

画像処理を利用した仕上げ抜きにおける材料変形様式ならびに き裂発生メカニズムの解明

同志社大学 機械システム工学科
教授 笹田 昌弘
(2019年度 一般研究開発助成 AF-2019024-B3)

キーワード：せん断加工，仕上げ抜き加工，デジタル画像相関法，き裂，変形様式

1. 背景と目的

仕上げ抜き加工は、刃先に丸みをつけた工具を利用して打抜きを行う方法である。ダイス刃先に丸みを持たせる目的として、材料内に発生するき裂をパンチ側からのみとし、ダイス側面によるバニシにより、製品側面を一様に上げることが考えられている¹⁾。仕上げ抜きにおいて、材料がダイス刃先の丸み部分を通してしごかれながら加工が進行し製品の側面はなめらかな仕上げ面が得られること、切刃丸味部分に広く変形が分布しており切刃丸味部分に集中力が生起されずクラックが発生しないこと、荷重線図からクラックの発生が遅いことが考えられている²⁾。面取りダイスの利用でも、平滑面が増えることが報告されている³⁾。これまでに刃先丸みの利用については有益な報告がなされている。さらに加工中の材料変形の撮影動画より、ダイス刃先丸みの影響を明らかにすることは有益であると考えられる。

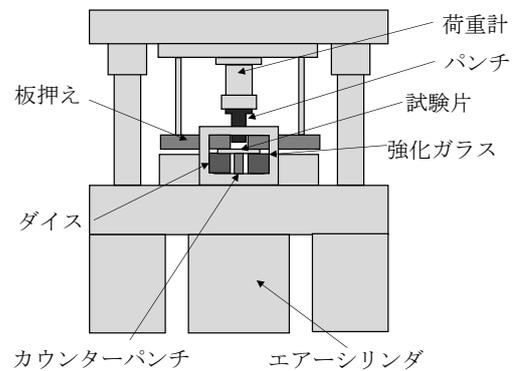
一方、せん断加工中の材料流動についても有益な報告がなされている。格子線観察法により観察された報告⁴⁾、工具面上のすべり量を試験片にビッカース硬さ計で付けた圧痕をもとに測定し考察した報告⁵⁾、Remeshing Viscoplasticity 法が提案されクラック発生に関して考察された報告⁶⁾などがある。これらは材料に格子や圧痕などを付けて材料変形を観察した有益な報告である。加工中の材料変形を撮影し、材料流動が求められている⁷⁾。また、フーリエ位相相関法により材料流動が分析されている⁸⁾。平行複刃型せん断加工における加工面におけるだれ形成と材料流動の関係を、高速度カメラで観察した材料変形より考察している⁹⁾。せん断加工におけるひずみが求められ報告されている¹⁰⁾。デジタル画像相関法など解析技術により、加工中の材料変形の動画より材料流動などが求められている。

以上より、ダイス刃先丸みの大きさがき裂発生に及ぼす影響を明らかにするため、加工中の材料変形を詳細に観察した。加工中の材料変形を確認できる金型を利用し、加工中の材料変形の動画撮影した結果を報告する。また、材料変形の動画から材料流動およびひずみ分布を求めることを試みた結果についても報告する。

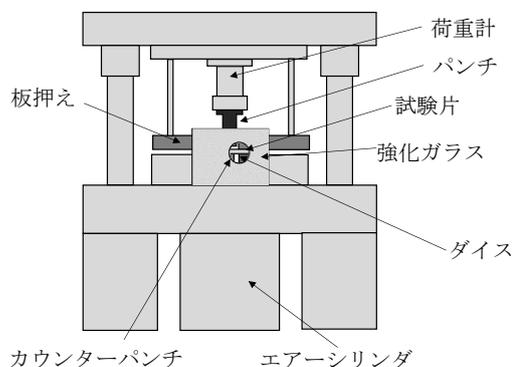
2. 実験方法

せん断加工中に工具刃先付近からのき裂の発生ならび

に進展を観察するため、Fig. 1に示すような金型を利用した。加工面への強化ガラスによる拘束の影響を確認する際には、Fig. 1(a)の観察領域が四角の形状である金型を利用した。その後、さらなる剛性向上のため観察領域をFig. 2(b)のように変更して実験を進めた。本金型では強化ガラスを介して材料変形を高速度カメラで撮影することが可能である。試験片は寸法 20×39×2mm の形状であり、試験片の材質は A5052-0 である。カウンターパンチを利用して湾曲の発生を抑制している。カウンターパンチからは被加工材へ 1380N が作用する。パンチ幅は 14.8mm であり、クリアランスを被加工材の厚さの 5% としている。試験片を設置した金型を万能試験機に取り付け、無潤滑条件下で試験片を打抜いた。加工中の材料変形を、解像度を 1280×1024pixel、フレームレートを 50fps として撮影した。



