論文

導電性セラミックス工具を用いた無潤滑円筒絞り加工

玉置 賢次* 片岡 征二** 皆本 鋼輝***

Dry Cylindrical Cup Drawing Using Electroconductive Ceramic Tools

Kenji TAMAOKI*, Seiji KATAOKA** and Kouki MINAMOTO***

(Received on October 18, 2006)

A large quantity of lubricant waste has become a very serious environmental issue. For the zero emission of lubricants, dry deep drawing is efficient; however, it is generally very difficult to apply it to metal sheets. As one of the most promising methods, the use of ceramic tools is proposed because of their high tribological properties. However, the workability of the ceramic tools is poor. Therefore, the forming of a complex shape is difficult and even the forming of a simple shape is expensive. Thus, the use of electroconductive ceramic tools in this research is proposed. The electroconductive ceramic tools can be formed by electrical discharge machining methods (e.g., wire and die milling electric discharge machining methods). Therefore, the shape of a metal mold can easily be molded. Using an electroconductive ceramic as a plastic forming tool, a high drawability was confirmed and dry deep drawing of 10,000 times was achieved. The surface roughness of a dry deep drawing cup was as large as that of a non-dry (oil) deep drawing cup.

Key words: dry cylindrical cup drawing, electroconductive ceramics, cold-rolled steel sheets, tribology, surface roughness

1. はじめに

地球環境保護の観点から、塑性加工で使用されている潤滑剤および加工後の洗浄にともなう廃液が問題となっており、洗浄の簡易化や環境に負荷の少ない潤滑技術の開発が急務となっている。この対策の一つとして、潤滑剤を全く使用しない無潤滑絞り加工、すなわち、ドライプレス加工への期待が大きくなりつつある^{1),2)}。

ドライ加工実現の可能性として、塑性加工用工具にドライボロジー特性に優れたセラミックスの適用が考えられる^{3)~8)}。これまでの研究において、セラミックスを塑性加工用工具として用い、ドライ加工を実現させることが検討され、十分実用化のレベルに達していることが確認されている^{9)~13)}。しかし、従来から用いられているセラミックスは、加工性が悪く、複雑な形状の成形が難しく、また、単純な形状であっても加工に大きなコストがかかる。この問題が解決されない限り塑性加工用工具としての実用化は難しいといわざるを得ない。

本研究では、セラミックスの加工性を改善するために、形彫り放電加工やワイヤ放電加工等の放電加工で加工の行

える導電性セラミックスを塑性加工用工具に適用し、ドライプレス加工の可能性について検討する。また、塑性加工用工具に適用する際の放電加工性についての検討も加える。

2. 実験方法及び実験条件

2.1 限界絞り比測定

限界絞り比測定試験は、100kN 絞り加工試験機を用いた。本試験では、加工速度は、5mm/s とし、しわ抑え力は、2.9kN とした。**Fig.1** に金型の概略図を示す。金型寸法は、ダイス内径を 30.0mm、肩半径を 3mm とし、パンチ外径を 28.4mm、肩半径を 3mm とした。

ダイス材質には、導電性セラミックスとしてジルコニア系（日本タングステン製 NPZ-28）とアルミナ系（日本タングステン製 NPA-2）の 2 種類を用い、比較のために、従来のセラミックスとしてジルコニア（ ZrO_2 ）を、通常の合金工具鋼として SKD11 を用いた。なお、導電性セラミックス

Fig.1 Schematic figure of cup formation

* 東京都立産業技術研究センター 〒115-8586 東京都北区西が丘 3-13-10
Tokyo Metropolitan Industrial Technology Research Institute
3-13-10, Nishigaoka, Kita-ku, Tokyo 115-8586, Japan

** 湘南工科大学 〒251-8511 藤沢市辻堂西海岸 1-1-25
Shonan Institute of Technology

1-1-25, Nishikaigan, Tsujido, Fujisawa-shi, Kanagawa 251-8511, Japan

*** 日本タングステン(株) 〒841-0203 佐賀県三養基郡基山町大字園部 3173-2
Nippon Tungsten Co., LTD
3173-2, Oaza-sonobe, Kiyama-cho, Miyaki-gun, Saga 841-0203, Japan

