予測した結果である。(a)は全サイクルの予測、(b)は最終サイクル(200サイクル)における実験と解析結果の比較を示す。非常に高い精度で一致していることがわかる。

提案した構成式を用いて、冷間押し出し金型 (SKD11)

* 静岡大学工学部機械工学科・准教授

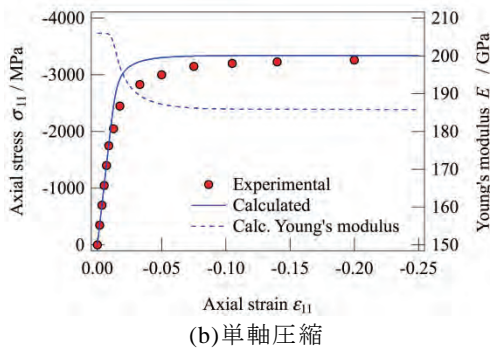
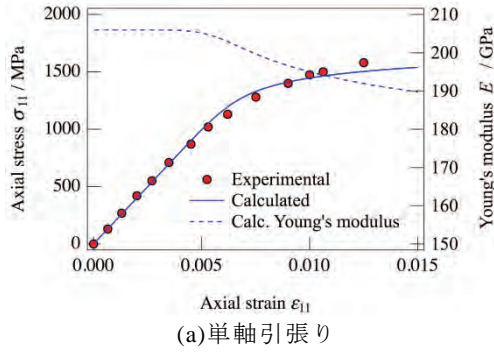


図2 工具鋼 SKD11 に対する単軸試験と提案した構成式による解析結果

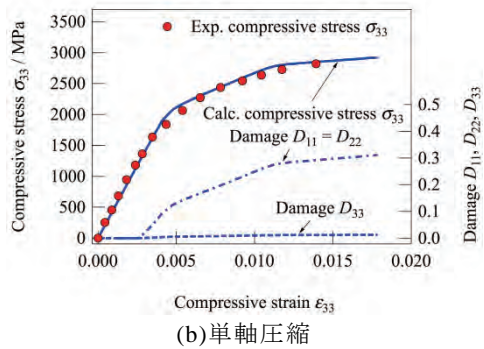
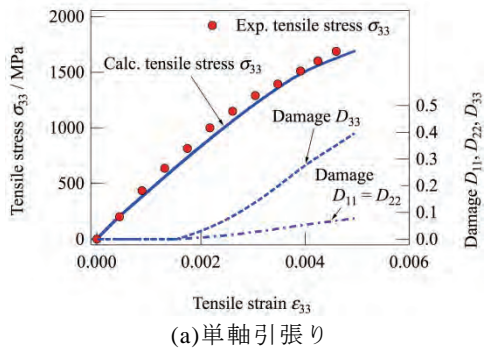


図3 超硬材料 WC-Co に対する単軸試験と提案した構成式による解析結果

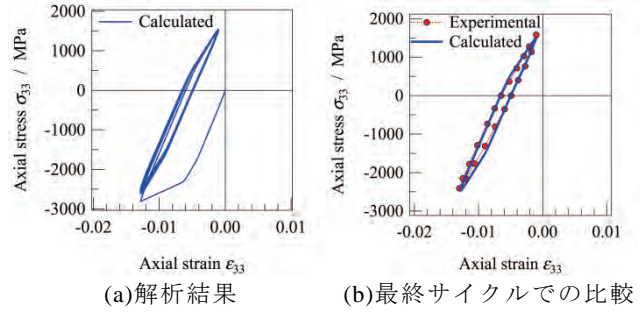


図4 超鋼材料 WC-Co に対する繰返し挙動の実験および解析結果

の繰返し工程におけるき裂進展挙動を解析した。図5に対象とした冷間押し出し素材および金型の寸法を示す。通常用いる焼ばめリングは用いず、金型外側の半径方向変位を零とおいた。解析には商用有限要素ソフトウェア MSC.Marc を用い、提案した構成式や境界条件をユーザーサブルーチンを用いて導入した。図6は繰返し数 N に対するき裂の長さを示す。点線は実験結果である。 $N = 2000$ 程度までは、実験結果と概ね一致しているが、それ以降については、解析結果ではき裂の進展はあまり進まない。これは、実験では、き裂内部に進入した潤滑油や素材により、き裂をさらに押し広げる効果によるき裂進展が生じるが、解析ではその効果を見逃したのが原因である。このように、応力方向依存性を表現できる工具材料の弾塑性-損傷構成式を利用することにより、従来の弾性体モデルによる破壊位置予測方法より高精度な評価が可能になった。

