

プレス加工における面内引張応力援用による 小径穴抜き加工に関する研究

栃木県産業技術センター 県南技術支援センター
主任 阿部 雅
(平成 26 年度一般研究開発助成 AF-2014025)

キーワード：プレス加工，面内引張応力，小径穴抜き加工

1. 研究の目的と背景

プレス加工において、製品の小型化・軽量化のニーズに対しては微細な形状の金型による精密加工技術が求められている。例えば最近の電子機器用筐体の場合、電子基板用干渉防止カバーの取り付け穴の加工等において、被加工材の板厚をパンチ直径で除した値（アスペクト比）が1を超え、直径が0.5mm以下となるような小径穴抜き加工のニーズがある。しかし、小径穴抜き加工においては主に①板厚に対して穴の直径が小さいことで、加工初期がせん断ではなく押し込みとなり、パンチ側面と被加工材との間の摩擦が増加するため、せん断時やパンチ引き抜き時の抵抗も増加し、パンチが屈屈・摩耗しやすいこと、②摩擦力の増加に加え、小径なパンチは剛性が低く、ダイとのクリアランス・同軸度の狂い等も発生しやすいため、早期にパンチが折損する可能性が高いことの2つが課題となり、十分な対応技術が開発されていないのが実情である。

そこで本研究では、被加工材の穴加工位置周囲に穴を広げるような応力（以下「面内引張応力」）を负荷させた状態で穴抜き加工を行うことで、加工時の摩擦力を低減させ、パンチの長寿命化を図る。

2. 研究方法

2・1 面内引張応力负荷方法の考案

プレス加工機の上下運動を利用し、縦横 150mm 厚さ 0.8mm の被加工材に面内引張応力を负荷した状態で、中央に直径 0.5mm の小径穴抜き加工を行う場合を想定し、面内引張応力の负荷方法を考案した。

2・2 応力シミュレーション

面内引張応力が被加工材の弾性域内となる条件を SolidWorks2008 によるシミュレーションで検討した。

2・3 面内引張応力负荷機構搭載金型の開発

シミュレーションで得られた条件で、実際の被加工材に面内引張応力を负荷することが可能か、面内引張応力负荷機構部分の試作金型（以下「模擬体」）を作製し、面内引張応力が负荷された時の穴加工位置の応力状態を測定することで確認した。その後、面内引張応力负荷機構を搭載した金型（以下「開発金型」）を作製した。

2・4 開発金型による小径穴抜き加工

プレス加工機に開発金型を取り付け、亜鉛めっき鋼板に対し、小径穴抜き加工を行った。

3. 研究結果

3・1 面内引張応力援用による小径穴抜き加工方法

小径穴抜き加工は、以下に示す金型動作により行うこととした。

①図1に示すように上側押さえを下降させ、上側押さえとクッションプレートで被加工材を挟み、被加工材を平らな状態で把持する。

②さらに上側押さえを下降させると、図2に示すようにクッションプレートが沈み込んだ分、穴加工位置が凸状にたわみ、被加工材は表側も裏側も伸ばされて引張応力が负荷された状態になる。