(a) Type 1



(b) Type 2

Fig.1 実験用金型の概略図

パンチの降下速度は 1mm/min である。パンチストローク P_s は、ダイセットに取り付けた渦電流式変位計により計測した。また、撮影動画をもとに、き裂発生を観察し、材料流動ならびにひずみを求めた。

3. 実験結果 (金型 Type 1)

3.1 切口面 (刃先丸み $R_d=0$)

Type1 の実験用金型を用いてせん断加工を行った。なお、ダイ刃先丸み $R_d=0$ の場合である。強化ガラスの有無の影響を確認するため、強化ガラスを用いない場合のせん断加

Table 1 実験条件

クリアランス [%]	5			
ダイ刃先の丸み半径 R_d [mm]	0.0	0.2	0.5	1.0
板押え力 [N]	2058			
カウンターパンチからの力 [N]	1380			
パンチスピード [mm/min]	1.0			



(a) 強化ガラス有り



(b) 強化ガラス無し

Fig.2 切口面 (製品, $R_d=0.0$).



(a) 強化ガラス有り



(b) 強化ガラス無し

Fig.3 切口面 (スクラップ, $R_d=0.0$)

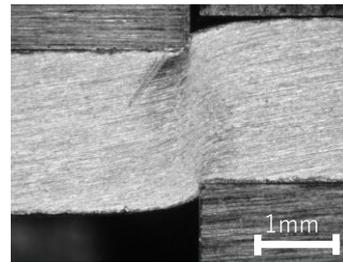
工も行った。せん断加工により試験片より得られたパンチ下の材料を製品と呼ぶこととする。一方、ダイス上の材料をスクラップと呼ぶこととする。

製品 (パンチ下の材料) の切口面を Fig.2 に示す。強化ガラスを用いた場合の Fig.2(a) では、ガラス面に接触している付近の平滑面の大きさは、材料の中央付近に近づいている。一方、強化ガラスを利用しないで行った場合の Fig.2(b) では、中央付近と材料端部の平滑面の長さが異なる。強化ガラスを設置することにより、試験片の幅方向への広がりを拘束した影響が表れている。スクラップの切口面を Fig.3 に示す。スクラップでも、強化ガラスにより拘束された付近の平滑面の大きさが、中央付近の平滑面の大きさに近づいている。

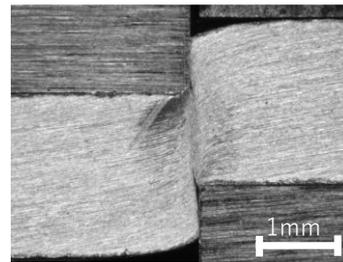
以上より、強化ガラスを利用したせん断加工の実験を行い、試験片の端部の変形を観察することとした。

3.2 材料変形ならびに材料流動 (刃先丸み $R_d=0$)

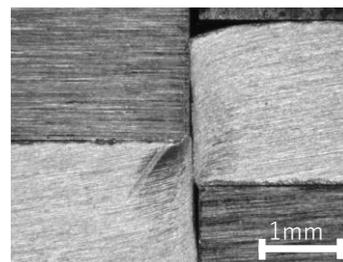
強化ガラスを用いて行ったせん断加工中に撮影された材料変形を Fig.4 に示す。パンチストローク $P_s=1.0$ mm において、パンチとダイの両側からき裂が確認できる。さ



