ダイレス打抜き微細穴あけ加工における
パンチ形状及び工作物バックアップ方法の検討

京都工芸繊維大学　機械工学系
准教授　江頭　快
（2023年度 一般研究開発助成 AF-2023007-B2）

キーワード：打抜き，ダイレス，微細穴

１．研究の背景と目的

せん断加工は，材料に力を加えて破壊させ分断する破壊切断法の一種である．工具を使用して一挙にせん断変形が与えられて加工が行われるため，極めて効率的であるという特長がある．一般にせん断加工は一対の工具により材料を挟んで切断する方法であり，工具の動きにより上下動によるプレスせん断と回転動によるせん断に大別できる．打抜きはプレスせん断に分類され，パンチとダイにより材料を挟み込んで加工を行う．しかし，内径が0.1mm未満であるような微細穴の打抜きとなると様々な問題が生じてくる．まず，パンチ及びダイの製作が難しくなる．両者には硬度や靭性が要求されるが，そのような材料を微細形状に加工する必要がある．次に，それらを組み合わせたダイセットを作成することが困難である．顕微鏡を用いた両者の中心軸の位置合わせ作業が必要になるが，作業者の熟練と長い作業時間が求められる．

そこで，パンチを放電加工により製作し，工作物裏面を接着テープによりバックアップすることでダイレス打抜きによる微細穴あけ加工が試みられている[1]．ダイレスにより極小径のダイの製作及びダイセットの作成が不要となり，さらに小径な打抜きが可能となった．その結果，直径6μmの超硬合金パンチを使用し，厚さ3μmのステンレス鋼箔に対して入口径6μm未満の穴あけ加工に成功している．しかし，支持体に粘着力が強い接着テープを使用しており，工作物を剥離する際に大きな負荷がかかるため，工作物が損傷してしまう場合があった．また，パンチの折損強度が低く，厚みのある工作物や，より小径のパンチの使用は困難であった．

そこで本研究では，まず工作物を容易に剥離できる付箋紙を支持体として使用し，微細穴あけ加工が可能であるかを検証する．次に，加工条件と加工穴径やパンチ荷重などの加工特性との関係を調べ，支持体が接着テープの場合と比較する．さらに，パンチ長さを短くしたステップ形状パンチを用い，それによる加工が可能か検証するとともに加工特性を調べ，従来のパンチ形状の場合と比較する．最後に，支持体に付箋紙を使用し，ステップ形状パンチを用いて極小径穴あけ加工を試みる．

２．実験方法

加工装置には微細超音波加工機[2]を用いた．装置主要部の構成を図１に示す．電子天秤上にはホルダに固定された超音波振動子が置かれている．まず振動子端面にロードセルを接着テープにより固定し，その上に付箋紙（スリーエムジャパン㈱製，715RP-K）を接着テープにより貼付け，さらにその上に工作物を固定する．付箋紙は粘着剤層とベースの紙で構成されており，それらの厚さの和は実測で45μm程度である．電子天秤はパンチと工作物の接触検知に使用する．超音波振動子により工作物を超音波加振することが可能であるが，本実験では使用しない．パンチの把持には，パンチの製作に使用する放電加工機に使用されているものと同型のスピンドルを使用した．これによりパンチを回転させることも可能である．