③この状態で穴抜き加工を行い、パンチ引き抜き後に上側押さえを上昇させて被加工材を解放した際、被加工材は元の平らな状態に戻る。

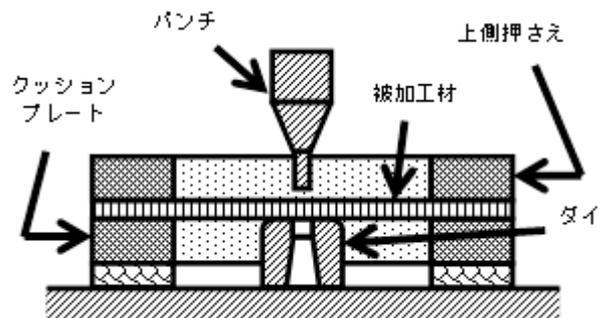


図1 被加工材の把持

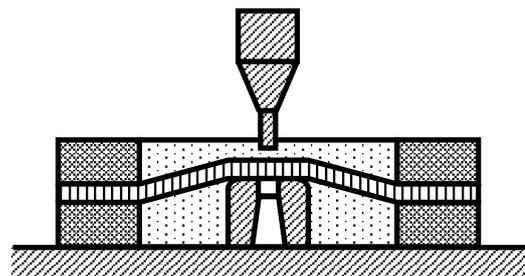


図2 たわみの付与

3・2 応力シミュレーション

3・2・1 シミュレーションモデル

図3に示す上側押さえと、それと同寸のクッションプレートで被加工材の全周を把持し、中央に穴抜き加工を行う場合を想定した。そこで、表1に示す物性値(炭素鋼相当)の板状モデルの全周を固定端として、モデル中央が凹状にたわむよう、ダイの直径の範囲に荷重を掛けた場合の応力分布と変位をシミュレートした。シミュレートしたダイの直径と荷重の大きさの組み合わせを表2に示す。

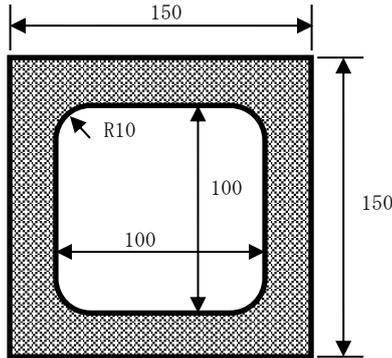


図3 上側押さえ (網掛：把持部)

表1 モデルの物性値

ヤング率	ポアソン比	質量密度	降伏応力
210GPa	0.28	7,800 kg/m ³	220.59MPa

表2 ダイの直径と荷重の大きさ

	ダイの直径 mm	荷重 N
条件1	5.00	100
条件2	5.00	80
条件3	10.00	100

3・2・2 応力シミュレーション結果

図4は条件1でシミュレートした結果の応力分布を可視化した図であり、モデル中央において最も応力と変位が大きくなることが確認された。条件2、条件3でシミュレートした場合も条件1同様、モデル中央において最も応力と変位が大きくなった。表3にその値を示す。いずれの条件においても最大応力が降伏応力を超えている。被加工材にかかる最大応力を降伏応力未満の弾性域内にするためには、直径5mmのダイの場合変位は約0.40mm、直径10mmのダイの場合変位は約0.50mmが上限であると推測される。

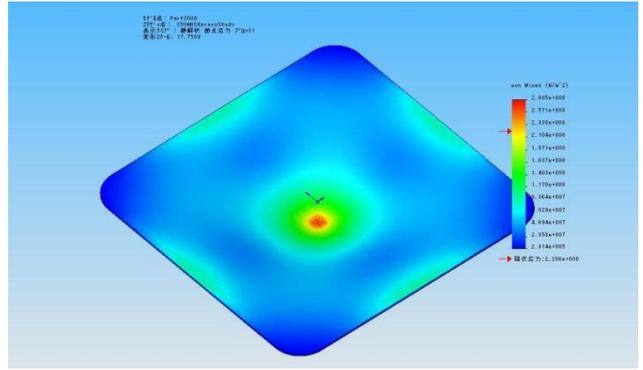


図4 条件1の応力分布

表3 シミュレーション中の最大応力と最大変位

	最大応力 MPa	最大変位 mm
条件1	280	0.563
条件2	224	0.451
条件3	222	0.557

3・2・3 シミュレーション精度の検証

シミュレーション精度の確認のため、表1と同等の板材を、図3と同寸の鉄棒2枚で把持し、万能材料試験機(株島津製作所AG-M1)のロードセル先端に取り付けた直径5mmの円柱圧子で、試験力100Nの負荷を中央にかけ、シミュレーション条件1に相当する圧縮試験を行った。その際の被加工材のたわみ量をダイヤルゲージによって測定し、シミュレーションによって算出された変位と比較した。圧縮試験の概略図を図5に示す。

検証実験の結果、試験力100N時のたわみ量は約0.56mmであった。表3条件1の最大変位とほぼ一致したことから、シミュレーション精度は良好であり、本シミュレーション結果の信頼性は高いと考えられる。