(a) $P_s=0.5$ mm



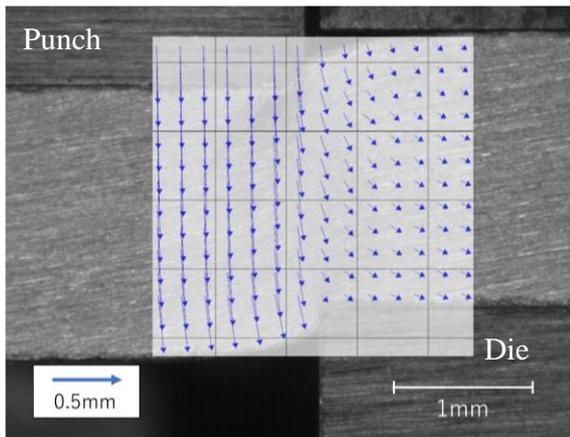
(b) $P_s=1.0$ mm



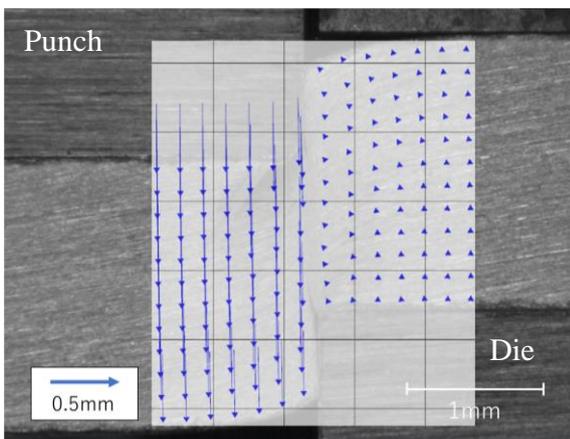
(c) $P_s=1.5$ mm

Fig.4 材料変形 ($R_d=0.0$)

らに $P_s=1.5\text{mm}$ では、すでに材料分離が完了している。運動解析ソフト (Dipp-Motion) を用いて動画より材料の流動を求め、追跡後の変形形状の写真上に重ねて表示した結果を Fig. 5 に示す。 P_s が 0 から 0.5mm まで増加すると、スクラップ上のだれ形成が進む様子がベクトルの方向からわかる。だれが形成される領域のベクトルの方向は、ダイス上をパンチ刃先から離れる方向である。このようにパンチ側面に位置する材料は、パンチから離れる方向へ流動することがわかる。一方、ダイス刃先付近の材料流動は、ダイス上を刃先から離れる方向とダイス刃先間の方向への流動に分かれている。このように、ダイス刃先を境界とするような 2 方向への材料流動がおこることがわかる。さらに加工が進み、 P_s が 0.5 から 1.0mm まで増加すると、スクラップのだれ付近の流動ならびにダイス上を刃先から離れる方向への材料流動は減少する。なお、 P_s が 1.0mm では、すでにパンチならびにダイス刃先付近の両方でき裂が発生している。この影響も及ぼしていることが考えられるため、加工後半の材料流動の変化については今後詳細な検討が必要であると考える。



(a) $P_s : 0 \sim 0.5\text{mm}$

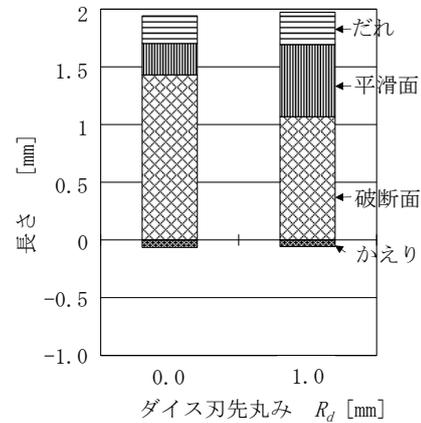


(b) $P_s : 0.5 \sim 1.0\text{mm}$

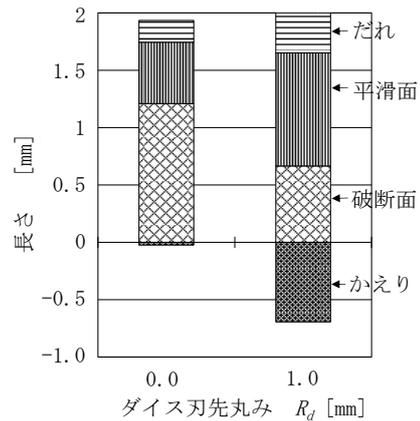
Fig. 5 $R_d=0.0$ の場合の材料流動
(ソフトウェア: Dipp-motion)

3・3 切口面ならびに材料流動 (刃先丸み $R_d=1.0$)

