論文

ダイヤモンド工具によるステンレス薄鋼板の
無潤滑深絞り加工

古閑 伸裕* 薄 憲毅** 許 昌龍**

Deep Drawing of Thin Stainless Steel Sheets Using Diamond Tools
without Lubricant

Nobuhiro KOGA*, Kazuki USU** and Changlong XU**

(Received on May 7, 2011)

Highly corrosion-resistant stainless-steel sheets have been increasingly used in various applications. In press forming, however, workpieces of stainless-steel sheets more easily adhere to die tools than to other metals. In this study, we propose to apply sintered polycrystalline diamond (PCD) to die tools used for press forming. Die tools made of sintered PCD can be fabricated by electric discharge machining. We carried out a deep drawing experiment on a thin SUS304 stainless-steel sheet using die tools made of sintered PCD (a die and a blank holder). It was found that the drawing limit was improved using the PCD tools compared with the conventional tool made of alloy tool steel (SKD11), because the coefficient of friction between the PCD tools and the workpiece was reduced. Moreover, we carried out 5,000 continuous deep drawing experiments without lubricant. For the conventional tool, the workpiece started adhering to the die immediately after the start of drawing, and large flaws were observed on the side wall of the drawn products. For the PCD tools, the workpiece never adhered to the tools during drawing, and high-precision-drawn products were stably obtained for up to 5,000 drawing experiments.

Key words: sheet metal forming, deep drawing, diamond tool, stainless steel, without lubricant.

1. 緒言

耐食性に富むステンレス鋼板は、様々な用途への利用が期待されている。しかし、ステンレス鋼板のプレス加工においては、金型工具への被加工材の焼付きや凝着が生じやすいため、特に形状が複雑な部品の成形や工程数削減のためには、塩素などの極圧剤が添加された潤滑油の使用が不可欠とされている。しかし、一方では環境改善の観点からこれら極圧剤が添加された潤滑油の使用が制限されている。このような問題を解決するための対策の1つとして、金型工具への硬質膜コーティングがある。

著者らは、すでにアルミニウム合金板¹⁾、純チタン板²⁾、マグネシウム合金板³⁾の深絞り加工において、硬質膜コーテッド工具の優れた成形性向上効果や成形品の精度悪化防止効果を明らかにしている。しかし、これら工具にコーティングされる DLC (ダイヤモンドライクカーボン) などの硬質膜は厚さが数ミクロンであり、基材との密着力も十分であるとは言い難い。特に大きな力が作用するプレス金型工具へ硬質膜をコーティングすると、比較的早期に膜の摩

耗や剥離が生じやすい。従って、生産の途中で硬質膜にこのような損傷が発生すると、生産を中断しなければならぬといった重大な問題を引き起こすことになる。このような理由から、塑性加工用工具への硬質膜コーティングの用途は限られている。

さて、非鉄金属の切削加工においては、バイトやエンドミルなどに工業用ダイヤモンド工具が用いられ、その有効性が実証されている。最近では、放電加工が可能な多結晶ダイヤモンド焼結体 (PCD)⁴⁾ やボロンをドーピングした板状の導電性 CVD ダイヤモンド⁵⁾ が開発され、注目を集めている。但し、これらダイヤモンド工具は切削加工の分野では熱による影響のため、鉄系金属の加工に用いることは困難とされてきた。

著者らは、上記放電加工が可能なダイヤモンド⁶⁾の塑性加工工具への利用を提案し、アルミニウム合金板のシェーピング工具や深絞り用工具 (ダイ、しわ抑え) への適用研究⁷⁾を行った。その結果、これら工具は従来の合金工具鋼製工具や超硬合金製工具に比べ、成形性向上や耐凝着性向上による成形品精度悪化防止に顕著な効果をもたらすことが実験的に明らかになった。

本研究では、前述したような理由から、鉄系金属のなかでもプレス加工が困難とされるステンレス鋼板の深絞り工具へのダイヤモンドの適用性を調査するための特性調査試

* 日本工業大学工学部機械工学科 〒345-8501 南埼玉郡宮代町学園台 4-1
Department of Mechanical Engineering, Nippon Institute of Technology,
4-1 Gakuendai, Miyashiro, Minamisaitama-gun, Saitama 345-8501, Japan.