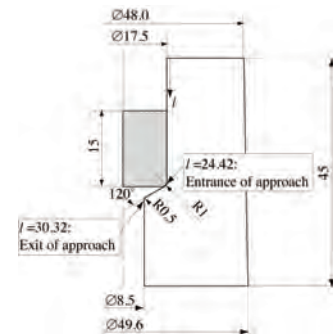


図5 SKD11 製工具のき裂新展解析モデル寸法

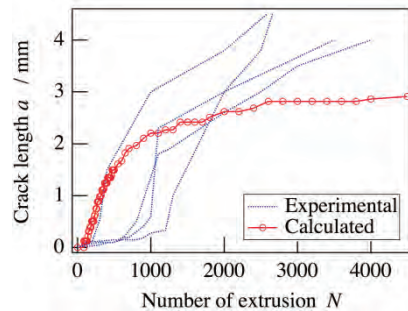


図6 SKD11 製工具き裂長さ-繰返し数の解析結果

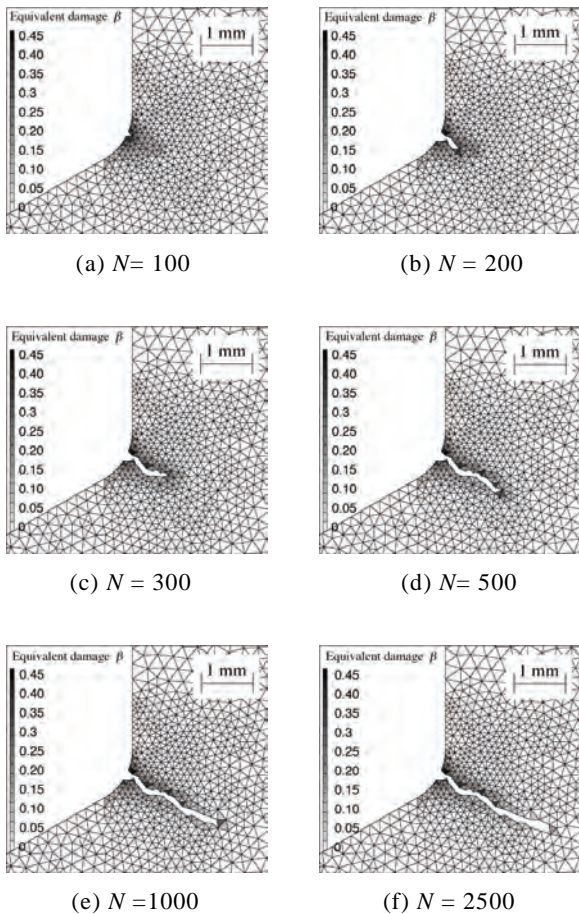


図7 各繰返し数におけるき裂進展の様子

3. 工具被膜界面強度に対する損料力学的解析

鍛造用工具においては、摩耗、焼付きや塑性変形による破損を防ぐために、TiNやTiCなどの硬質被膜を施した工具が多く使用されている。しかし、実際の被膜工具の使用状況下では、被膜のはく離や被膜自身の破壊等の問題がある。特に被膜と工具との材料特性の違いに起因する界面の非適合な変形により硬質被膜の界面のはく離が生じやすい。被膜工具のさらなる発展には、このような界面挙動の把握やはく離強度あるいは寿命の実験的ならびに解析的側面からの評価が重要であり、研究が進められている。

スクラッチ試験や押し込み試験では、工具-被膜がスライダや圧子によって押し込まれる。従来の有限要素解析の多くは、その状態を模擬しているが、実際の鍛造工具の硬質被膜の界面挙動を適切に評価するためには、実際の鍛造により近い条件での解析が望まれる。

著者は、図8のような工具被膜界面強度評価モデルについて被膜界面挙動を解析した。その際、被膜界面の強度評価のための数値解析手法として、図9のように界面にばね要素を配置し、そのばねに図のような損傷力学的的手法による構成モデルを与えた。この評価モデルは、実際の鍛造工程を単純化したモデルではあるが、スクラッチ試験法や押し込み試験法と異なり、被膜された工具と素材