ダイス刃先丸み $R_d=1.0$ の場合についても強化ガラスを用いて材料変形の観察を行った。切口面から測定した長さを Fig. 6 に示す。 $R_d=0.0$ の場合の測定結果もあわせて示す。ダイス刃先丸み R_d を大きくすると、だれならびに平滑面が増加し、破断面が減少する。なお、スクラップに関



(a) 製品



(b) スクラップ

Fig. 6 切口面の構成 (Type 1)

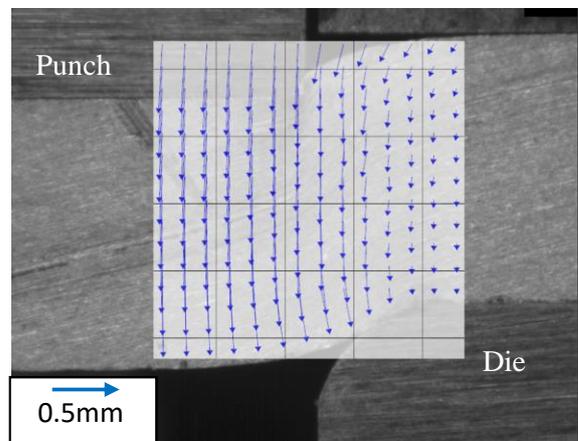


Fig. 7 $R_d=1.0$ の場合の材料流動
(ソフトウェア: Dipp-motion, $P_s: 0 \sim 0.5$)

する測定結果において、 $R_d = 1.0$ ではバリとして大きな値が示されているが、ダイス刃先丸みを設けた影響である。

$R_d = 1.0$ の場合の材料流動を Fig. 7 に示す。 $R_d = 0.0$ の場合の Fig. 5(a) と比較すると、 $R_d = 1.0$ ではダイス上の材料にだれが形成される領域の流動の方向が異なる。 $R_d = 1.0$ ではパンチ刃先付近に近づく方向に材料が流動しているが、 $R_d = 0.0$ ではパンチ刃先から離れる方向へ流動している。また、 $R_d = 0.0$ にくらべて $R_d = 1.0$ では、ダイス上を刃先から離れる方向へ流動しなくなっている。このようにダイス刃先丸みにより加工中の材料流動の方向が変化する。

4. 実験結果（金型 Type 2）

強化ガラスを拘束するプレートを Fig. 1(b) のように変更し剛性を向上させて実験を行うこととした。これ以降に提示する実験結果は、Fig. 1(b) に示した Type 2 の金型を用いた結果である。

4・1 切口面

強化ガラスに接する試験片の切口面の構成を測定した結果を Fig. 8 に示す。ダイス刃先丸みを大きくすると、破断面が減少し、平滑面が増加していることがわかる。なお、他の R_d の場合と比べて $R_d = 0.0$ は中央付近と材料端部に多少の違いがあったが、その他の R_d では大きな違いがなかった。

4・2 材料変形

撮影動画より加工中の材料変形を確認し、 P_s が 1.50mm のときの材料変形を Fig. 9 に示す。 $R_d = 0.0$ では、パンチならびにダイ刃先付近の材料にき裂が確認できる。一方、 $R_d = 1.0$ ではパンチ刃先付近にき裂が確認できるが、ダイス刃先付近ではき裂が確認できない。

以上のように、ダイ刃先丸みが大きくなると、ダイ刃先付近の材料にき裂が発生し難くなるのが材料変形の観察より確認できる。

4・3 平滑面形成

き裂発生が平滑面の大きさに及ぼす影響を明らかにするため、平滑面の長さを測定した。①ダイス刃先付近に接する材料にき裂が発生したときと② $P_s = 2.00\text{mm}$ のときに、撮影した動画より平滑面の長さを測定した。ここでの平滑面の長さは、ダイス側面に接している材料の長さである。測定結果を Fig. 10 に示す。なお、Fig. 8 に示した切口面より測定した平滑面の長さ③をあわせて示す。 $R_d = 0.0$ と 0.2 は、①ダイ刃先付近に接する材料にき裂が発生したときと③切口面より測定した平滑面の長さに大きな違いがない。また、 $R_d = 0.0$ に比べて 0.2 では①の平滑面の長さが大きい。つまり、 $R_d = 0.0$ から 0.2 へ刃先丸みを増加することによりダイ刃先付近の材料にき裂が発生し難くなり、平滑面の長さが増加すると考えられる。