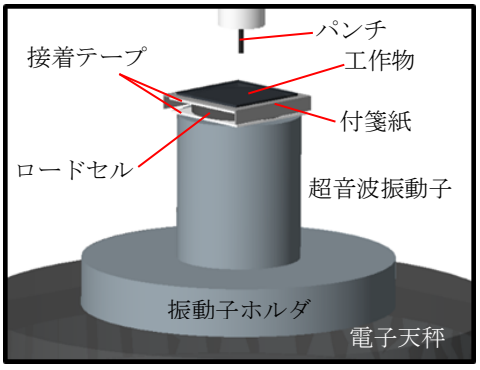


図１　加工装置主要部の構成

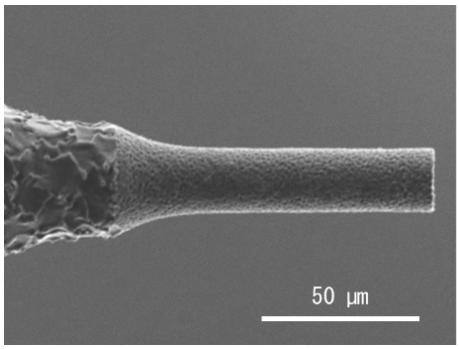
パンチ材料には超硬合金（FM10K，アライドマテリアル㈱製）を用いた．これを放電加工で成形して微細パンチとした．図２に微細パンチの例を示す．図(a)は直径20μm，長さ70μmのストレート形状パンチであり，図(b)はストレート部分の直径が20μm，長さが23μmのステップ形状パンチである．

穴あけ加工は，まず工作物表面の上方50–100μmにパンチ端面を移動させ，次にその長さとパンチ送り長さを足した距離だけパンチを送ることにより行った．パンチ送り速度は50μm/sに設定した．工作物にはステンレス鋼(SUS304)箔を用いた．