NPZ-28の主成分は、 ZrO_2 とWCであり、混合割合はvol%でそれぞれ50%である。NPA-2の主成分は、 Al_2O_3 とTiCであり、混合割合はwt%で70%、30%である。物理的特性をTable 1に示す。また、セラミックスダイスの場合、加工による破壊を防止するために二重リング焼きばめ方式とし、約1.0%の締め代で作成した。しわ抑え板、パンチの材質には、SKD11を用いた。これらの表面粗さは $0.2\mu mRz$ としたが、NPZ-28は、研磨前の状態($6.6\mu mRz$)および研磨後の状態($1.2\mu mRz$)で評価を行った。なお、しわ抑え板にはSKD11を用いるため、しわ抑え板と被加工材との間の摩擦の影響を取り除くために、両者の間にリング状に切り抜いたポリエチレンフィルムを挿入して試験を行った。

潤滑条件としては、Table 2に示すように、(a)アセトンによる被加工材の超音波洗浄、(b)被加工材に新たに潤滑剤を塗布しない無潤滑、および(c)従来の加工との比較のための油潤滑とした。また、被加工材は、板厚0.6mmの冷間圧延鋼板(SPPC)とした。潤滑油は、日本工作油製G-3173(添加剤：硫黄、動粘度： $25mm^2/sec$ 、 $40^\circ C$)を用いた。

限界絞り比を求めることによって、絞り性を評価した。なお、限界絞り比(L.D.R.)は、同一条件で、同一寸法のブランクを5枚ずつ絞り加工し、全数破壊することなく絞れた最大の絞り比である。

Table 1 Physical characteristic of materials

	Density / $g \cdot cm^{-3}$	Hardness / HRA	Transverse rupture strength / MPa	Young's modulus / GPa
NPZ-28	10.70	92.5	2,000	330
NPA-2	4.24	94.0	835	392

Table 2 Lubrication condition of deep drawing

	Item	Detailed explanation
a	degrease	The ultrasonic cleaning is done with the acetone.
b	without lubricant	The lubricant is not spread.
c	with lubricant	The lubricant is spread.

2.2 加工力測定

加工力測定試験は、2.1の限界絞り比測定試験と同様に100kN絞り加工試験機を用いた。加工速度は、5mm/sとし、しわ抑え力は、2.9kNとした。ダイス材質には、NPZ-28研磨後とSKD11を用いた。潤滑条件は、Table 2(b)と同様に被加工材に新たに潤滑剤を塗布しない無潤滑とした。

加工力の評価は、 $\phi 50mm$ の被加工材を5枚絞り加工し、その時の加工力(最大パンチ力)の平均値より行った。また、成形品表面粗さおよび顕微鏡観察による評価も行った。

2.3 連続絞り加工

(1)絞りダイスの放電加工条件 連続絞り加工で用いる

NPZ-28を放電加工する際の最適な条件を検討する。そこで、試験片(NPZ-28)を5通りの電気条件で加工を行い、その時の加工速度と表面粗さを評価する。

Table 3に放電加工の電気条件を示す。Fig.2に放電加工の電気条件による加工速度および表面粗さを示す。なお、電極には純銅(C1100)を使用した。

条件①、②は粗加工の条件であり、加工速度は速いが、加工後の表面粗さは非常に粗くなった。対して、条件③、④、⑤は仕上げ加工の条件であり、加工速度は遅いが、加工後の表面粗さは非常に小さな値を示した。

以上の結果から、粗加工では条件②を用いる。条件①では加工速度が速いためチッピング等の欠陥につながる可能性がある。また、仕上げ加工では、加工後の表面粗さが最も小さかった条件⑤を用いる。

Table 3 Electric condition of electrical discharge machining

Condition number	①	②	③	④	⑤
Polarity	+	+	+	+	-
Electric condition	Current peak / A	10	5	1	1.5
	Pulse width / μsec	97.0	29.9	4.9	1.7
Machining time / min	5	5	10	10	10

Fig.2 Relationship between working speed and surface roughness by EDM conditions

(2)連続絞り金型 Fig.3に連続絞り金型の概略図を示す。Fig.4に連続絞り金型の外観写真を示す。金型寸法は、ダイ

Fig.3 Schematic figure of continuous cup formation

ス内径を 26.6mm, 肩半径を 3mm とし, パンチ外径を 25.0mm, 肩半径を 3mm とした. 絞り比は, 2.0 とした.