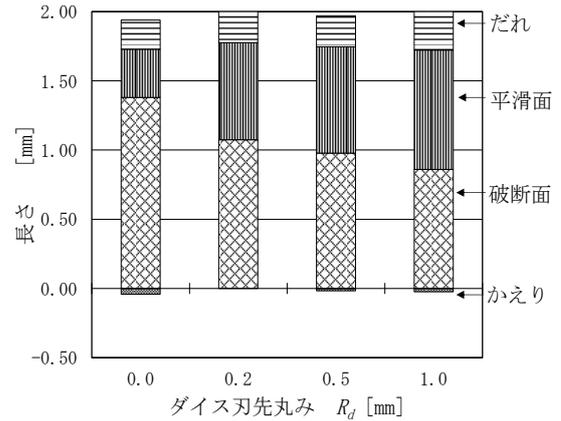
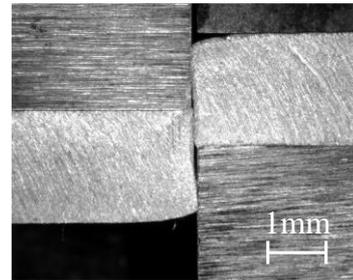
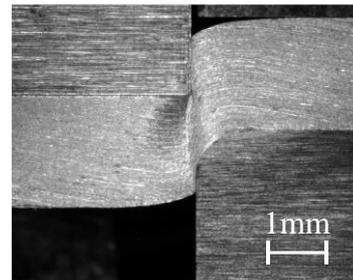


Fig. 8 製品の切口面構成



(a) $R_d = 0.0$



(b) $R_d = 1.0$

Fig. 9 材料変形 ($P_s = 1.5\text{mm}$)

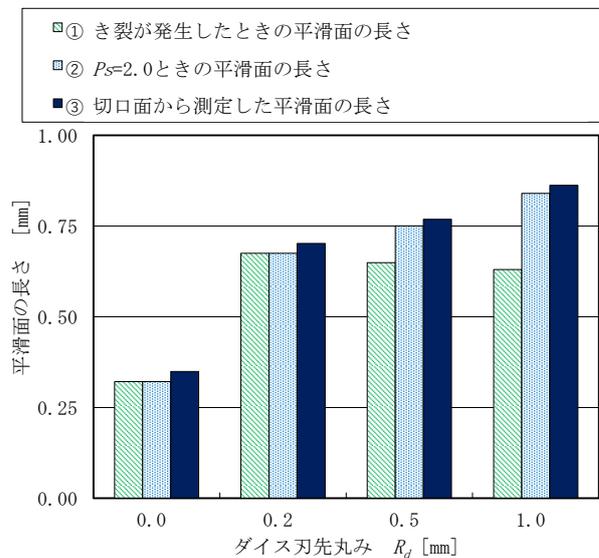


Fig. 10 平滑面長さの比較

一方、 $R_d=0.5$ と 1.0mm では、①の平滑面の長さが $R_d=0.2$ と比べて増加していない。しかし、 R_d の増加とともに③の平滑面の長さは増加している。また、② $P_s=2.00\text{mm}$ のときに測定された平滑面は③の平滑面と近い値となっている。このことから、き裂発生後に平滑面が増加していることが推察される。

$R_d=1.0$ のダイス刃先付近の材料にき裂が発生した後の水平方向の材料流動を再確認した。ダイス刃先付近を高倍率にて動画撮影するために再度実験を行った。 $R_d=1.0$ のダイス刃先付近の材料変形を Fig. 11 に示す。わずかではあるがダイス刃先丸みの途中に接する材料にき裂が発生している。このことから材料分離後にダイス刃先によりバニシ仕上げが行われ平滑面が増加すると考えられる。撮影動画より運動解析ソフト (Dipp-motion) を用いて、材料の流動を確認した。Fig. 11 に示す点 A から F の X 座標とパンチストロークの関係を確認した。なお、点 A はダイス側面と接触している材料部分であり、平滑面の一部と考えている。各点の X 座標とパンチストロークの関係を図 12 に示す。点 A は、X 方向にほとんど移動していないことから、ダイス側面に接触していると考えられる。点 B ならびに C は、パンチストロークの増加とともに、点 A と同様に座標が 0 の位置へ移動している。このことから、材料分離後にバニシ仕上げが起こっていることが考えられる。