** 日本工業大学大学院 同上 大学院生
Graduate student, Nippon Institute of Technology, ibid.

験を行う。具体的には、多結晶ダイヤモンド焼結体 (PCD) とステンレス鋼球との摩擦特性や、単型によるダイヤモンド工具の成形性向上効果などを調査し、同工具の有効性を調査する。そして、順送型による連続深絞り加工および連続絞りしごき加工を行い、ダイヤモンド工具のこれら加工における実用性を評価する。

2. ダイヤモンドの特性調査試験

深絞り加工において、被加工材と工具間の摩擦係数や親和性は成形性に大きな影響を及ぼす。すなわち、被加工材と工具間の摩擦係数が低減され親和性が改善できれば、成形限界の向上が期待できる。また親和性が改善され被加工材の工具への焼付きや凝着の発生が防止できれば、成形品の精度悪化防止効果が高まる。さらに工具の寿命向上も期待できる。そこでまず、PCD とステンレス (SUS304) との摩擦摩耗試験を行う。そして、PCD 製工具 (ダイとしわ抑え) をセットした単型による限界絞り比の調査を行う。

2.1 摩擦摩耗試験

Table 1 に示す 2 種類の試験片を準備し、それぞれについて SUS304 製鋼球をセットしたボールオンディスクタイプ摩擦摩耗試験機を用い、Fig.1 に示す条件で摩擦摩耗試験を行う。この場合、試験は大気中で行うこととし、試験前に試験片とボールはアセトンによる脱脂を行った。Table 1 中の試験片 A は一般に切削工具用として広く利用されている超硬合金製の試験片である。試験片 B は Co をバインダーとした多結晶ダイヤモンド (平均粒径: 約 10 μ m) の焼結体 (PCD) である。

Table 1 Specimens used friction and wear tests

Specimen	Material	Surface roughness	Size (mm)
A:Carbide	UXR25 (Misumi)	0.10 μ mRa 0.60 μ mRz	13 $\times$ 13 $\times$ 3
B:PCD	CTB-010 (Element Six)	0.07 μ mRa 0.40 μ mRz	11 $\times$ 11 $\times$ 0.5

Fig.1 Conditions of friction and wear test

上記 2 つの試験片について、それぞれ摩擦摩耗試験を行った。Fig.2 に回転数の増加に伴う摩擦係数の変化を示す。超硬合金製の試験片 A では試験開始直後から、摩擦係数が急激に増大する現象が認められたが、B の PCD 試験片の場合は、試験終了時まで 0.1 前後の低い摩擦係数のまま安定していた。

試験後の試験片表面を観察した結果を Fig.3 に示す。試験片 A にはステンレスと思われる凝着物の発生が顕著に認められたのに対し、B の試験片にはこのような凝着物の発生は全く認められなかった。

以上の測定結果から、上述のように PCD 試験片とステンレス製ボール間の摩擦係数が試験終了時まで低い値で維持できたのは、ステンレスのダイヤモンドへの凝着が防止できたためと推察される。

Fig.2 Change in coefficient of friction with number of rotations (Using Stainless ball)

Fig.3 Surface condition of specimens after tests

2.2 限界絞り比調査試験

2.1 節の摩擦摩耗試験の結果から、PCD 製工具を用いて SUS304 鋼板の深絞り加工を行えば、成形性の向上が期待できる。そこで、単型による SUS304 ステンレス薄鋼板の限界絞り比 (LDR) の調査実験を行う。

Table 2 に示す 2 種類の工具 (ダイのみを表示) により、Table 3 に示す機械的性質の板厚 $t=0.10$ mm の SUS304 ステンレス薄鋼板の限界絞り比を調査する。工具 1 は比較のための合金工具鋼 (SKD11) 製工具である。工具 2 は厚み 2mm の PCD を高温焼結により超硬合金基材に接合した円柱状ブロックから、放電加工と研磨およびラッピングにより製作した PCD 製ダイである。工具 1 による加工では、SKD11 製しわ抑えを用い、工具 2 による加工では PCD 製しわ抑え

