

打ち抜き加工断面のせん断限界点の予測手法の確立と 金型設計へ適用研究

佐賀大学大学院工学系研究科機械システム工学専攻
教授 萩原世也

(平成 23 年度一般研究開発助成 AF-2011020)

キーワード：打ち抜き加工，せん断限界

1. 緒言

プレス加工は，自動車部品などを生産する際に同一製品を連続生産により大量生産できるために，生産時間と生産コストを大幅に削減することができる．中でもせん断力を作用させて切断する打ち抜き加工は多くのプレス加工品に利用されている．

打ち抜き加工は，切断面にせん断面と破断面が混在し，特に破断面の存在は製品の精度を向上させる上での障害となる可能性がある．この打ち抜き加工の切断面の生成現象は，きわめて狭い領域において複雑なせん断変形や破壊を伴っている．金型製造コストダウンや製品精度向上のために，数値解析により切断部の品質を予測することは重要であるが，塑性変形を伴う変形であるため，難しい課題となっている．

これまで，この様な問題に対して表面の割れの発生を予測するために様々な研究が行われている．それらの研究内容は，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評価方法も実用的に利用されている例は少ない．それは，表面の割れの発生を評価するために必要な延性破壊臨界値は材料特有の値であるものの，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，現在のところ決定法も含め確立されていないことが理由となっている [3]．

そこで，本研究では打ち抜き加工のせん断面から破断面の切断面性状の変化する位置（せん断限界点）を推定する手法を確立することを目的とし，せん断面と破断面の境界推定およびコントロールを目指し，金型設計へ適用できる手法の確立を目指す．

著者らは，これまでに有限要素法により，延性破壊条件式の値を求め，打ち抜き加工における考察を行ってきた [4]．本研究では，一般的な簡易打ち抜き加工の実験による切断面性状測定とユーザーチンによる延性破壊条件式を組み込んだ汎用有限要素法解析プログラムによる解析を行い，その切断面に分布する延性破壊条件値を検討することで，その材料の延性破壊臨界値を求め，その推定手法について検討を行った．

2. 打ち抜き実験

打ち抜き加工における切断面の性状を観察するため，実験用金型にて打ち抜き実験を行った．実験には Fig. 1 に示すミヤギ・ハイセットおよび総合汎用金型（パンチ・ダイセット）と，Fig. 2 に示す精密万能引張圧縮試験機（島津製作所 AG-250kN）を用いて打ち抜き実験を行った．打ち抜く際のパンチスピードは精密万能引張圧縮試験機クロスヘッドスピードがパンチスピードとなる．このス

ピードは 25mm/min として実験を行った．

使用したブランク材は冷間圧延鋼板 SPCC (SPCC 材) の厚さ 1.6mm と 3.2mm の板と機械構造用炭素鋼 S45C (S45C 材) の厚さ 1.6mm の板を用いた．パンチ径とダイ穴径の組み合わせごとにそれぞれ 5 個ずつ打ち抜いた．実験で使用したパンチ径とダイ穴径の組み合わせと，その際に設定されるクリアランス量を Table 1 および SPCC 材と S45C 材の板厚に対するクリアランス量を Table 2, Table 3 にそれぞれ示す．

Table 1 Diameter of Punches and Die

Diameter [mm]	
Punch	Die
10	10.2, 10.6, 10.8
15	15.2
20	20.2
25	25.2, 25.6, 25.8

Table 2 Ratio of clearance to plate thickness for SPCC

Punch [mm]	Clearance [%t]
10	3.125, 6.25, 9.375, 12.5, 18.75, 25.0
15	3.125, 6.25
20	3.125, 6.25
25	3.125, 6.25, 9.375, 12.5, 18.75, 25.0

Table 3 Ratio of clearance to plate thickness for S45C

Punch [mm]	Clearance [%t]
10	6.25, 18.75
15	6.25
20	6.25
25	6.25, 18.75, 25.0



Fig.1 Punching device



Fig.2 Universal tensile and compression testing machine

3. 打ち抜き加工の有限要素法解析

エムエスシーソフトウェア社 MSC.Marc.Mentat にて、第 2 章の打ち抜き実験と同様の形状の打ち抜き実験の有限要素法解析モデルを作成し MSC.Marc により有限要素法解析を行った。解析で作成したモデルの概略図を Fig. 3 に示す。