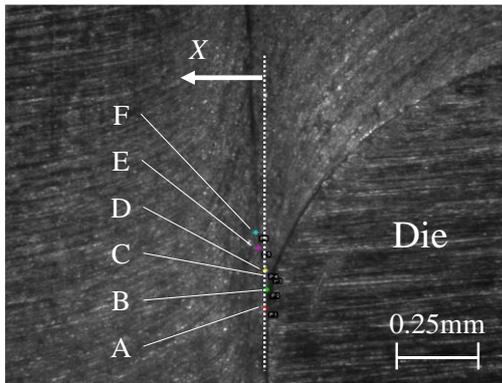


Fig. 11 追尾した点 ($P_s=1.67$)。

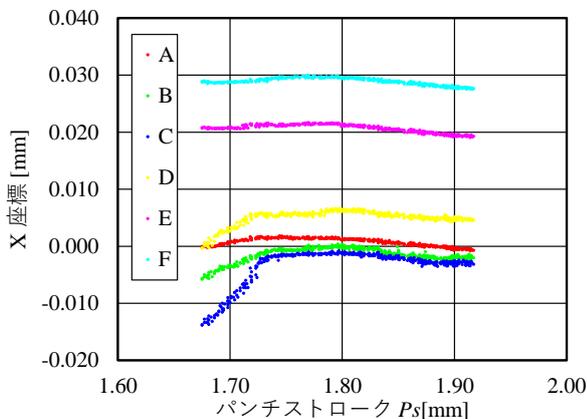


Fig. 12 き裂発生後の各点の X 座標とパンチストロークの関係 (ソフトウェア: Dipp-motion)

4・4 刃先丸み R_d が相当ひずみ分布に及ぼす影響

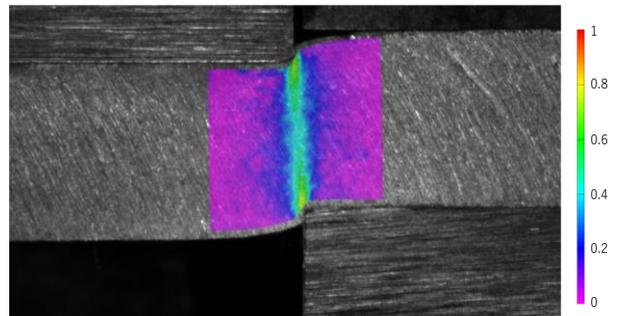
材料変形の撮影動画よりソフトウェア MatchID を利用して求めた相当ひずみ分布を Fig. 13 に示す。なお、 $P_s=0.5$ ではパンチならびにダイス刃先付近にき裂は発生していない。相当ひずみ分布から、 $R_d=0$ に比べて $R_d=1.0$ ではダイス刃先付近における材料の相当ひずみが低減している。刃先丸みが大きい場合、パンチストロークの増加にともない変形する材料の領域が大きいことがわかる。

4・5 刃先丸み R_d が変形様式に及ぼす影響

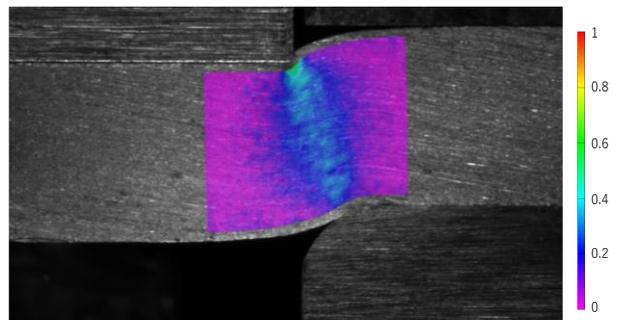
き裂が発生した箇所の初期位置と主ひずみを撮影動画よりソフトウェア MatchID を利用して求めた。 $P_s=0.5\text{mm}$ のときの主ひずみを Fig. 14 に示す。最大主ひずみが引張りであり、最小主ひずみが圧縮となっている。パンチストロークが増加するとパンチ下の材料が移動し、ダイス上の材料との間で引張変形が発生すると考えられる。一方、パンチ刃先とダイス刃先間では圧縮変形となっている。また、ダイス刃先丸み $R_d=0.0$ に比べて $R_d=1.0$ のダイス刃先付近の主ひずみが低減している。ダイス刃先丸みを付けることにより、ダイス刃先付近の材料はひずみの大きな増加をともなうことなく加工が進むと考えられる。