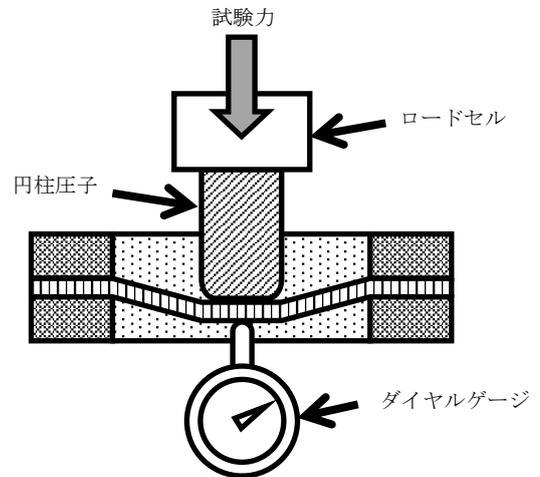


図5 圧縮試験概略図

3.3 模擬体での応力状態の確認

3.3.1 模擬体

パンチが被加工材に接触する直前の穴加工位置付近の応力状態を再現するために、模擬体は被加工材を把持し、面内引張応力を被加工材に負荷するまでの機構を有した形状で、前述のシミュレーション条件3の結果から、ダイの直径は10mmとした。図6に作製した模擬体の概略図を示す。被加工材がダイに接触するまでに、ばねの反力によって被加工材が把持された状態となるよう、初期配置では被加工材がダイから浮いた状態となる構造とした。また、クッションプレートガイドに、クッションプレートの下死点位置を律する段差を設けた。

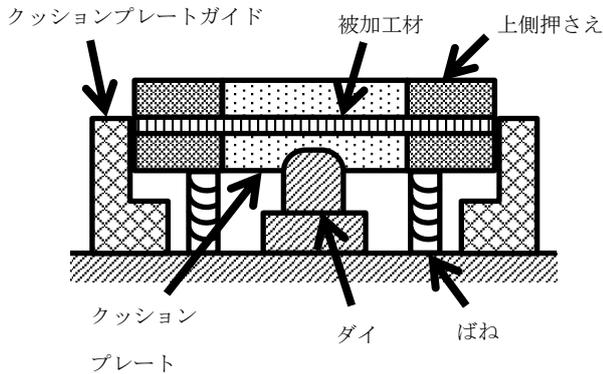


図6 模擬体概略図

3.3.2 模擬体での実験に用いた試料

表4に示す物性を有する縦横150mm板厚0.8mmの冷間圧延鋼板SPCCを用いた。

表4 模擬体実験試料

ヤング率	ポアソン比	引張強さ	耐力
200GPa	0.3	303MPa	169MPa

3.3.3 面内引張応力の試料への負荷方法

面内引張応力の負荷方法は、前述のシミュレーション条件3と同様とし、万能材料試験機(梶島津製作所AG-M1)を用いて上側押さえを押し下げ、試料中央を0.5mmまでたわませた。

3.3.4 ロゼット解析による主応力の算出

ひずみゲージは、試料中央の主応力を求めるため、図7に示す直角3軸型ロゼットゲージ(梶昭和測器N32-FA-1-120-11-VS3)を用いた。貼付位置及び方向を図8に示す。データ収集には、動ひずみ計測システム(梶キーエンスNR-500及びNR-ST04)を用いた。図8のaでのひずみを ϵ_a 、b・cも同様に ϵ_b ・ ϵ_c とした時、試料中央における最大主応力 σ_{max} 及び最小主応力 σ_{min} は、ロゼット解析により以下の式(1)(2)で求められる。式中のEはヤング率、 ν はポアソン比である。

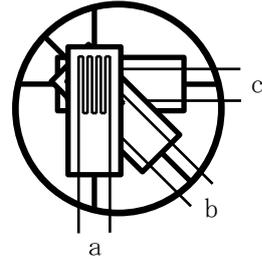


図7 直角3軸型ロゼットゲージ概略図

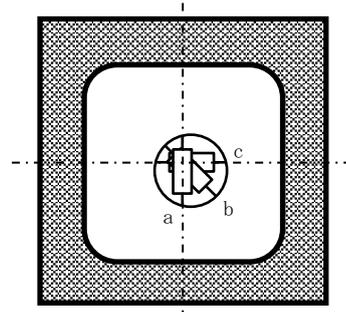


図8 ひずみゲージ貼付位置及び方向

$$\sigma_{max} = \frac{E}{2(1-\nu^2)} \left[(1+\nu)(\epsilon_a + \epsilon_c) + (1-\nu)\sqrt{2\{(\epsilon_a - \epsilon_b)^2 + (\epsilon_b - \epsilon_c)^2\}} \right] \quad \dots(1)$$

$$\sigma_{min} = \frac{E}{2(1-\nu^2)} \left[(1+\nu)(\epsilon_a + \epsilon_c) - (1-\nu)\sqrt{2\{(\epsilon_a - \epsilon_b)^2 + (\epsilon_b - \epsilon_c)^2\}} \right] \quad \dots(2)$$