工具材質には, 絞りダイスとしわ抑えに NPZ-28 を用い, パンチに SKD11 を用いた. NPZ-28 ダイスは二重リング焼きばめ方式とし, 締め代を約 0.3% とした. なお, NPZ-28 ダイスは, 2.3(1)に示す電気条件により放電加工を行った. 放電加工が完了した時点での NPZ-28 ダイスの表面粗さは, $4.1 \mu\text{mRz}$ であった. 放電加工後に研磨を行った NPZ-28 ダイスの表面粗さは $0.2 \mu\text{mRz}$ とし, しわ抑えおよびパンチの表面粗さは $0.2 \mu\text{mRz}$ とした.

比較のために, ダイス材質が SKD11 のダイスを用いる. SKD11 ダイスの表面粗さは $0.2 \mu\text{mRz}$ とした.

Fig.4 Photograph of metal mold

(3)連続絞り加工試験 連続絞り加工試験は, 100kN.AC サーボ式試験機を用い, NPZ-28 ダイスでの 1 万回の連続絞り加工を行った. 加工はフランジを有しない抜き落としとした. 金型表面性状は, 放電加工後研磨無しの状態 (表面粗さ $4.1 \mu\text{mRz}$) とした. 潤滑条件は, 潤滑剤の塗布をしない無潤滑とした. また, 比較のために, 放電加工後研磨有りの状態 (表面粗さ $0.2 \mu\text{mRz}$) の NPZ-28 ダイスで, 30 回の無潤滑連続絞り加工を行った.

次に, SKD11 ダイスを油潤滑条件下で, 500 回の連続絞り加工を行い, 導電性セラミックス工具を用いた無潤滑絞り加工との比較を行った. 潤滑油は, 日本工作油製 G-3173 を用いた.

被加工材は, 板厚 0.6mm の SPCC とした. 評価は, 成形品表面粗さ・顕微鏡観察および金型表面性状により行った.

3. 実験結果および考察

3.1 限界絞り比測定結果

Fig.5 に各ダイス材質での(a)洗浄後, (b)無潤滑, および (c)油潤滑による限界絞り比測定結果を示す.

洗浄後の限界絞り比は, NPZ-28 研磨後が 2.18 と最も高く, 次いで NPA-2 研磨後が 2.01, ZrO_2 が 1.90, SKD11 と NPZ-28 研磨前が 1.73 であった. また, 無潤滑条件下の限界絞り比においても, 洗浄後と同様の結果を得た. ここで注目すべき点は, NPZ-28 研磨後の無潤滑条件下での限界絞り比が, 従来の加工法である油潤滑条件下の SKD11 と同等の結果を示した点である. すなわち, NPZ-28 研磨後は, 洗浄後の条件にもかかわらず, 同じ条件の他の工具の限界絞り比に比べて高い絞り性を示すとともに, さらに, SKD11 で潤滑油を用いた条件とも遜色ない値となり, これらはドライ加工の可能性を示唆したと言える.

ここで, ジルコニア系導電性セラミックス NPZ-28 が, 従来のジルコニアセラミックス ZrO_2 よりも限界絞り比が高くなった原因を検討する. NPZ-28 研磨後と ZrO_2 の表面顕微鏡写真を Fig.6 に示す. また, NPZ-28 研磨後の SEM 画像を Fig.7 に示す.

Fig.6 より, ZrO_2 のような従来のセラミックスは, 多数のボイドが観察されるが, ZrO_2 と WC の混合物である NPZ-28 には, ほとんどボイドが存在せず, 平滑な面になっていることが分かる. なお, 研磨には, #1,000 の研磨紙を用いた. また, Fig.7 より, ZrO_2 と WC が極めて均一に分散されていると共に, 研磨による脱粒は殆ど観察されない. このことから, NPZ-28 はボイドが極めて少ないために被加工材の残存が少なく, それにより凝着が抑えられたと推察される.