被打ち抜き材であるブランク材の板形状は、SPCC 材では外径 40mm、厚さ t が 1.6mm と 3.2mm であり、S45C 材では、外径 40mm、厚さ t は 1.6mm である。実験での打ち抜き形状は円形であるので、中心軸を対称軸とする軸対称モデルとして、有限要素法解析モデルを作成した。パンチ径とダイ穴径は、実験に合わせた組み合わせとして、解析を行っている。ブランク材は弾塑性体とし、パンチ、ダイ、板押さえは剛体でモデル化して、解析を行った。

Tabel 4 に FEM モデルの初期要素数、初期節点数、初期要素長さ、リメッシュ後の最小要素長さを示している。

ブランク材モデルの要素数、節点数は、板厚により異なる。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貫通が生じた場合に、節点を移動し要素の再生成を行うリメッシング機能を適用した。これにより、要素数、節点数は解析中に変化していく。

なお今回の解析では、材料と各工具の接触面に作用する摩擦は考慮していない。

材料定数は、実験に使用した SPCC 材の単軸引張試験片および S45C 材の単軸引張試験片を作成し、精密万能試験機を用いた単軸引張試験を行い、その実験より得られた流動応力-塑性ひずみ曲線を使用した。その引張試験で得られた SPCC 材の弾性域における材料定数と、塑性域の流動応力と塑性ひずみの関係を Table 5 および Fig.4 に、S45C 材の弾性域における材料定数と、塑性域の流動応力と塑性ひずみの関係を Table 6 および Fig.5 にそれぞれ示す。

有限要素法解析では、これらの曲線を多直線 (multi-linear) により近似を行うことにより用いた。

打ち抜き加工による切断面性状を推定するために、

Table 7 に示す Oyane [5][6]、Cockcroft and Latham[7] および Ayada[8] の 3 つの延性破壊条件式を組み込んだ解析を行った。

ここで、 σ_H は静水圧応力、 σ_{eq} は Von Mises 応力、 σ_{max} は最大引張応力、 $\bar{\epsilon}$ は相当ひずみ、 $\bar{\epsilon}_f$ は破壊が生じる時の相当ひずみであり、 C_1, C_2, C_3 はそれぞれの延性破壊条件式より得られる値であり、それぞれの材料固有の破壊臨界条件値に達した際に破断が開始するとする。また、Oyane の破壊条件式に用いる材料定数 α はここでは 0.32 と設定した。

延性破壊条件式の値は、MSC.Marc のユーザサブルーチン機能を利用し、それぞれの延性破壊条件式を計算するプログラムを作成し、有限要素法解析により値を求めた。

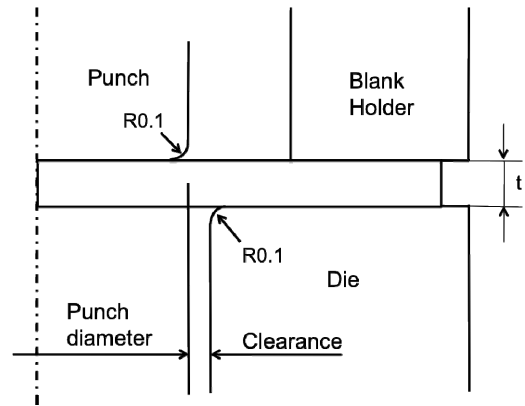


Fig. 3 Axisymmetric model for analysis

Table 4 Condition of FEM models

	t1.6	t3.2
Initial number of elements	5000	10000
Initial number of nodes	5271	10291
Initial element length [mm]	0.08	0.08
Minimum element length after remeshing [mm]	0.01	0.01

Table 5 Material properties (SPCC)