5. 結言

刃先丸みが異なるダイスを用いた平行複刃型せん断加工の実験を行い、加工中の材料変形を動画撮影した。撮影動画よりき裂の観察を行い、材料流動ならびにひずみを求

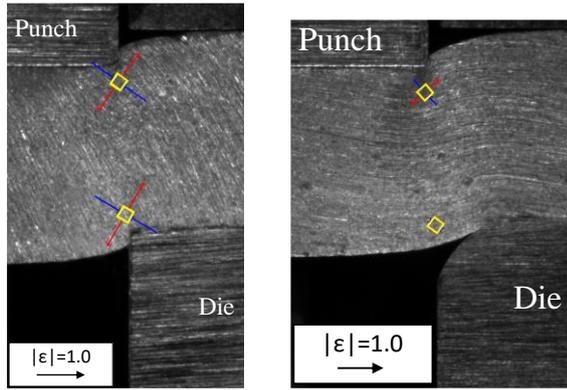


(a) $R_d=0.0$



(b) $R_d=1.0$

Fig. 13 デジタル画像相関法により求めた相当ひずみ ($P_s = 0.5$, ソフトウェア MatchID)



(a) $R_d = 0$ (b) $R_d = 1.0$

Fig. 14 デジタル画像相関法により求めた主ひずみ ($P_s=0.5$, ソフトウェア MatchID)

めた。以下の結論が得られた。

(1) ダイス刃先丸みを大きくするとダイス刃先付近にき裂が発生するパンチストロークが増加する。これまでも考えられてきたことであるが、材料変形の動画撮影からも確認できた。また、製品の切口面の破断面が減少する要因の一つと考えられる。

(2) 材料分離後にダイス刃先により試験片にパニシ仕上げがおこなわれ平滑面が増加する。これまでも考えられてきたことであるが、材料変形の動画撮影からも確認できた。パニシ仕上げは、平滑面が増加する要因の一つと考えられる。

(3) デジタル画像相関法を利用して相当ひずみ分布を求めた。ダイス刃先丸みが大きい場合には、パンチストロークの増加にともなう材料変形の領域が大きくなる。また、板厚2mmの材料に対してパンチストロークが0.5mmのとき、最大主ひずみが引張りひずみであり、最小主ひずみが圧縮ひずみであった。また、ダイス刃先丸みが大きい場合では、ダイス刃先付近の試験片における主ひずみが低減する。

なお、き裂発生ならびに進展については、今後さらなる詳細な検討を進めることが必要と考えている。

謝 辞

本研究は、公益財団法人天田財団・2019年度一般研究開発助成(AF-2019024-B3)により行われたものであり、ここに記して深く感謝の意を表します。本研究に関して貴重なご意見をいただきました同志社大学田中達也教授へ厚く御礼申し上げます。実験ならびに解析にご協力いただいた同志社大学大学院(当時)前川嘉孝氏、今田健太氏、岡本翔太氏、波多野響氏、上田幸貴氏に厚くお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 音田一造：National Technical Report, 5-4(1959), 472-477.
- 2) 森田稔, 音田一造：塑性と加工, 2-6(1961), 79-82.
- 3) 尾裕宏：非削加工(1970), 11-16.
- 4) 春日保男, 堤成晃, 森敏彦：日本機械学会論文集, 43-372(1977), 3142-3149.
- 5) 前田禎三, 青木勇：塑性と加工, 20-218(1979), 208-214.
- 6) 古閑伸裕, 工藤武, 村川正夫：塑性と加工, 33-383(1992), 1362-1367.
- 7) 高橋俊典, 青木勇：日本機械学会論文集(C編), 62-600(1996), 3196-3201.
- 8) Aoki, I. and Takahashi, T. : Journal of Material Processing Technology, 134(2003), 45-52.
- 9) Sasada, M. and Togashi, T. : Procedia Engineering, 81(2014), 1139-1144.
- 10) Hartman, C., Weiss, H., Lechner, P., Volk, W., Neumayer, S., Fitschen, J. and Steidl, G. : Journal of Material Processing Tch., 288(2021), 116872.