Table 2 Specifications of deep drawing tools

Tool	Photograph	Surface roughness	Dimensions of Tool 2
Tool 1 (SKD11)		0.09 μ mRa: 0.50 μ mRz	
Tool 2 (PCD)		0.07 μ mRa: 0.50 μ mRz	

を用いる。また、いずれの加工においてもパンチには SKD11 製パンチを用い、このパンチの外径は $Dp = \phi 3.12\text{mm}$ (パンチ先端アール半径 $Rp = 0.5\text{mm}$) とし、ダイ内径は $Dd = \phi 3.36\text{mm}$ (ダイ肩アール半径 $Rd = 0.75\text{mm}$) とする。この場合の工具クリアランスは $C = 0.12\text{mm}$ ($=1.2t$) である。これら工具および条件で、直径の異なるそれぞれの円形ブランクについて深絞り加工を行い、それぞれの工具における LDR を調査する。この場合、工具と被加工材は加工前にアセトンによる脱脂を行い、無潤滑での加工を行う。

Table 3 Mechanical properties of the work material

Symbol (JIS)	Tensile strength / $\text{N} \cdot \text{mm}^2$		Elongation / %	
	650		45	
	Hardness /HV	n-value	r-value	
	178	0.48	1.51	

Fig.4 に上記工具をセットした深絞り金型 (単型) の概略図を示す。この金型は、PCD 製のダイとしわ抑えが加工中に直接接触することがないように、金型が閉じた状態でも両者間に被加工材板厚と同一のすき間 (0.10mm) が保てるようにし、固定しわ抑えを用いる場合と同様の方式でしわ抑え力を被加工材に作用させることとした。また、加工には NC サーボプレスを利用し、ダイヤモンド工具に作用する衝撃力を緩和するため、加工開始直前の位置からクラック軸の回転数を 5spm まで低下させることでスライドの下降速度を減速するソフトモーションで加工を行う。

Table 4 に限界絞り比 (LDR) 調査結果と成形品例を示す。工具 1 の場合は LDR が 2.13 であったのに対し、工具 2 で

Fig.4 Schematic of deep drawing die-set

Table 4 Comparison of limiting drawing ratio

	2.13	2.14	2.15	2.16	2.17	2.18	2.19
Tool 1	(a)○	(b)×	—	—	—	—	—
Tool 2	○	○	○	○	○	(c)○	(d)×

は LDR が 2.18 まで向上した。これは 2.1 節の摩擦係数測定の結果からも予想されるように、PCD 製工具を用いることで、被加工材と工具間の摩擦係数が小さくなり、材料の変形が容易に行われたためと推察される。

3. ダイヤモンド工具実用性評価実験

3.1 連続無潤滑深絞り実験

(1) 実験方法

円形ブランクを用いた単型による加工では、より多くの加工を行うことが困難であること、さらには円形ブランクのセッティングや成形品の取り出しなどに時間を要することで、加工ストローク数を大きく設定できないため、加工による発熱の影響が出にくいなど、実用的な評価が行えないことが懸念される。

そこで、Fig.5 に示すような工程で連続深絞り加工が行える順送型 (プログレッシブ金型) を製作し、これを NC サーボプレスに取付け、ソフトモーションにより 20spm のストローク数で無潤滑連続深絞り加工を行う。

被加工材には、Table 3 に示す板厚 $t = 0.10\text{mm}$ 、板幅 20mm の SUS304 ステンレス鋼フープ材を用い、これを金型内に 10mm のピッチで順次送り込む方法で連続加工を行う。すなわち、曲率半径が異なる 2 種類の工具により二重の切込みを入れ、 $\phi 5.4\text{mm}$ の円形状ブランクを作製した後、これを外径 $Dp = \phi 3.12\text{mm}$ (パンチ先端アール半径 $Rp = 0.5\text{mm}$) のパンチと、内径 $Dd = \phi 3.36\text{mm}$ (ダイ肩アール半径 $Rd = 0.75\text{mm}$) のダイにより深絞り加工する。この場合の絞り比は $DR = 1.73$ である。なお、この連続深絞り実験も、Table 2 に示す 2 種類の工具について行う。