3.3.5 たわみ付与時の応力状態

試料がダイに接触したところをたわみ量0mmとし、たわみ量が0.5mmに達するまでのひずみの変化を図9に示す。ひずみの増加は、たわみ量に対して直線的に比例している。つまり被加工材のひずみの最大値は、クッションプレートの下死点位置によって調整可能である。

また、たわみ量0.5mm時のひずみは $\epsilon_a=651\mu\text{ST}$ 、 $\epsilon_b=632\mu\text{ST}$ 、 $\epsilon_c=490\mu\text{ST}$ であった。ロゼット解析を行ったところ、最大主応力 σ_{max} は179MPa、最小主応力 σ_{min} は147MPaとなった。最大・最小いずれの値も正の値であることから、被加工材の穴加工位置付近は、いずれの方向も引張応力が負荷された状態となることが予想される。たわみ量0.5mm時の最大主応力をシミュレーションで求めた結果は189MPaであった。概ねシミュレーション通りであるが、実際の最大主応力の方が若干低くなった原因は、シミュレーションではモデルの四方が完全に固定された状態であるが、実際にはがたつきや滑り等が発生するためであると考えられる。

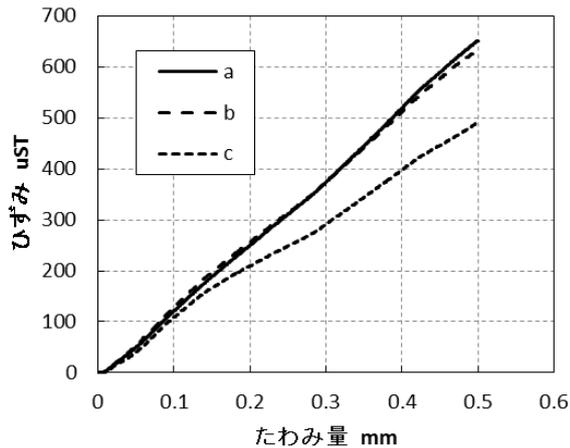


図9 たわみ量とひずみの変化

3・3・6 応力除荷後の残留変形

応力負荷前後の試料の残留変形測定には、表面粗さ測定機（株式会社ミツトヨ SV-C624）を用いた。ダイ接触側に対し、評価長さ 50mm でゲージ a と同方向へ、中央がひずみ測定点となるよう測定した。

直径 10mm のダイに対し、たわみを 0.5mm 付与した時の最大主応力は、試料の耐力を約 6% 超えており、残留変形を測定すると、応力負荷前は約 3 μ m、応力除荷後は約 5 μ m たわんでいた。しかし、測定時の誤差及び実際の穴抜き加工では加工の影響によるバリ等の歪み・たわみの発生が予想されるため、当該残留変形の穴抜き加工に対する影響はほぼ無いと考えられる。したがって、シミュレーションによって得られた応力負荷方法及び条件（ダイ直径 10mm、たわみ量 0.5mm）は概ね妥当であると判断した。

