油圧多軸プレス機による板鍛造技術に関する研究（第２報）

生産技術部
田中　徹
材料環境部
円城寺隆志
佐賀大学工学系研究科
萩原世也
森鉄工株式会社
森　孝信

近年，板鍛造技術は板厚の精度や機械的性質が安定している圧延板材を用いて，部品の板厚を効果的に変化させる成形法として注目されている．板鍛造成形をプレス機で実現するためには，分割した金型をプレス機の多軸駆動に組み合わせて成形を行う必要があり，非常に複雑な成形工程となる．そのため成形順序によっては，板材の表面に割れが発生するなどし，最終形状に至らないといった問題がある．この様な問題に対して，延性破壊条件を有限要素法解析に組み込み，その解析の結果から割れの発生を予測する方法がある．しかし，表面の割れの発生を予測するために必要となる延性破壊臨界値を一般的な材料試験だけで得ることが難しく，この方法が利用されている実際例は少ない．そこで，本研究では，打ち抜き加工サンプルの切断面を観察し，その切断面に分布する延性破壊条件値からサンプル材料の延性破壊臨界値を求める有限要素法解析の方法を提案した．その結果，延性破壊条件における破壊臨界値に近い値が得られることを確認した．

１．はじめに

自動車部品などの生産現場には，プレス機を用いた塑性加工による連続生産が取り入れられている．近年，板鍛造技術（Flow Control Forming of Sheet Metal）は，部品の板厚を効果的に変化させる成形法であり，板厚の精度や機械的性質が安定している圧延板材への適用が注目されている．

板鍛造の成形をプレス機で実現する場合は，分割した金型をプレス機の多軸駆動に組み合わせて成形を行う必要があり，非常に複雑な成形工程となる．そのため，複雑な成形順序の組み方によっては，板材の表面に割れが発生し，最終形状に至らないといった問題がある.表面の割れの発生を予測するため，これまでに様々な研究が行われている．それらの研究での予測手法は，延性破壊条件を有限要素法解析に組み込み，その解析の結果から割れの発生を予測する方法である[1,2]．

しかしながら，それらの研究による予測方法を利用している実際例は少ない．その理由として，表面の割れの発生を予測するために必要な延性破壊臨界値は材料ごとに特有の値であり，引張試験などの一般的な材料試験だけでその値を得ることは難しく，決定法も含め予測方法が確立されていないことがあげられる[3]．

そこで本研究では，打ち抜き加工した切断面のせん断面と破断面を観察し，その分布から延性破壊条件値を求めることができないかについて検討する．材料の延性破壊臨界値を求めることができれば，プレス成形加工の現場でも延性破壊条件を実用的に利用することが可能となる．さらに，打ち抜き加工実験によって，圧延板材の延性破壊臨界値を求めることで，板鍛造成形時に生じる表面の割れを予測することが可能となる．

本報告では，実際の打ち抜き加工実験を行うとともに，その加工について延性破壊条件を組込んだ有限要素法解析を行い，それぞれの結果を比較することで延性破壊臨界値を求める方法について検討した．