Fig.5 Limiting drawing ratio in each die condition

Fig.6 Micrograph of ceramics (NPZ-28 and ZrO_2)

Fig.7 SEM image of NPZ-28 surface

3.2 加工力測定結果

φ50mm のブランクを用いて加工力を測定した結果を Table 4 に示す。Table 4 より, NPZ-28 研磨後での加工力は, 15.8kN であり, SKD11 での加工力は, 20.1kN であることが分かる。このように加工力に大きな差が生じた原因は, 被加工材とダイスの間の摩擦および凝着等によるものであると考えられる。すなわち, SKD11 に比べ NPZ-28 のトライボ特性が優れており, 摩擦が小さくなったと考えられる。

Fig.8 に NPZ-28 研磨後を用いた場合と SKD11 を用いた場合の成形品外観写真と顕微鏡写真を示す。図より, NPZ-28 研磨後では, SKD11 で見られるような縦方向の凝着によると思われる引っかき傷はほとんど見られず, また, 成形品表面粗さの測定結果からも, NPZ-28 研磨後は SKD11 に比べ非常に低い値を示した。成形品表面粗さ測定は, 成形品側面中央部付近を円周方向に測定した。これらの結果から, SKD11 に比べ NPZ-28 のトライボ特性が優れており, 摩擦が小さくなったことが裏付けられる。

以上のように, 同じ寸法の被加工材を絞り加工した際の NPZ-28 研磨後の加工力が著しく低いこと, また, 加工後の表面粗さの測定結果から NPZ-28 研磨後の工具を用いた場合には, 凝着による引っかき傷がほとんど発生しないことから, NPZ-28 研磨後のトライボ特性が優れていることが確認できる。また, 3.1 の限界絞り比測定試験において, NPZ-28 研磨後が SKD11 に比べ高い絞り性を示したことは, この NPZ-28 の優れたトライボ特性に起因すると言える。

Table 4 Punch load at dry deep drawing (Blank φ50mm)

	Punch load / kN
NPZ-28 die after lapping	15.8
SKD11 die	20.1

	Photograph	Micrograph
NPZ-28 die after lapping
	Surface roughness : 3.41 μ mRz	
SKD11 die
	Surface roughness : 8.59 μ mRz	

Fig.8 Photograph and micrograph of dry deep drawing cup (Blank φ50mm)

3.3 連続絞り加工結果

Fig.9 に, φ50mm のブランクを被加工材として研磨前の NPZ-28 ダイス (4.1 μmRz) を用いた連続絞り加工による成形品表面粗さの推移を示す。加工開始から 30 回程度までは, 成形品表面粗さは 4.0~4.5 μmRz 程度で推移していた。しかし, その後は 3.0~3.5 μmRz 程度の間で安定して推移した。この原因としては, 30 回程度まではダイス表面粗さ (4.1 μmRz) が転写され, 成形品表面粗さが 4.0 μmRz 程度の粗さになったと考えられる。また, 加工回数が増えるとダイスの粗さがこすられることにより平坦化され, それに伴い成形品表面粗さも低減したと考えられる。このことは, 加工前のダイス表面粗さは 4.1 μmRz であったが, 1

Fig.9 Surface roughness of deep drawing cup by NPZ-28 die before lapping (4.1 μmRz)

Fig.10 Surface roughness of deep drawing cup by NPZ-28 die after lapping (0.2 μmRz)

Fig.11 Surface roughness of deep drawing cup by SKD11 die with lubricant

万回の加工後は $3.4 \mu\text{mRz}$ と加工前の表面粗さに比べて滑らかになっていたことから裏付けられる。

次に、Fig.10 に研磨後の NPZ-28 ダイス ($0.2 \mu\text{mRz}$) を用いた連続絞り加工による成形品表面粗さの推移を示す。成形品表面粗さは、最初の数回にばらつきは見られるが、早い段階から $2.4 \sim 2.8 \mu\text{mRz}$ の範囲内で安定して推移していることが分かる。この結果より、ダイス表面粗さが $4.1 \mu\text{mRz}$ では成形品表面粗さが $3.0 \sim 3.5 \mu\text{mRz}$ 程度となるが、ダイス表面粗さが $0.2 \mu\text{mRz}$ では成形品表面粗さが $2.4 \sim 2.8 \mu\text{mRz}$ 程度と非常に低い値となることが確認された。