3・4 開発金型による小径穴抜き加工

3・4・1 開発金型の作製

シミュレーション及び模擬体での実験結果を基に開発金型を作製した。開発金型の概略図を図 10、完成した金型の写真を図 11 に示す。

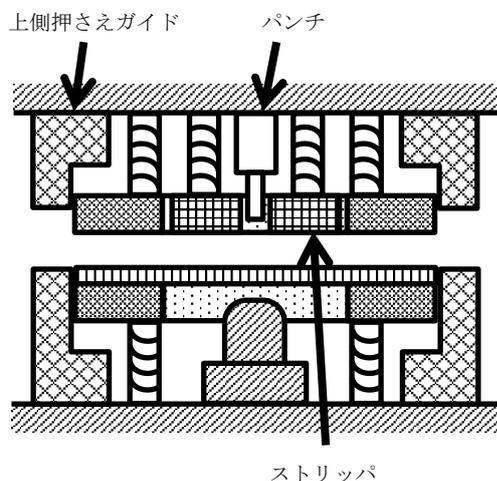


図 10 開発金型概略図

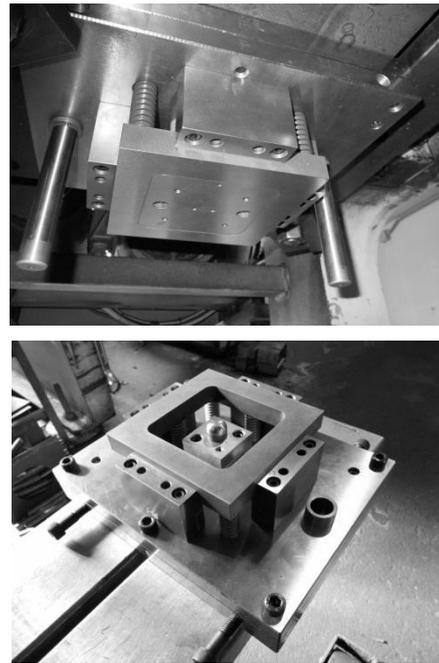


図 11 開発金型写真（上：上型，下：下型）

3・4・2 工具及び被加工材

パンチはショルダー 2 段パンチ（株式会社ミスマ PHTWA3-50-P0.5-B4.0-V2.0-F18）、ダイはボタンダイ（株式会社ミスマ MHD5-30-P0.6）を用いた。ダイには被加工材に接触する部分が直径 10mm となるよう、スリーブを取り付けた。被加工材は表 5 に示す物性を有する縦横 150mm 板厚 0.8mm の亜鉛めっき鋼板 SECC を用いた。

表 5 被加工材

試料名	引張強さ	耐力	ヤング率
被加工材 1	353MPa	222MPa	214GPa
被加工材 2	336MPa	202MPa	189GPa

3・4・3 加工時の荷重測定

万能材料試験機（株式会社島津製作所 AG-M1）により開発金型で小径穴抜き加工を行い、加工時の試験力ストローク線図から、金型にかかる荷重及び挙動を確認した。また、下型のクッションプレートガイドの下に厚さ 0.5mm のシムプレートを挿入し、同様の実験を行うことで面内引張応力無負荷時の荷重の変化も観察した。

3・4・4 荷重測定結果

図 12 は開発金型のばね反力のみを考慮した場合の試験力ストロークの予想線図で、図 13 は実際に開発金型で被加工材 1 に穴抜き加工を行った際の試験力ストローク線図である。図 14 はシムプレートを挿入し、面内引張応力無負荷で穴抜き加工を行った際の試験力ストローク線図である。