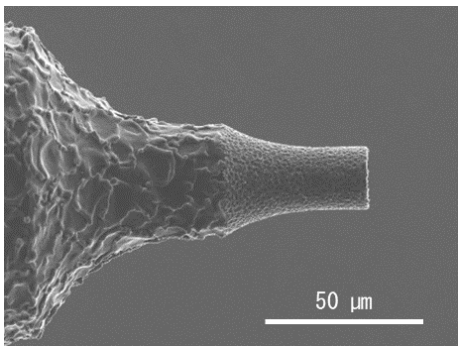
３．実験結果

３・１　付箋紙支持体を用いた加工

付箋紙により工作物を支持し，直径21μmのストレート形状パンチを用いて穴あけ加工を試みた．工作物厚さは



(a)　ストレート形状パンチ



(b)　ステップ形状パンチ

図２　放電加工成形された超硬合金微細パンチ

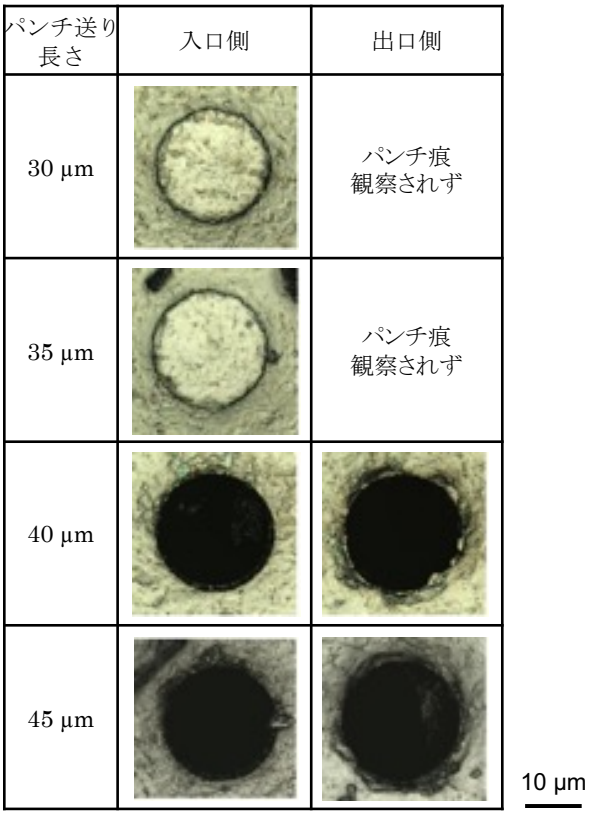


図３　支持体に付箋紙を用いた場合の穴あけ加工例

5μmとした．パンチ送り長さを変化させ，同条件で3回加工を行ったときの1穴目の結果を図３に示す．パンチ送り長さが35μm以下では1回もパンチが貫通しなかったが，40μm以上ではいずれも打抜きに成功した．これにより，付箋紙を支持体としたダイレス打抜きが可能であることが確かめられた．他条件は同じで支持体が接着テープの場合では35μmのパンチ送り長さで3回とも打抜きが可能であり，付箋紙の場合はパンチ送り長さを若干大きくする必要があることがわかった．ロードセルにより測定された，パンチ送り長さが40μmのときのパンチ荷重変化を図４に示す．パンチが工作物に接触してから0.6–0.7sの辺りで荷重が最大となっており，この際にパンチが貫通したと考えられる．最大荷重値は支持体が接着テープの場合と比較して大きかった．また，穴入口最大径の平均値はパンチ径より0.5–1μm程度小さく，これは接着テープの場合と大きな違いはなかった．

本加工装置では回転パンチによる打抜きが可能であり，それによりパンチ荷重が低減する効果が得られている[1]．そこで，支持体を付箋紙とした場合でも同様な効果が得られるか検証した．パンチ送り長さを45μmとし，パンチ回転数を変化させ，同条件で3回加工を行った．そのときの1穴目の結果を図５に示す．いずれの回転数でも3回とも穴あけが可能であった．穴入口最大径の平均値はパンチ径より1μm程度大きいが，これは支持体が接着テープの場合も同様である．図６に，パンチ回転数が2000min^{-1}のときのパンチ荷重変化を示す．パンチ回転の有無以外はほぼ同

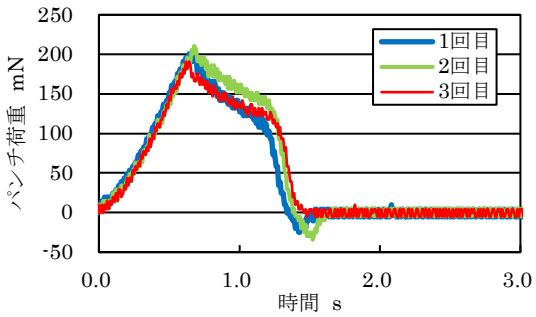


図４　パンチ荷重変化（パンチ送り長さ ＝40μm）

加工条件の図４の結果と比較すると，最大荷重値が小さくなっていることがわかる．これにより，支持体を付箋紙とした場合でもパンチ荷重低減効果が現れることが確認された．以降の実験も支持体に付箋紙を使用して行った．

3・2　ステップ形状パンチによる加工

ストレート部分の直径が20.5μm，長さが26μmのステップ形状パンチを用い，厚さ5μmの工作物に対して穴あけ加工を試みた．パンチ送り長さを30–40μmに設定し，同条件で3回加工を行った．その1回目の結果を図７に示す．送り長さが30μmの場合は1回も穴あけが行えなかったが，35μm以上では3回とも行えており，ステップ形状パンチでも穴あけ加工が可能であることが示された．ただし，ストレート部分の長いパンチを使用した場合では入口最大径がパンチ径より小さいことが多いが，本実験ではそれらが同程度であった．パンチが工作物を貫通した際に，その