の変形の関係が実際の鍛造と同様であり、被膜工具に対する素材の塑性流動、被膜-素材間の摩擦状態の変化をより適切に考慮できるものとして提案した。さらに、押し込みを繰り返すことにより界面はく離疲労寿命も考慮できるモデルである。このモデルを図10のような条件で有限要素解析を行い、界面ばねの界面垂直およびせん断方向変位挙動を解析した。解析には前章同様にMSC.Marcを用いて、ユーザーサブルーチンにより界面損傷ばねモデルを導入した。

図11(a)および(b)は、押し込み量 s をパラメータとしたときの、界面位置(に対する法線方向および接線方向界面相対変位の関係を示す。また、それぞれの押し込み量 s における工具と素材の押し込み周縁部の位置を記号●で示す。

これらの図より、法線方向界面相対変位の位置は押し込み周縁部の後方であり、いっぽう、接線方向界面相対変位の分布は、押し込み周縁部の前方であることを明らかにした。硬質被膜は、押し込み周縁部で工具が素材を押し力およびその反力によって拘束を受ける。しかし押し込みによる力によって強制的に押し込まれることにより被膜は

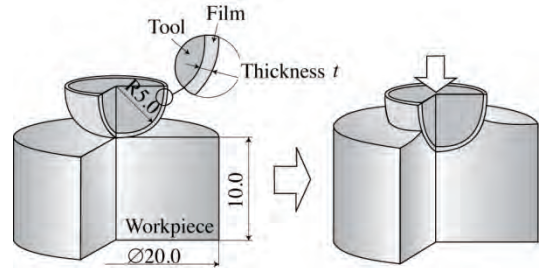


図8 工具被膜界面強度評価モデル

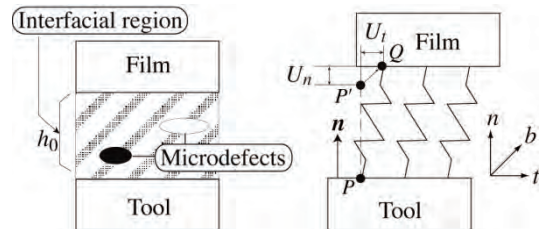


図9 界面損傷ばねモデル

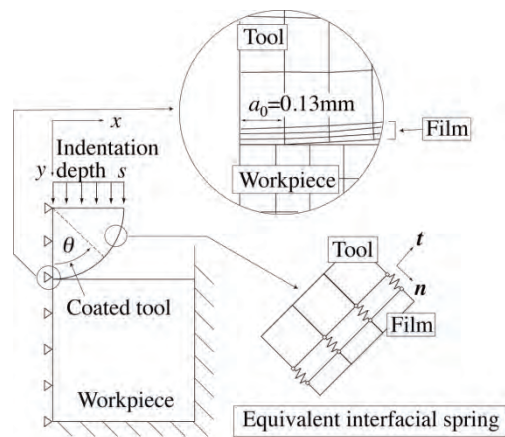
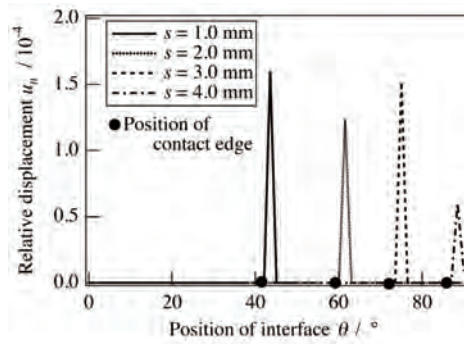
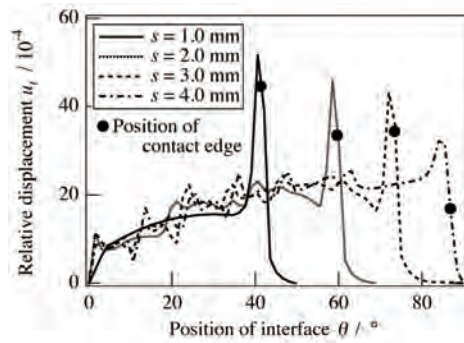