Fig.11 に油潤滑条件下で SKD11 ダイスを用いた連続絞り加工による成形品表面粗さの推移を示す。従来の加工法である SKD11 ダイスを油潤滑条件下で使用した場合、成形品表面粗さは、 $3.0 \sim 4.0 \mu\text{mRz}$ 程度で推移することが分かる。

また、Fig.12 に加工 1 回目の成形品外観写真および顕微鏡写真を示す。Fig.12 には、研磨前の NPZ-28 ダイスを用いた場合、研磨後の NPZ-28 ダイスを用いた場合、および油潤滑条件下の SKD11 ダイスを用いた場合を示す。写真より、研磨前の NPZ-28 ダイスによるものは、縦方向の傷が多数見られ、表面粗さは $4.2 \mu\text{mRz}$ であった。これに対して、研磨後の NPZ-28 ダイスによるものは、ほとんど傷がなく、表面粗さ $2.7 \mu\text{mRz}$ と、滑らかな表面性状が得られていた。また、油潤滑条件下の SKD11 ダイスによるものは、縦方向の傷は比較的少なかったが、油によるミクロプール (顕微鏡写真の黒い部分) 形成の影響で表面粗さは $3.5 \mu\text{mRz}$ となっていた。なお、研磨前の NPZ-28 ダイスによるものは、Fig.9 に示したように加工回数 30 回を越えると表面粗さは $3.0 \sim 3.5 \mu\text{mRz}$ 程度になり、油潤滑条件下の SKD11 ダイスによるものとはほぼ同等となる。

以上の連続絞り加工結果から、無潤滑条件下での NPZ-28 ダイスは、潤滑剤を一切使用しない厳しい加工条件であるにもかかわらず、油潤滑条件下での SKD11 ダイスと同等以上の成形品表面性状を得られることが確認された。

4. まとめ

- (1) 導電性セラミックス (NPZ-28) は、冷間圧延鋼板 (SPCC) の 1 万回無潤滑円筒絞り加工において、油潤滑条件下の SKD11 と同等以上の良好な結果を示した。成形品表面粗さは、 $3.0 \sim 3.5 \mu\text{mRz}$ で安定した結果を得た。
- (2) 導電性セラミックス (NPZ-28) は、放電加工後、研磨加工を施すことなく、無潤滑絞り加工に利用できることが確認された。
- (3) 導電性セラミックス (NPZ-28) を用いることで、複雑形状の金型であっても放電加工により容易に加工が行える可能性が示された。
- (4) 以上の結果より、加工性に優れる導電性セラミックス工具を用いた無潤滑絞り加工の実用化の可能性が示唆されたと言える。

最後に、本研究にご協力いただいた東京電機大学卒研究生中島正嗣氏に、また潤滑剤をご提供いただいた日本工作油 (株) 木村茂樹氏にお礼申し上げます。

Fig.12 Photograph and micrograph of deep drawing cup

参 考 文 献

- 1) 片岡征二：トライボロジスト, **46-7** (2001), 509-515.
- 2) 片岡征二：塑性と加工, **43-492** (2002), 3-10.
- 3) 佐藤悌介：同上, **40-459** (1999), 311-315.
- 4) 堂田邦明：同上, **43-493** (2002), 96-100.
- 5) Buckley, D. H. & Miyoshi, K. : Wear, **100** (1984), 333-353.
- 6) Miyoshi, K. : ibid., **141** (1990), 35-44.
- 7) 平塚健一・菅原淳：トライボロジスト, **34-11** (1989), 799-806.
- 8) 榎本明弘・平塚健一・笹田直：同上, **36-1** (1991), 51-56.
- 9) 片岡征二・加藤光吉・佐々木武三・基昭夫：材料試験技術, **45-4** (2000), 31-37.
- 10) 基昭夫・佐々木武三・片岡征二・加藤光吉：同上, **46-4** (2001), 50-54.
- 11) 玉置賢次・片岡征二・基昭夫・伊藤達彦：同上, **47-4** (2002), 36-41.
- 12) 片岡征二・基昭夫・玉置賢次：塑性と加工, **46-528** (2005), 52-57.
- 13) Kataoka, S., Murakawa, M., Aizawa, T. & Ike, H. : Surface and Coating Technology, **177-178** (2004), 582-590.