２．打ち抜き加工実験

打ち抜き加工における切断面の品質を評価するために行った，打ち抜き加工実験装置の模式図を図１に示す．

今回の打ち抜き加工実験は，図２に示す簡易打ち抜き金型（株式会社ミヤギ製ハイセット）を精密万

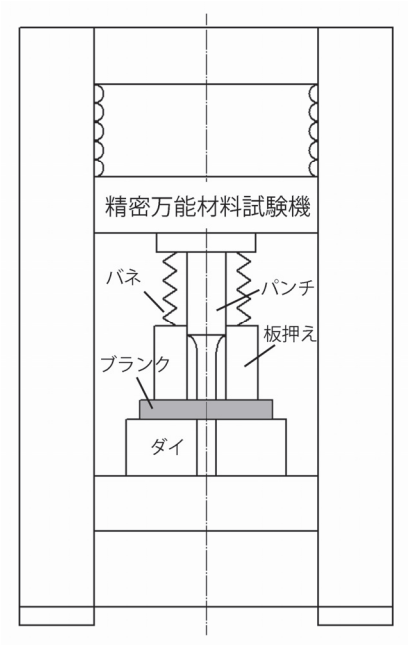

図１　実験装置の模式図

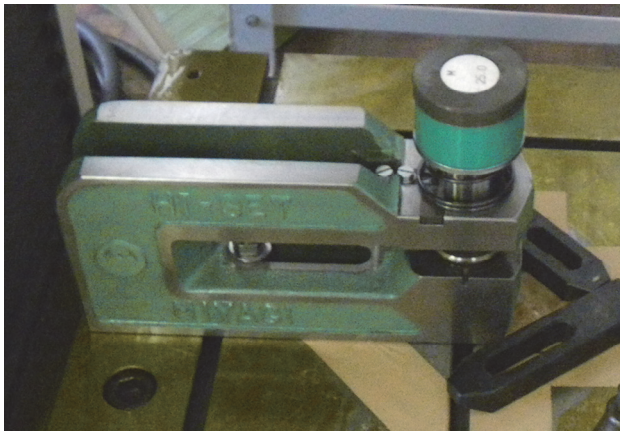

図２　簡易打ち抜き金型（ハイセット）

能材料試験機（島津製 AG-250kN）に設置し，試験機で上側からパンチを押すことでブランク材を打ち抜いた．この実験で打ち抜く時のパンチ速度は 25mm/min とした．また，ブランク材は，冷間圧延鋼板 SPCC とし,その厚さは 1.6mm と 3.2mm の 2 種類とした．パンチ径は 10mm，15mm，20mm 及び 25mm の 4 種類とし，パンチ径ごとに相応するダイ穴径を表 1 のように合計 8 種類準備した．

打ち抜き加工実験は，ダイ穴径ごとに 5 回行い，2 種の板厚さに対し，合計 80 個（ダイ穴径 8 種×5 回×板厚さ 2 種）のサンプルを得た．

３．打ち抜き加工の有限要素法解析

3.1 ハードウェアおよびソフトウェア

表１　金型のパンチ径ごとのダイ穴径の種類

パンチ径［mm］	ダイ穴径［mm］
10	10.2, 10.6, 10.8
15	15.2
20	20.2
25	25.2, 25.6, 25.8

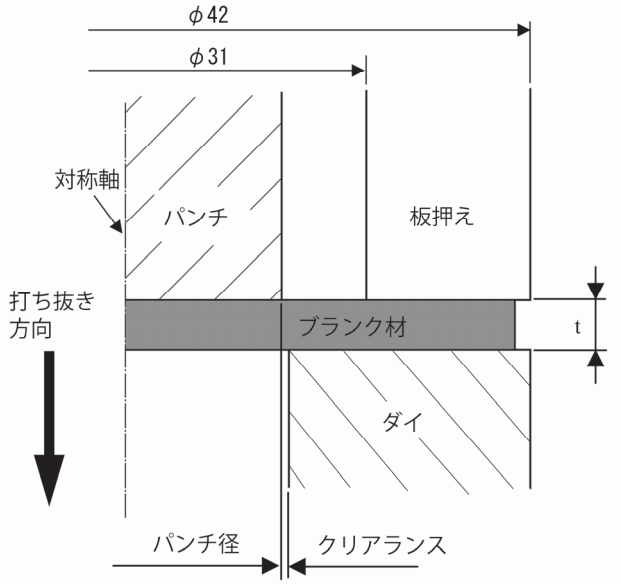

図３　解析モデル

解析に使用したハードウェアは，WorkStation xw 8600（HP 製）であり，ソフトウェアには，汎用の非線形構造解析システム MSC.Marc2010 を使用した．

3.2 解析モデル

有限要素法解析で使用した打ち抜き加工の解析モデルを図３に示す．解析モデルはパンチの中心軸を対称軸とする軸対称モデルとし，ブランク材の外径がφ40mm，板厚さｔが 1.6mm と 3.2mm の 2 種類，パンチ径およびダイ穴径は表１に示す組み合わせとした．また，板押えについては，打ち抜き加工実験に用いた金型に合わせた大きさとした．

なお，ブランク材は弾塑性体に，各工具は剛体に設定し，材料と各工具および各工具間の接触面に作用する摩擦力は考慮していない．

3.3 ブランク材の材料モデル

使用した材料モデルは塑性流れ理論に従う等方性材料とし，打ち抜き加工実験に使用した SPCC（冷間圧延鋼板）の材料物性値を設定した．材料物性値を求めるために，SPCC の引張試験を行った．ここで，試験で得られた弾性域での材料定数と塑性域での流動応力と塑性ひずみの関係を，表２および図４にそれぞれ示す．

表２　SPCC の材料定数

項　目	値
ヤング率 [GPa]	200
ポアソン比 [-]	0.3
降伏応力 [MPa]	154

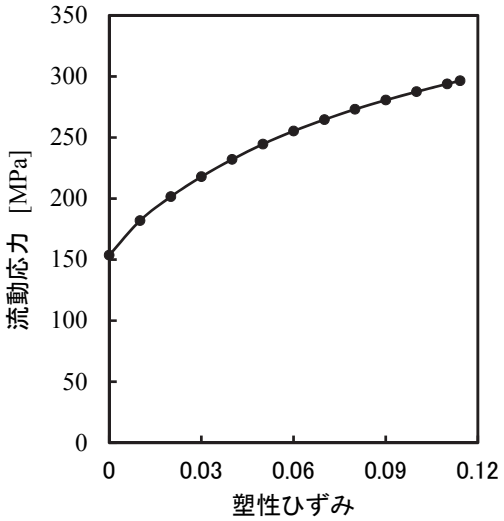

図４　流動応力－塑性ひずみ曲線

3.4 解析条件

打ち抜き加工は塑性変形による大変形を伴う現象であることから，要素分割したモデルの要素の変形が大きく，通常の解析方法では要素がつぶれて計算が停止する可能性がある．

そこで，要素が大きく変形した場合や，要素が剛体と接触する際に剛体側へ貫通が生じた場合に，要素を構成する節点を移動し，要素の再生成を行いながら計算を実行するリメッシング機能を適用した．