(b) Sample of drawn product

Fig.5 Deep drawing using progressive-type die and sample of drawn product

(2) 実験結果および考察

Fig.6 (a), (b) に、工具 1 (SKD11 製工具) により 1 回目に加工した成形品と、側壁部表面に傷の発生が顕著に認められるようになった 30 回目の成形品をそれぞれ示す。同図 (c), (d) には工具 2 (PCD 製工具) による 1 回目と実験終了

Fig.6 Products obtained by continuous deep drawing without lubricant

Fig.7 Die shoulder radius by continuous deep drawing without lubricant

の 5,000 回目に得られた成形品をそれぞれ示す. また **Fig.7** には加工後のダイ肩アール部を示す.

無潤滑の状態で工具 1 によりステンレス薄鋼板を加工すると, わずか加工回数 30 回目でダイ肩アール部付近に被加工材と思われる凝着物の発生が認められた. この凝着物の発生により, 30 回目に得られた成形品の側壁部には, 初回成形時には認められなかった筋状の傷がほぼ全周にわたって認められるようになった. これに対し, 工具 2 を用いた場合は, 5,000 回まで安定した加工が行え, 5,000 回目に得られた成形品は, 初回成形品とほとんど変化が認められないものであった. また加工後の工具には凝着物の発生やその他の工具不良も一切認められなかった.

成形品側壁部の表面粗さを測定したところ, 工具 1 により深絞りされた 1 回目の成形品の側壁部は $0.55\mu\text{mRz}$ であったのに対し, 30 回目に得られた同部の粗さ $0.98\mu\text{mRz}$ まで悪化していた. これに対し, 工具 2 による成形品の側壁部は, 1 回目が $0.52\mu\text{mRz}$, 5,000 回目が $0.54\mu\text{mRz}$ であり, ほとんど変化が認められなかった.

以上の結果から, ステンレス薄鋼板の深絞り加工にダイヤモンド工具を用いれば, 成形品の精度悪化を招くことなく安定した加工が行えることが判明し, 無潤滑深絞り加工の可能性も見いだすことができた.

3.2 連続無潤滑絞りしごき実験

(1) 実験方法

前記 5,000 回の連続無潤滑深絞り実験において, ダイヤモンド (PCD) 工具の有効性が明らかになった.

深絞り加工では, 成形品の外径寸法や側壁部板厚寸法に高い精度が要求される場合には, パンチとダイ間のすき間を被加工材の板厚より小さな値に設定し, 絞り工程中に側壁部にしごきを加える, 絞りしごき加工が行われる.

この絞りしごき加工では, ダイに大きな負担が強いられるため, 深絞りにも増して被加工材のダイへの焼付きや凝着が発生しやすくなる. このような厳しい加工へのダイヤモンド工具の適用性について調査する.

連続深絞り実験に使用した順送金型内の $Dp = \phi 3.12\text{mm}$ のパンチを, $Dp = \phi 3.22\text{mm}$ (パンチ先端アール半径 $Rp = 0.5\text{mm}$) のパンチに交換した. これにより, ダイとパンチ間のクリアランスは $C = 0.07\text{mm}$ ($= 0.7t$) となり, 絞り比 $DR = 1.68$ の条件で深絞りを行うと同時に 30% t のしごき率で側壁部を減肉することになる. この加工においても Table 3 に示した SUS304 薄鋼板を被加工材として用いる. 加工ストローク数も連続深絞り実験と同一の 20spm とし, 5,000 回の無潤滑連続絞りしごき加工を行う.