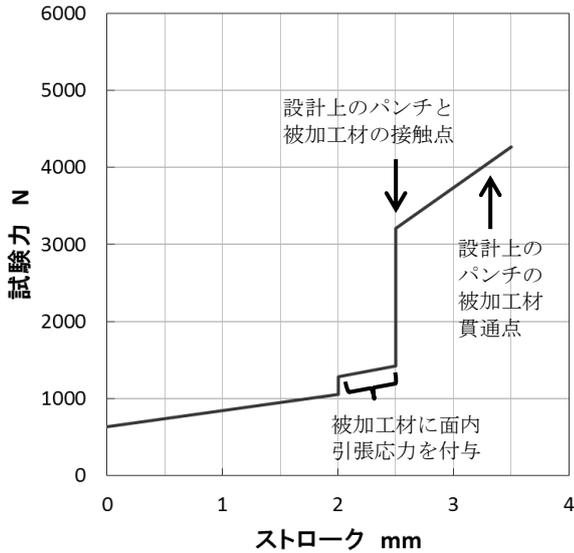


図 1 2 ばね反力だけの試験力予想

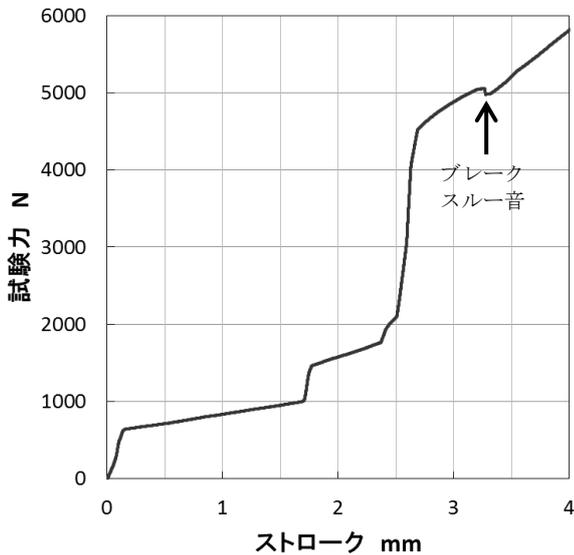


図 1 3 開発金型による穴抜き加工時の試験力

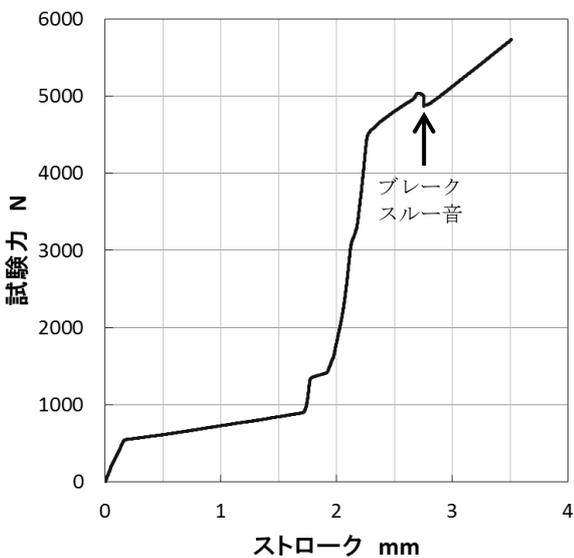


図 1 4 面内引張応力無負荷での穴抜き加工時の試験力

概ね設計通りの挙動が得られていることが確認できた。ストローク 0mm 及び 1.7mm 付近の挙動が設計とわずかにずれているが、金型のがたつきやガイドとの摩擦によるものと考えられ、修正は困難である。

図 1 3 及び図 1 4 のブレークスルー音直前のピークがせん断荷重¹⁾と考えられ、ブレークスルー時の荷重低下は、図 1 3 で約 79N、図 1 4 で約 173N となった。これは面内引張応力の負荷によりパンチと被加工材の摩擦が低減されたことによるものと推測される。このことから、パンチにかかる荷重の 50%以上の低減が期待できる。

3・4・5 連続 100 回の小径穴抜き加工

プレス加工機（コマツ製 60 トン OBS クランクプレス機）を用いて被加工材 2 に対し、加工速度約 20spm（パンチが被加工材に接触する瞬間の推定速度は約 30mm/sec）で連続 100 回の加工を実施した。図 1 5 は 1 回目の加工穴と 100 回目の加工穴をパンチ側の真上から、図 1 6 は加工穴をダイ側から 30° 傾斜させて電子顕微鏡（日本電子株式会社 JSM-5600LV/JED2201）で観察した写真である。図 1 7 は新品のパンチと 100 回加工後のパンチを 30° 傾斜させて電子顕微鏡観察した写真である。

図 1 5 では、100 回目も 1 回目とほぼ変わらない直径 0.5mm の穴が観察され、図 1 6 では、ゼロクリアランスになる箇所があるものの、1 回目と 100 回目で加工穴の状態はほぼ変わらなかった。図 1 7 では、新品のパンチに比べると亜鉛成分の付着及び円周の一部に摩擦によるエッジの不明瞭箇所が現れている。

このことから、被加工材の穴加工位置において、引張応力の不均一な箇所が発生していることが考えられ、パンチが被加工材をせん断していく際に起こる引張応力の開放に伴い、パンチの軌道がずれてゼロクリアランスになる箇所が現れるものと推測される。