Young's modulus	[GPa]	200
Poisson's Ratio	—	0.3
Yield Stress	[MPa]	154

Table 6 Material properties of S45C

Young's modulus	[GPa]	216
Poisson's Ratio	—	0.3
Yield Stress	[MPa]	330

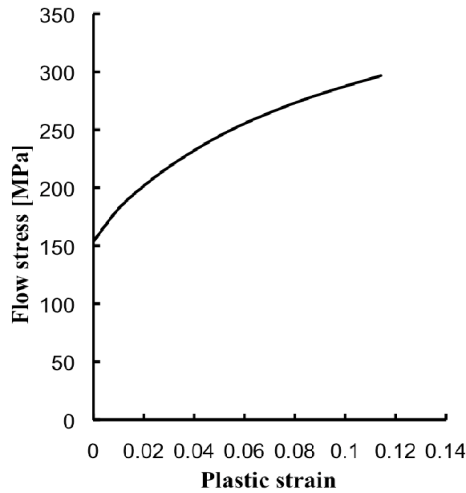


Fig.4 Flow stress-plastic strain relation for SPCC

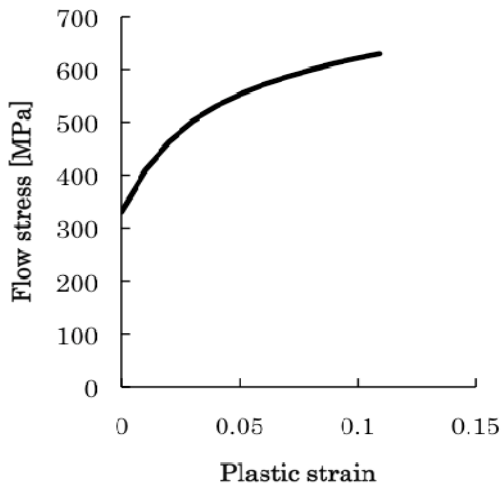


Fig.5 Flow stress-Plastic strain relation for S45C

Table 7 Ductile fracture criteria

Fracture criteria	Ductile Fracture Equations
Oyane [5][6]	$\int_0^{\bar{\epsilon}_f} \left(\alpha + \frac{\sigma_H}{\sigma_{eq}} \right) d\bar{\epsilon} = C_1$
Ayada [8]	$\int_0^{\bar{\epsilon}_f} \left(\frac{\sigma_H}{\sigma_{eq}} \right) d\bar{\epsilon} = C_2$
Cockcroft and Latham [7]	$\int_0^{\bar{\epsilon}_f} \left(\frac{\sigma_{max}}{\sigma_{eq}} \right) d\bar{\epsilon} = C_3$

4. 結果および考察

打ち抜き実験で円形に打ち抜かれたサンプルに関して、顕微鏡(キーエンス製 VH-Z100)を用いて、切断部における板端部から破断面とせん断面の境界の距離(せん断限界点)を測定した。せん断面と切断面の境界の位置は、Fig. 6の模式図に示すようにサンプルの円周に均一に分布している訳では無いので、せん断面が最大の距離となる位置(Maximum)と最小の距離の位置

(Minimum)を測定する。さらにそれら最大値と最小値の平均値を中間値として、せん断限界点として評価する。

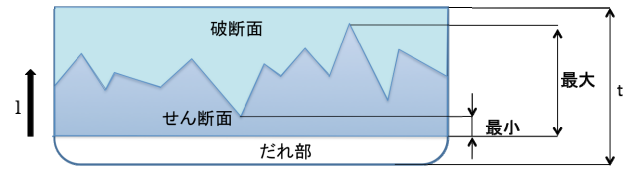


Fig.6 Schematic figure of cut surface for experiments

SPCC 材のあるサンプルにおけるせん断面が最小の位置を測定した写真と最大の位置を測定した画像をそれぞれ Fig. 7, Fig. 8 に示す。また、Fig. 9, Fig. 10 には、S45C 材における、せん断面が最小、最大の位置での切断面の画像を示す。