また，打ち抜き加工による切断部を評価するために，表３に示す Ayada，Rice and Tracey，Cockroft and Latham および Brozzo の４つの延性破壊条件式[4)] を有限要素法に組み込んで解析を行った．

ここで，σ_H は静水圧応力，σ_{eq} は相当応力，$\sigma_{\max}$ は最大主応力，$\bar{\varepsilon}$ は相当ひずみ，$\bar{\varepsilon}_f$ は破壊が生じる相当ひずみであり，C_1，C_2，C_3，C_4 は破壊条件値で材料固有の値である．

４．打ち抜き加工結果の測定方法

図５に打ち抜き加工により，得られる切断部の破断面とせん断面の状態の模式図を示す．打ち抜き加工で得られたサンプルについて，マイクロスコープ（キーエンス製 VH-Z100）を用いて，切断部における破断面とせん断面の境界が最大位置の l/t と最小

表３　延性破壊条件式

名　称	条件式
Ayada	$\int_0^{\bar{\varepsilon}_f} (\frac{\sigma_H}{\sigma_{eq}}) d\bar{\varepsilon} = C_1$
Rice and Tracey	$\int_0^{\bar{\varepsilon}_f} \exp(1.5\frac{\sigma_H}{\sigma_{eq}}) d\bar{\varepsilon} = C_2$
Cockroft and Latham	$\int_0^{\bar{\varepsilon}_f} (\frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{eq}}) d\bar{\varepsilon} = C_3$
Brozzo	$\int_0^{\bar{\varepsilon}_f} \frac{2}{3} (\frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{\max} - \sigma_H}) d\bar{\varepsilon} = C_4$

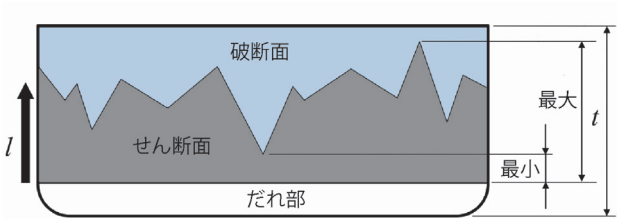

図５　切断部の状態

位置の l/t を測定し，その平均の l/t を評価位置（以下，これを平均せん断面評価位置と言う）とする．ここで，t はサンプルの厚さ，l はサンプル下面からダレ部を省いた切断面の評価位置までの距離とする．

５．結果および考察

図６に打ち抜き加工実験により得られた，クリアランスと平均せん断面評価位置の関係を示す．この結果は，１つのパンチ径とダイ穴径の組み合わせから得られた 5 個の加工サンプルの平均せん断面評価位置 l/t を測定し，その 5 個の平均値である．従って，２つの板から合計 16 点が得られる結果となっている．

この結果から，クリアランスが大きくなるにしたがって，平均せん断面評価位置が小さくなっており，破断面が増加しているのが確認できる．

図７に打ち抜き加工の有限要素法解析の結果の１つを示す．これは，板厚さ 1.6mm，パンチ径 φ10mm，ダイ穴径 φ10.2mm（クリアランス 6.25%t）の解析モデルについて，それぞれの延性破壊条件式で解析を行った結果である．この結果から，それぞれの延性破壊条件における切断面に沿った延性破壊条件値（C 値）を得ることが可能になる．

ここで，図６に示す a のデータについて考察する．クリアランスが 6.25%t の金型で打ち抜いた加工サンプルを測定したとき，平均せん断面評価位置は 0.46 であった．さらに，図７より平均せん断面評価