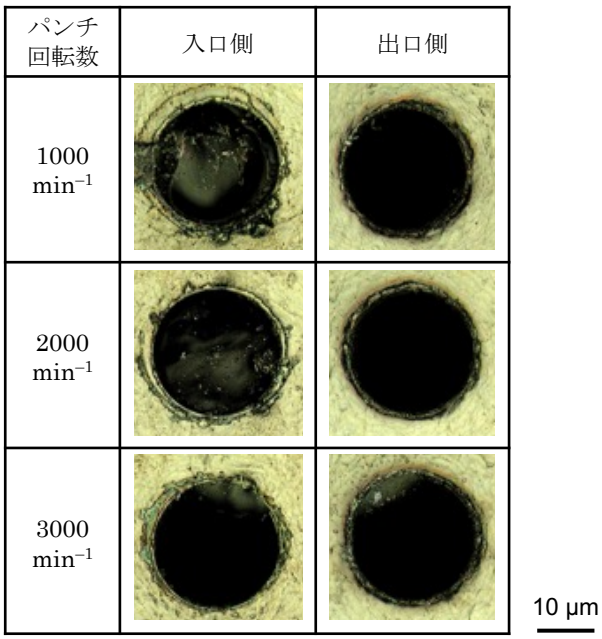


図５　回転パンチによる穴あけ加工例

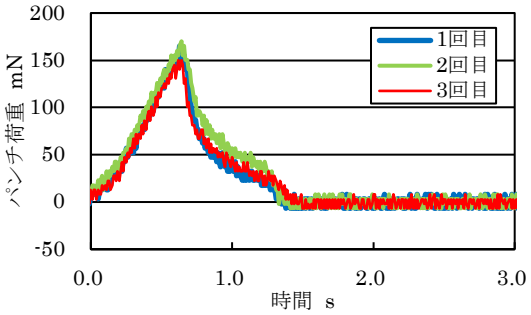


図６　回転パンチを用いた場合の荷重変化(パンチ送り長さ ＝45μm，パンチ回転数 ＝2000min^{-1})

ストレート部分を越えて根元のR部分でも打抜きが行われたためと考えられる．したがって，パンチのストレート部分をもう少し長く設定する必要がある．

次に，同形状のパンチを用い，厚さ20μmの工作物に対して穴あけ加工を試みた．このパンチ径と工作物厚さでの加工は，従来のストレート部分の長いパンチではパンチ折損により不可能であった．パンチ送り長さを45–70μmに設定し，同条件で3回加工を行った．その1回目の結果を図８に示す．送り長さが45μmの場合は1回も穴あけが行えなかったが，60μm以上では3回とも行えており，アスペクト比が1程度の穴あけ加工が可能であることが示された．ただし，入口最大径がパンチ径より2μm程度大きく，工作物厚さ5μmの場合と同様にパンチのR部分まで工作物を貫通したと考えられる．図９に，パンチ送り長さが70μmのときの加工穴の走査電子顕微鏡(SEM)画像を示す．入口側の観察画像からは穴内壁の状態が明瞭に確認でき，せん断加工面特有のだれ部，およびそれに続く軸方向の条痕を伴うせん断面が観察される．