(2) 実験結果および考察

Fig.8(a) に 5,000 回目に得られた成形品とその側壁部性状を, 同図(b)に 5,000 回絞りしごき加工後のダイを示す. PCD 製工具により絞りしごき加工された容器の側壁部は, 深絞り容器 (**Fig.6(c),(d)**) に比べ側壁部が平滑に仕上げられており, 同部の表面粗さは 1 回目が $0.38\mu\text{mRz}$, 5,000 回目が $0.39\mu\text{mRz}$ であった. すなわち, 加工回数の増加に伴う表面粗さの悪化もほとんど認められなかった. また, 5,000 回加工後においても, PCD 工具には凝着物の発生などの工具不良は一切認められなかった.

切削加工においては鉄系金属への適用が困難とされてい

るダイヤモンド工具が、ステンレス薄鋼板の深絞りや絞りしごきには十分適用できることが明らかになった。この原因は、被加工材が薄板であったため加工による発熱の程度が小さかったことも考えられるが、塑性加工のような断続的な加工では、ダイヤモンドの高い熱伝導率により、効率よく加工により発生した熱が放熱されたことで工具や成形品への悪影響が生ずることなく安定した加工が行えたと考えられる。この原因解明については今後の研究課題とする。

Fig.8 Product and die after 5,000 repetition of deep drawing and ironing using tool 2 ($C=0.7t$)

4. 結 言

放電加工による製作が可能な多結晶ダイヤモンド (PCD) 製工具のステンレス (SUS304) 薄鋼板深絞り工具への適用性を調査するため、摩擦摩耗試験と限界絞り比調査実験を行った。そしてこれら調査結果を基に、順送金型による無潤滑連続深絞り実験を行った。その成果を以下にまとめる。

- 1) ボールオンディスクによる摩擦摩耗試験の結果から、PCD 製試験片とステンレスボール間の摩擦係数は、超硬製試験片による場合に比べ大幅に低減できることが確認

された。

- 2) PCD 製のダイとしわ抑えを用いてステンレス薄鋼板の深絞り加工を行えば、合金工具鋼 (SKD11) 製工具を用いた場合に比べ、限界絞り比が向上できることや、無潤滑条件下においてもステンレスの工具への焼付きや凝着の発生が防止できることを明らかにした。
- 3) ステンレス薄鋼板の深絞り加工における PCD 製工具の実用性を評価するため、同工具を備えた順送型による 5,000 回の無潤滑深絞り加工を行った。その結果、比較のために用いた合金工具鋼 (SKD11) 製工具の場合は、わずか 30 回の加工回数で工具への被加工材の凝着が発生し、成形品精度が悪化した。これに対し、PCD 製工具により得られた 5,000 回目の成形品は初回と同程度の高精度を有しており、工具状態も安定していたことから、さらに多くの回数が必要となる加工にも十分適用が可能であることが判明した。
- 4) 深絞り加工より工具の負担が大きな絞りしごき加工においても、PCD 製工具を用いれば、5,000 回の無潤滑連続加工が可能であることを明らかにした。

最後に、本研究の実験をお手伝いいただいた、日本工業大学卒研生の前戸貴裕君に感謝する。また、本研究は科学研究費補助金 (基盤研究(C), 課題番号: 22560117), 天田金属加工機械技術振興財団および軽金属奨学会からの助成を賜り実施したものであり、これら団体に厚く御礼申し上げる。

参 考 文 献

- 1) Murakawa, M., Koga, N. & Takeuchi, S.: Trans. of ASME, **121** (1999), 674-678.
- 2) 古閑伸裕・劉志国: 塑性と加工, **45**-526 (2004), 922-926.
- 3) 古閑伸裕・R. Paisarn: 塑性と加工, **42**-481 (2001), 145-149.
- 4) 鈴木清・二ノ宮進一・岩井学: 電気加工学会全国大会講演論文集, (2009), 57-60.
- 5) 竹内貞雄・村石貴志: 表面技術, **61** (2010), 274-278.
- 6) 南久・渡邊幸司・増井清徳, 鍋倉伸嘉: 電気加工学会誌, **44** (2010), 17-24.
- 7) 古閑伸裕・許昌龍: 軽金属, **61**-3 (2011), 107-111.