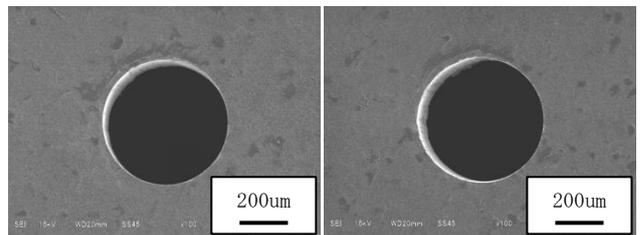


図 1 5 加工穴パンチ側（左：1 回目、右：100 回目）

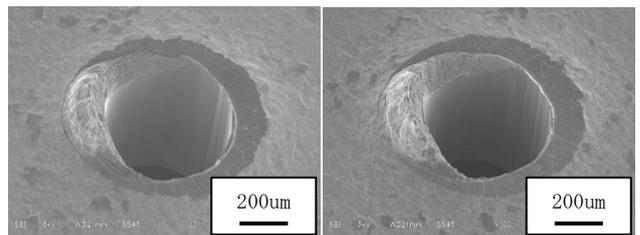


図 1 6 加工穴ダイ側（左：1 回目、右：100 回目）

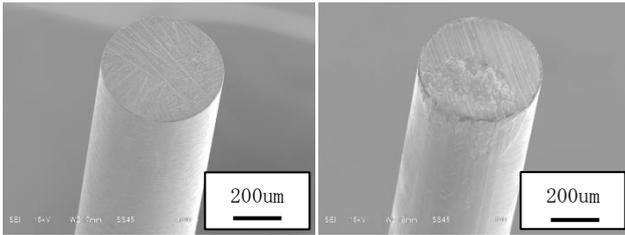


図 1 7 パンチ先端観察（左：新品，右：100 回加工後）

3・4・6 連続 350 回の小径穴抜き加工

被加工材 1・2 合わせて 350 枚用意し，連続 100 回加工時と同じ条件で連続プレス加工を試みた。

途中で工具交換することなく，350 枚全て小径穴抜き加工を行うことに成功した。図 1 8 は加工穴をパンチ側の真上から，図 1 9 は加工穴をダイ側から 30° 傾斜させて電子顕微鏡で観察した写真である。図 2 0 は 350 回加工後のパンチを 30° 傾斜させて電子顕微鏡観察した写真である。

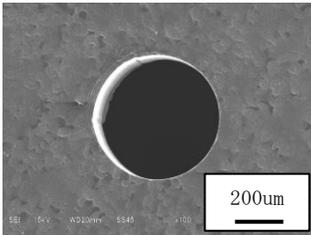


図 1 8 加工穴パンチ側（350 回目）

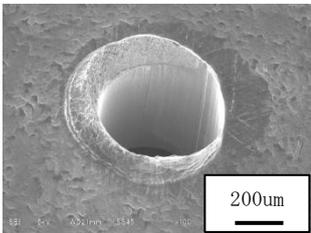


図 1 9 加工穴ダイ側（350 回目）

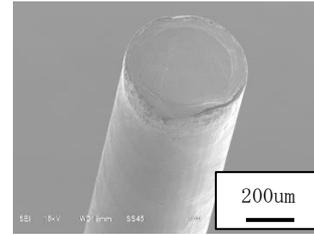


図 2 0 パンチ先端観察（350 回加工後）

図 1 8 及び図 1 9 のせん断面のゼロクリアランス部分に擦過痕が見受けられ，図 2 0 では 100 回加工したものより円周の一部の摩耗が大きくなっている。

本研究における面内引張応力は，被加工材をたわませることにより負荷しているが，ゼロクリアランス部分を無くすよう，穴加工位置にさらに精密かつ均一に面内引張応力を負荷することができれば，工具のさらなる長寿命化が期待できる。

4. 結論

面内引張応力負荷機構を組み込んだ金型による小径穴抜き加工時の試験カストローク線図から，せん断荷重の低下が確認され，面内引張応力負荷の小径穴抜き加工に対する有効性が確認された。

また，同金型により 350 回の連続小径穴抜き加工に成功した。

謝 辞

本研究を遂行するにあたり，多大なる御助言御協力をいただいた(株)川崎製作所 家富貴志氏並びに湯沢伍一氏，(有)栄精工 坂本重幸氏に深く感謝します。また，本研究は(公財)天田財団の支援を受けて実施いたしました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 古閑伸裕，青木勇：“プレス打抜き加工”，(2002)，日刊工業新聞社