図10 界面強度評価モデルの有限要素解析



(a) 法線方向変位



(b) 接線断方向変位

図 11 界面法線および接線方向ばね変位の解析結果

圧縮を受け、局部的に座屈し、最大法線方向相対変位を生ずる。この変位により界面損傷変数が発展しはく離に至る過程を模擬できる。

4. 鍛造素材の内部割れに対する損傷力学の適用

鍛造素材の構成式を損傷力学的枠組みで定式化すれば、図 1 の局所的解析法を用いることにより、鍛造工程に発生する素材欠陥予測が可能となる。この手法は、延性破壊条件式を用いる手法とほぼ同様であるが、損傷発展式のモデル化の柔軟性はより高い。ここでは、損傷力学を用いて定式化された鍛造素材の構成式の応用例として、円柱の前方押し出し工程における素材内部の割れ（シェブロンクラック）について解析する。

解析には、前章と同様に商用有限要素ソフトウェア MSC.Marc を用いた。ユーザーサブルーチンを用いて、定式化した構成式を組み込んだ。また、破壊の表現には、損傷値が限界に達した要素の剛性をゼロとおいてさらに計算を継続する方法を用いた。この手法を実現するため、さらにユーザーサブルーチンを用いた。

図 12 は、解析に用いた軸対称有限要素解析モデルを示す。左側の軸が対称軸である。右側の線分はダイスを、上側の線分はパンチを表す。有限要素は四辺形アイソパラメトリック要素を用いた。変形の進行にともなう自動要素再分割は行っていない。また、計算の便宜上、先端がすでにダイスに挿入されている状態から計算を行った。

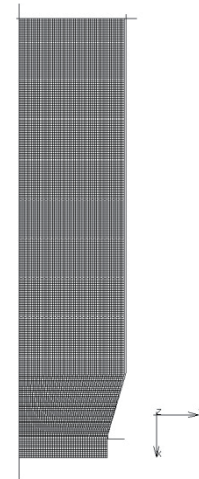


図 12 前方押し出しに対する有限要素モデル

本解析では、異方損傷の程度を示す変数 χ を導入した。 $\chi=0$ の場合は等方損傷となる。本論文では、 $\chi=0, 1.15 \times 10^{-3}$ および 2.3×10^{-3} の 3 つの値を用いて解析の比較・検討を行った。

有限要素および節点数は、それぞれ 12500 および 12801 である。また、パンチおよびダイと素材の間の摩擦は無視して解析を行った。

座標系については、図 12 のとおり、軸方向、半径方向および円周方向がそれぞれ x, y および z 方向となる。

Fig.3 は、 $\chi=0.0$ 、すなわち等方損傷状態における押し出し時の内部欠陥の発生予測結果を示す。欠陥とその周囲の損傷変数の分布を同時に示す。この場合の結果は、従来から用いられている Oyane の延性破壊予測パラメータを用いた場合と類似の結果を示す。すなわち、軸内部の連続したシェブロンクラックの発生を予測する。

Fig.4 は、 $\chi = 1.15 \times 10^{-3}$ のときの異方損傷を考慮したときの鍛造品破壊予測結果である。この場合、平均垂直応力による損傷と、引張り偏差応力による損傷を同時に考慮していることに相当する。これは、従来多用される