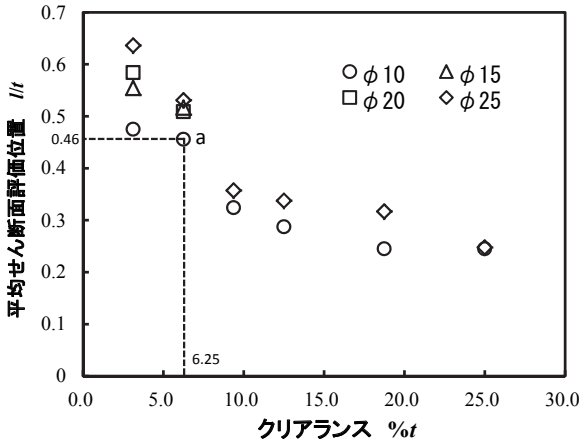

図６　クリアランスと平均せん断面評価位置との関係（打ち抜き加工実験の結果）

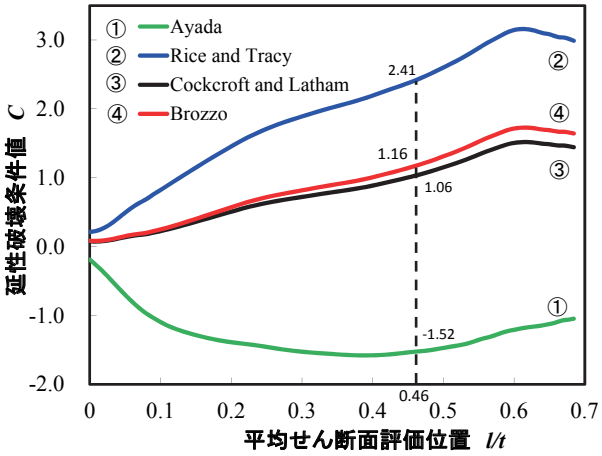

図７　切断部に分布する延性破壊条件値（φ10，クリアランス 6.25%t の有限要素解析結果）

位置が 0.46 の時のそれぞれの延性破壊条件における延性破壊条件値（C_1＝-1.52，C_2＝2.41，C_3＝1.06，C_4＝1.16）を解析の結果から得ることができる．

このようにして，図６で示した全ての加工サンプルについて有限要素法解析を行い，それぞれの延性破壊条件値を算出した結果を図８に示す．加工サンプルの平均せん断面評価位置 l/t における，解析から得られたそれぞれの延性破壊条件値がほぼ一定となっているのがわかる．このことから，図８に示す有限要素法解析から得られたそれぞれの延性破壊条件値の平均値（C_1 から C_4）は，それぞれの延性破壊条件の破壊臨界値に近い値が得られていると考えられる[5]．

６．おわりに

打ち抜き加工について，金型を用いた実験と有限

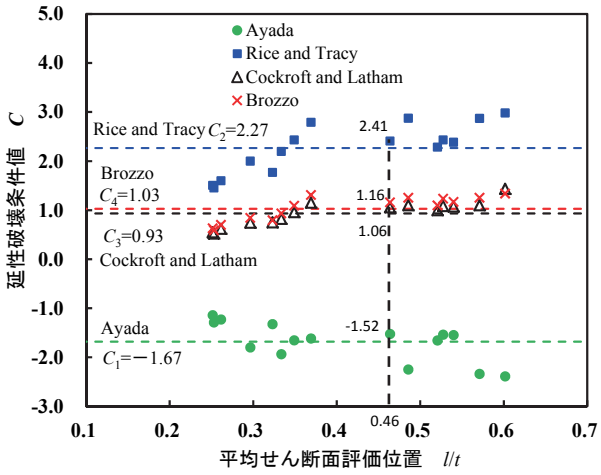

図８　クリアランスを変えた打ち抜き加工実験を基に有限要素法解析で算出した延性破壊条件値

要素法解析による解析のそれぞれの結果から，金型のクリアランスが大きくなるにしたがって，切断部のせん断面は小さくなることが分かった．

また，実験によって得られた平均せん断面評価位置（l/t）における有限要素法解析で得られた延性破壊条件値(C 値)は，ほぼ一定となっていた．また，それぞれの延性破壊条件値の平均値は，使用した材料の各々の延性破壊条件における破壊臨界値に近い値が得られていると考えられる．

打ち抜き加工は，プレス成形の現場で最も行なわれている加工方法であることから，打ち抜き加工のサンプルがあれば，今回提唱した方法で，これまで得ることが難しかったサンプル材料の，延性破壊臨界値を得ることができると考えられる．結果として，板鍛造成形時に生じる板材表面の割れの発生が予測可能になることが期待できる．

参考文献

1）小森和武，“せん断加工の数値シミュレーション”：塑性と加工，38-433（1997），129-134.
2）宅田裕彦ら，“延性破壊条件式を用いた高張力鋼板の成形限界予測”：鉄と鋼，91（2005）533-558.
3）石川孝司，“冷間鍛造における材料の割れ予測”：塑性と加工，53-620（2012）790-794.
4）後藤　學，“延性破壊条件式について”：塑性と加工，38-434（2010），200-205.
5）田中徹ら，“有限要素法を用いた打抜き加工における切断面の延性破壊判定に関する考察”：塑性と加工，52-609(2011)，1104-1108.