3・3　極小径穴あけ加工の試み

さらに，極小径穴あけ加工を試みた．ストレート部分の

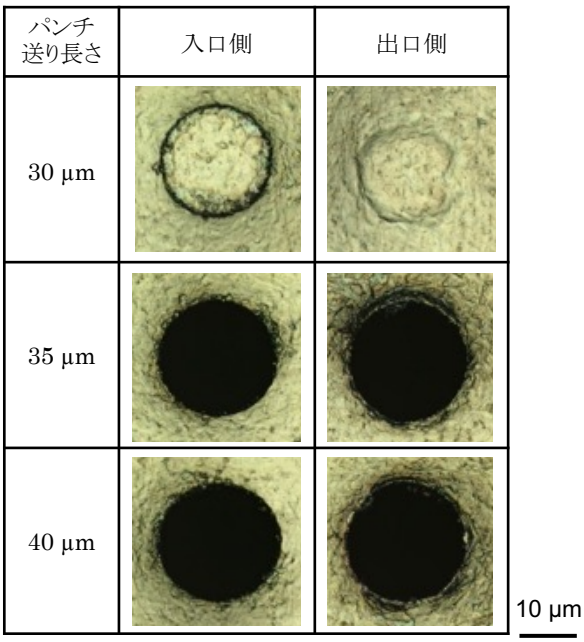


図７　ステップ形状パンチによる穴あけ加工例

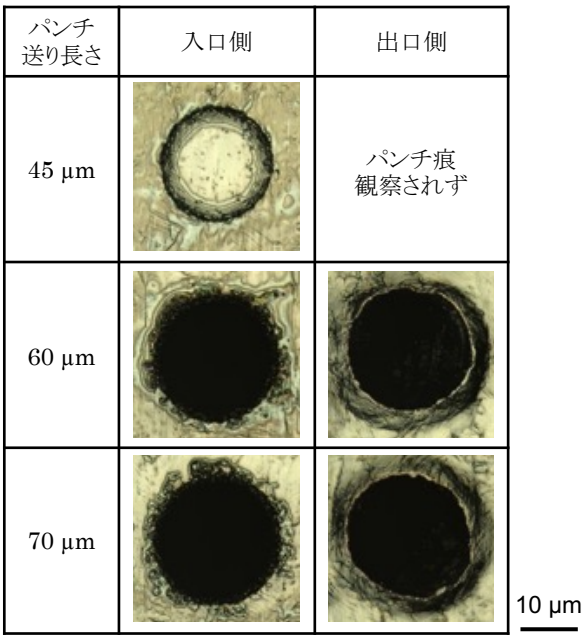


図８　厚さ20μmの工作物への穴あけ加工例

直径が4.2μm，長さが9.5μmのステップ形状パンチを用い，パンチ送り長さを15μmに設定し，厚さ2μmの工作物に対して加工を行った．その結果，図10に示すように穴あけが可能であった．入口最大径は3.8μmであり，パンチによる穴あけ加工例としては最小のものと思われる．なお，本加工例では入口最大径がパンチ径より小さかった．パンチのストレート部分が十分長く，そのR部分まで工作物を貫通することがなかったためと考えられる．

４．結び

ダイレス打抜きによる微細穴あけ加工における，工作物をバックアップする支持体とパンチ形状の検討を行った．

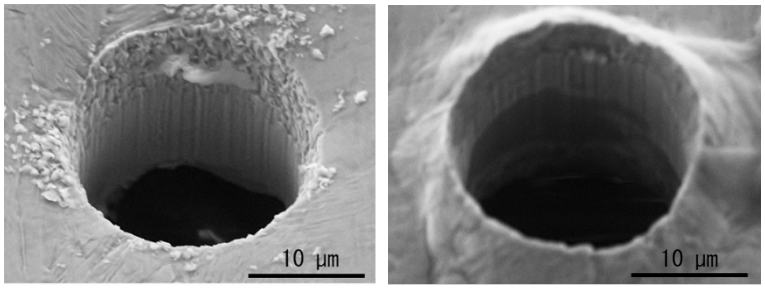
まず工作物の剥離が容易になる付箋紙を支持体として用い，直径20μm程度のストレート形状パンチを使用して，厚さ5μmのステンレス鋼箔に対し加工を試みた. その結果，従来の支持体の場合と比較してパンチ送り長さを大きめに設定する必要があるが，ダイレス打抜きが可能であることが確かめられた．さらに，折損強度の高いステップ形状パンチを用いてステンレス鋼箔に対し加工を試みた. 直径20μm程度のパンチを用いた場合，厚さ20μmの工作物への打抜きが可能で，アスペクト比が1程度の穴あけ加工が可能であることが示された．最後に，付箋紙支持体とステップ形状パンチを適用して加工を試みた結果，厚さ2μmのステンレス鋼箔に対して内径4μm未満の極小径穴あけ加工を実現した.

謝　辞

本実験の遂行にご協力いただいた，京都工芸繊維大学・橋田桂一氏に感謝の意を表します.

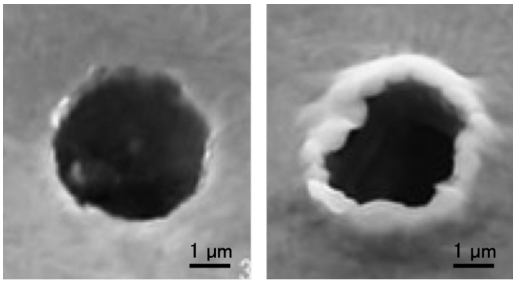
参考文献

1) Kai Egashira・Hayata Hamafuji・Shinya Araki・Keishi Yamaguchi : Precision Engineering , 78 (2022), 114.
2) Kai Egashira・T. Masuzawa: Annals of the CIRP, 48-1 (1999) , 131.



(a)　入口側　　(b)　出口側

図 9　加工穴の SEM 画像（工作物厚さ = 20μm，パンチ送り長さ = 70 μm）



(a)　入口側　　(b)　出口側

図10　極小径穴あけ加工例（工作物厚さ = 2μm）