せん断面の長さは Fig. 6, Fig. 11 に示すようにサンプル下面からだれ部とダイの R を省いた長さを l としている。

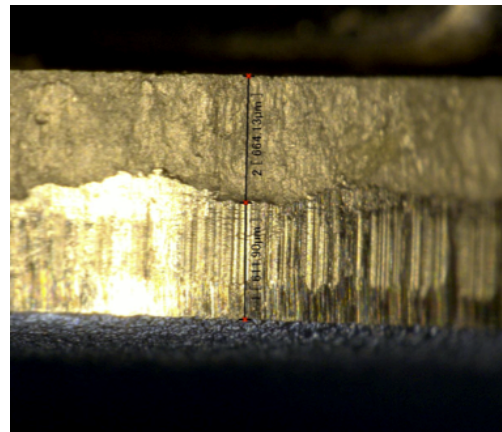


Fig. 7 Sheared surface of SPCC (Minimum)

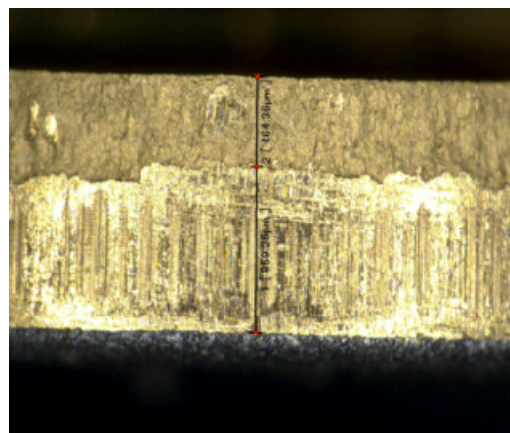


Fig. 8 Sheared surface of SPCC (Maximum)

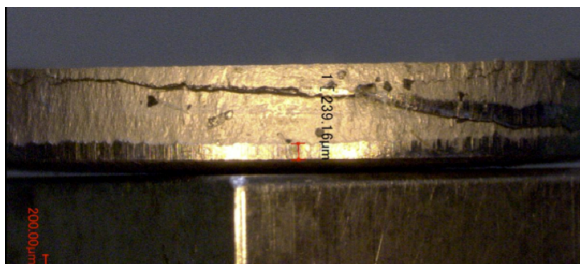


Fig. 9 Sheared surface of S45C (Minimum)



Fig.10 Sheared surface of S45C (Maximum)

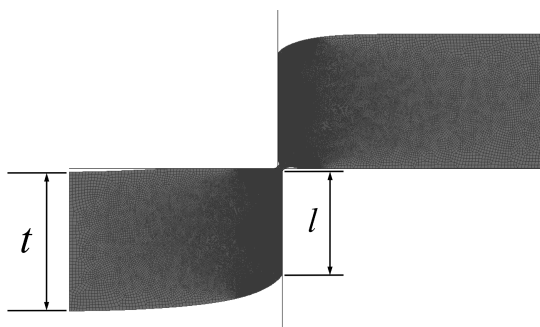


Fig.11 Definition of cutting length l for finite element method

Fig. 12, Fig. 13にSPCC材とS45C材における、打ち抜き実験により得られた板厚に対するパンチとダイのクリアランス量% t と板厚に対するせん断限界点 l/t の関係を示す。この結果は、パンチ径とダイ穴径の組み合わせ毎にN5の打ち抜き実験サンプルを測定し、それらを平均した値を表している。これらから、特にSPCC材においては、板厚に対するクリアランス量% t が大きくなると、切断面におけるせん断面の長さが小さくなる傾向が顕著に表れている。S45C材では、SPCC材と同様の傾向が現れている。また、それぞれのクリアランス量ごとに材料の厚さに対するせん断限界点 l/t を得ることができた。

次に、打ち抜き寸法 $\setminus 10\text{mm}$ 、クリアランス量 $6.25\%t$ の解析モデルについて、有限要素法解析から得られた切断面に沿った延性破壊条件式の値(C 値)の結果をSPCC材については、Fig. 14, S45C材についてはFig. 15にそれぞれ示す。延性破壊条件式の値は、打ち抜きが進行するどの式の値も最終的には上昇する傾向が見られた。ただ、単調に上昇する傾向が得られたのはCockcroft and Lathamの式のみであった。また、それぞれの条件において、打ち抜き実験結果から得られた切断面の画像との比較により、それぞれの条件での延性破壊条件式による臨界値を得た。