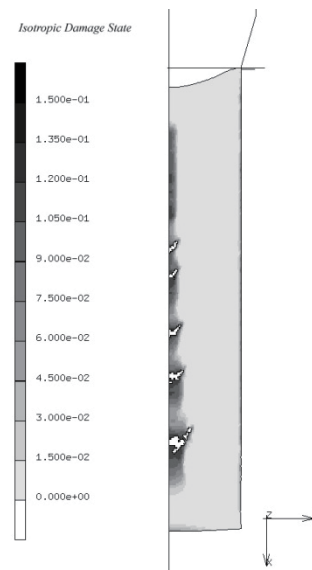


図 13 等方損傷状態 ($\chi=0$)におけるシェブロンクラック

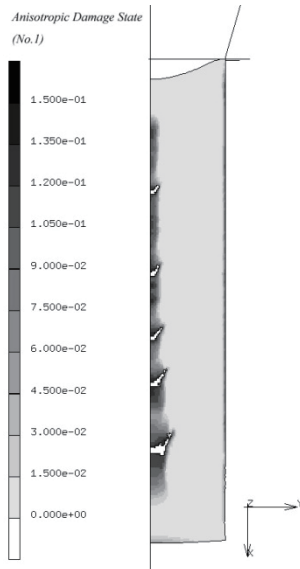


図 14 異方損傷（平均垂直応力および引張り偏差応力）によるシェブロンクラック

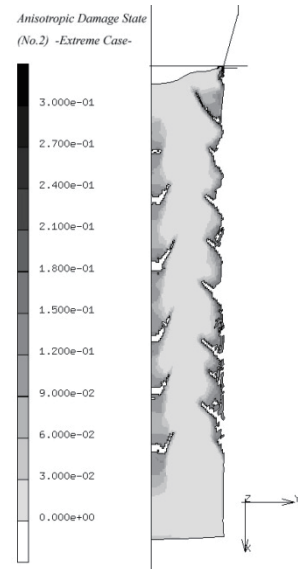


図 15 極端な異方損傷によるシェブロンクラックおよび外周割れ

延性破壊予測式としては、Oyane（平均垂直応力）と Cockloft & Latham（最大主応力）の式を同時に考慮することになる。しかも、本論文における損傷は2階のテンソルであるので、損傷発生に伴う材料の直交異方性を考慮することができる。

図 14 をみると、軸方向内部の損傷発展については図 13 の等方損傷の場合と同様であるが、ダイに接している外周の損傷がより大きくなっている。歯車の押出加工などでは歯先に矢印状のき裂が連続する場合があるが、それに相当する損傷を表現していると考えられる。加工に用いる材料の特性によっては、内部のシェブロンクラックより外周の割れが支配的な場合もあることを示唆している。

損傷テンソルの成分を詳しくみると、軸内部の損傷テンソルの成分は軸方向、半径方向および円周方向ともにほとんど同じ値を示している。いっぽう、軸の外周の損傷テンソル成分は、軸方向の成分が他の方向に比べて約 1.5 倍大きい。すなわち、軸方向に垂直なき裂を生じさせる損傷成分が大きい。

図 15 は、 $\chi = 2.3 \times 10^{-3}$ における押出加工材の破壊予測結果である。この解析結果は、 χ を極端に大きく取った場合である。一般に鍛造に使用される鉄鋼材料は延性が高いので、材料損傷の形態はほぼ等方的である。実際に、Fig.5 の解析に用いた極端な χ を単軸引張り解析に適用すると、得られる損傷テンソル成分 D_x 、 D_y および D_z はほぼ同じ値であった。単軸負荷のような単純な応力状態では、ほとんど影響を及ぼさないような小さな異方性でも、加工法によっては大きな影響を及ぼすことがわかる。

5. 結 言

損傷力学の鍛造工程における素材・工具の破壊予測手法への適用に関して、著者らがこれまで行った解析について述べた。現在、海外ではプレス成形、せん断加工な

どに対しても損傷力学的手法の適用が試みられている。本稿が、損傷から破壊に至るより広範な現象を記述できる損傷力学の枠組みの塑性加工への応用に対する理解を深める一助となれば幸いである。

謝 辞

本研究の一部は、天田金属加工機械技術振興財団からの研究助成によることを付記し、ここに深甚なる謝意を表します。

参考文献

- 1) 早川邦夫, 中村保, 田中繁一: 局所的破壊解析法による冷間鍛造工具の疲労き裂発生・進展の解析, 塑性と加工, 43-497 (2002), pp. 546-550
- 2) 早川邦夫, 中村保, 田中繁一: 冷間工具鋼の応力方向依存性を考慮した弾塑性-損傷構成式 塑性と加工, 43-496 (2002), pp. 417-421
- 3) K. Hayakawa, T. Nakamura, S. Tanaka: Analysis on Fatigue Crack Initiation and Propagation of Cold Forging Tools by Local Approach to Fracture, Material Transaction, 45-2 (2004), pp. 461-468
- 4) 早川邦夫, 中村保, 原田邦明, 田中繁一: 界面損傷力学による鍛造用硬質皮膜工具の工具母材-被膜界面挙動に対する有限要素解析, 塑性と加工, 45-517 (2004), pp.113-117
- 5) K. Hayakawa, T. Nakamura, S. Tanaka, K. Harada: Analysis of Interfacial Damage and Debonding Life Estimation of Cold Forging Tool Coated by Hard Film, Material Transaction, 45-9 (2004), pp.2832-2837
- 6) K. Hayakawa, T. Nakamura, S. Tanaka: Elastic-plastic Behavior of WC-Co Cemented Carbide Used for Forging Tool Considering Anisotropic Damage and Stress Unilaterality, Internal Journal of Damage Mechanics (to appear in Jan., 2010)