打ち抜き加工の有限要素法解析の結果から得られた切

断面に沿った延性破壊条件式の値(C 値)と、打ち抜き実験から得られた切断部のせん断限界点 l/t との比較により得られた各条件における延性破壊臨界条件値 C_{cr} 値をSPCC材については、Fig. 16, S45C材については、Fig. 17にそれぞれ示す。

有限要素法解析から得られたせん断限界点 l/t における、それぞれの延性破壊条件値(C 値)は、ほぼ一定となっている。また、これらの有限要素法解析で得られた、それぞれの延性破壊条件値(C 値)の平均はFig. 16, Fig. 17に示した C_{1cr} 値 \sim C_{3cr} 値である。SPCC材については、Cockcroft and Lathamの式以外では、値が打ち抜き過程において負の領域にあり、負の値を示している。また、S45C材では、SPCC材と同様にOyaneの式、Ayadaの式では負の値となっている。

SPCC材、S45C材のどちらも C_{1cr} 値 \sim C_{3cr} 値はクリアランスによらずほぼ一定値が得られており、打ち抜きにおける破断面位置の予測は、今回の手法により可能であるものと考えられる。

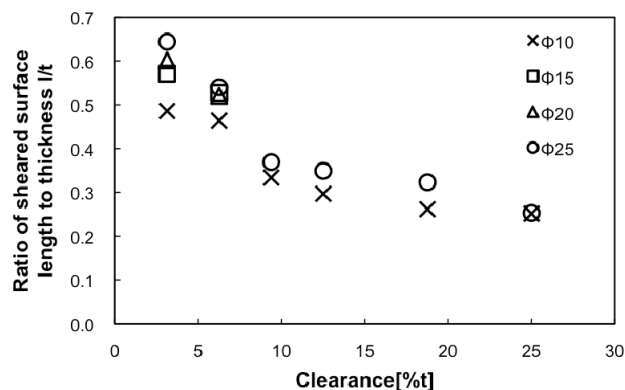


Fig. 12 Relationship between clearance and sheared surface length (SPCC)

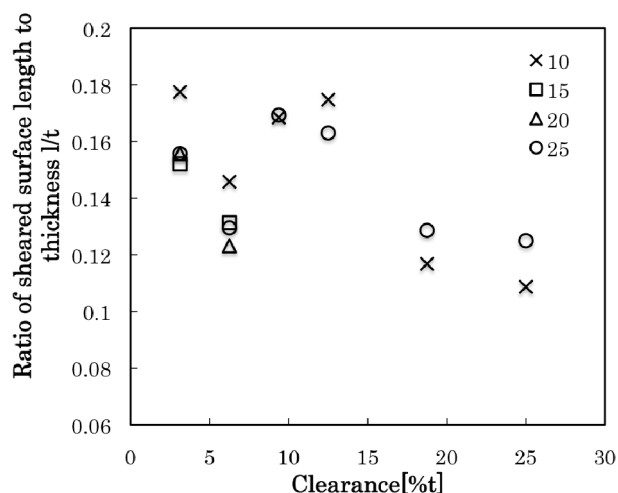


Fig.13 Relationship between clearance and sheared surface length (S45C)

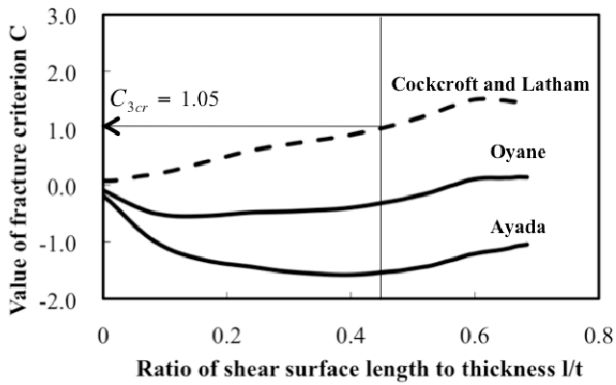


Fig.14 Relationship between sheared surface length and value of each fracture criterion (SPCC)

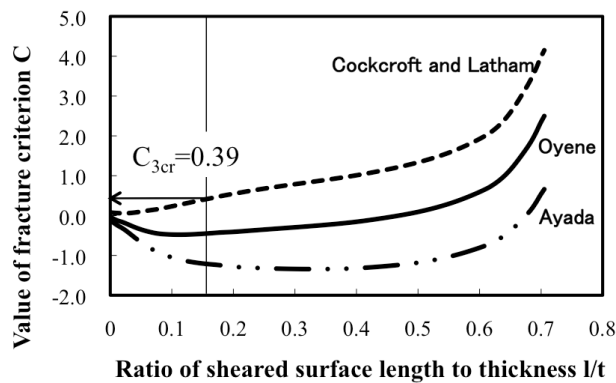


Fig.15 Relationship between sheared surface length and value of each fracture criterion (S45C)

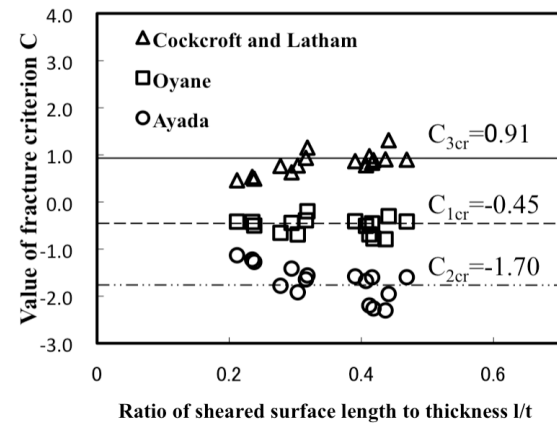


Fig.16 Relationship between sheared surface length and value of each fracture criterion (SPCC)

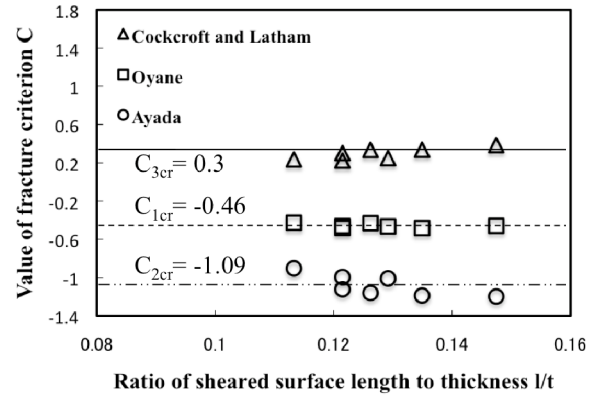


Fig.17 Relationship between sheared surface length and value of each fracture criterion (S45C)

SPCC 材について、さらにクリアランスが小さく設定され打ち抜きが行われるファインブランクの打ち抜き実験を行った際の打ち抜き後のサンプルの画像を Fig. 18 に示す。このときのクリアランスは、 $0.23\%t$ のクリアランスとなっている。画像から分かるように、切断面すべてがせん断面となっているのがわかる。



Fig. 18 Photograph of cut surface of fine-blanking for SPCC

Fig. 19 に Fig. 18 の画像で示したファインブランクの打ち抜き過程について FEM 解析を行う際のモデルの図を示している。ここでブランク材の板厚は $t=4.4\text{mm}$ に対して外径 12mm の打ち抜きを行う。ここで、パンチ、カウンターパンチ、ダイ、ブランクホルダーはすべて剛体としてモデル化している。材料は Table 5 および Fig. 4 で示される SPCC 材である。

Fig. 20 には、これらのモデルにより、ファインブランクの打ち抜き過程によりクリアランスを $0.23\%t$ に設定した場合の延性破壊条件式から求めた切断面の値を示す。この画像から分かるように、切断面はほぼせん断面で占められている。

Cockcroft and Ratham の式の値は切断面でほぼ単調的に増加するので、最も破壊条件を検討するのに適当であると考えられる。Fig. 20 からでは、打ち抜き実験より得られた臨界値の平均値は $C_{3cr}=0.91$ を $l/t=0.5$ 程度で超えている。したがって、せん断面と破壊面の位置は $l/t=0.5$ 程度となり、ダレ量とも合わせても、せん断面は $l/t=0.8$ 程度となり、切断面の途中から破壊面が生成される見込みとなる結果が得られている。

本研究のファインブランキングの解析では、初期圧縮量の設定が適切で無かったことなどや、構成則が速度依存型で無かったことなどが考えられる。今後、打ち抜き加工、ファインブランキング等の金型への適用のために、これらの結果を元に、この手法のさらなる検討が必要であると考えられる。

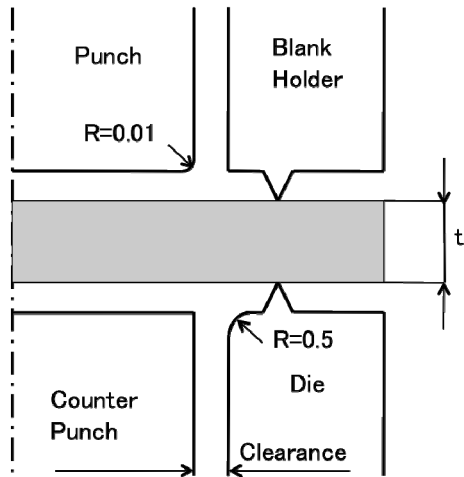


Fig. 19 Schematic figure of FEM analysis for fine-blanking

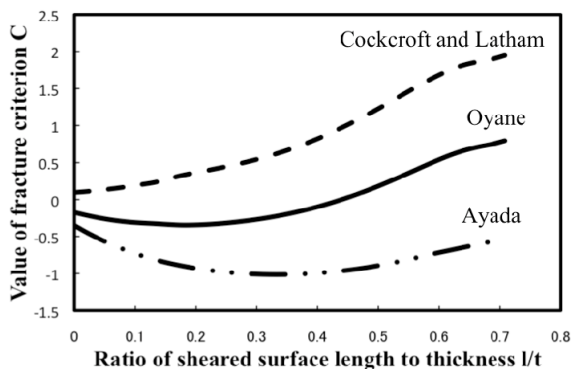


Fig. 20 Relationship between sheared surface length and value of each fracture criterion for fine-blanking (SPCC)

5. 結言

打ち抜き加工に関する有限要素法解析から金型のクリアランス量が大きくなるにしたがって、切断部のせん断面が小さくなることが分かった。これは、実験の結果と一致している。また、実験より得られた平均せん断面評価位置（せん断限界点） l/t における有限要素法解析の結果（破壊臨界値 C_{cr} ）について若干のバラツキは見られる

がほぼ一定となっており、それぞれの結果の平均は、各々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。

ファインブランキングの実験と解析との比較では、若干破断開始点の予測が異なるが、これらは、今後詳細な解析を行うことにより、予測可能であると考えられる。

せん断打ち抜き加工における金型設計において、クリアランスにより、せん断限界点を知るメリットは製品の精度を確保する上で大きいので、これらの手法を金型設計を行う際に適用することにより、設計コストの削減等のメリットが得られると考えられる。

謝辞

本研究は、公益財団法人天田財団の平成 23 年度一般研究開発助成(AF-2011020)の援助により行われた。ここに記して深く感謝の意を表する。

また、本研究の遂行に当たり、多大なるご支援とご協力をいただいた佐賀県工業技術センター 特別研究員 田中徹氏、森鉄工株式会社 代表取締役専務 森孝信 氏、佐賀大学大学院工学系研究科博士前期課程 府本翔 氏（現：株式会社 C&G システムズ）、佐賀大学大学院工学系研究科博士前期課程 井手勇輝 氏に深く感謝の意を表する。

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] 田中徹・萩原世也・只野裕一・稲田拓真・森孝信・瀧脇健二, “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
- [5] 大矢根守哉, “延性破壊の条件式”, 日本機械学会誌, 75-639 (1972), 110-115.
- [6] Oyane, M., Sato, T., Shima, S., “Criteria for ductile fracture and their applications”, Journal of Mechanical Working Technology, 4 (1980), 65-81
- [7] Cockcroft, M. G., Latham, D. J., “Ductility and workability of metals”, Journal of the Institute of Metals., 96 (1968), 33-39.
- [8] Hambli, R., Reszka, M., “Fracture criteria identification using and inverse technique method and blanking experiment”, International Journal of Mechanical Sciences, 44 (2002), 1349-1361.