

ダイヤモンドの塑性加工工具への適用

日本工業大学 工学部 機械工学科

教授 古閑伸裕

(平成 21 年度一般研究開発助成 AF-2009002)

キーワード：ダイヤモンド，PCD，工具，シェービング，深絞り，無潤滑

1. 緒言

アルミニウム板やステンレス鋼板のせん断や深絞りなどの塑性（プレス）加工においては，被加工材のパンチやダイなど金型工具への凝着が発生しやすく，これがせん断切口面や深絞り成形品表面粗さの悪化を招く原因になる場合が多い．この対策として，DLC やダイヤモンドをコーティングした硬質膜被膜工具の利用^{1) 2)}がある．これら被膜工具の利用は被加工材の凝着防止に大きな効果をもたらす．条件によってはドライ加工の可能性も期待できる技術として注目を集めている³⁾．しかし，これら硬質膜は膜厚が 1～5 μm 程度の薄膜であり，基材との密着力が不十分であるため，大きな力が作用するプレス金型工具へこれら硬質膜コーティングを適用すると，比較的早期に膜の摩耗や剥離が生じるため再コーティングが必要となる．さらに，より現実的な問題として，金型工具は切削工具に比べ高価であり，通常は使い捨てができない．このため再コーティングを行う期間は生産が中断されるという重大な問題が発生する．このような理由から，現状においては塑性加工に用いられる様々な金型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，非鉄金属の切削工具においては，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．また，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，ボロンをドーブした板状の導電性 CVD ダイヤモンド⁵⁾への注目が集まっている．すなわち，ダイヤモンドを工具として用いる場合，従来はその加工に膨大な時間と労力を強いられていたが，放電加工が行えるダイヤモンドが利用できれば，比較的低コストでダイヤモンド製工具の製作が可能になる⁶⁾．したが

って，これらダイヤモンド工具においても上記硬質膜被覆工具と同様の効果が得られれば，硬質膜被覆工具を用いる場合の問題の解決が期待できる．

塑性加工の分野では，古くから引抜き（線引き）用ダイとして天然ダイヤモンドや焼結ダイヤモンドが利用⁷⁾されているが，その他の塑性加工工具への適用はほとんど見当たらない．この最大の理由は 3 次元的な複雑形状にダイヤモンドを成形しなければならないことであり，これが放電加工による成形により可能になれば，ダイヤモンドの工具への適用範囲は大きく拡大できると考えられる．

本研究では，放電加工による成形が可能なダイヤモンドの塑性加工工具としての適用性を評価するための特性調査試験を行う．そしてこれら試験の結果を基に，代表的な板材成形法である深絞り加工におけるダイヤモンド製工具の有効性や実用性を評価検討する．

2. ダイヤモンド特性調査試験

ダイヤモンドを塑性加工工具として用いる場合には，
(1)被加工材との親和性や摩擦摩耗特性の調査，さらには，
(2)工具材料の靱性に関する調査などが必要である．そこで，(1)の調査をボールオンディスクタイプの摩擦磨耗試験を用いて行い，(2)に関する調査を断続的な切削加工であるシェービング実験により行うこととする．

2.1 摩擦摩耗試験

A5052-O 製のアルミニウムボールを表 1 に示す 3 種類の板状の試験片上で 1 N の荷重負荷条件下で回転運動させる方法で摩擦摩耗試験を行う．表 1 中の試験片 A は比較のための超合金製の試験片である．B は導電性を有する Co をバインダとした多結晶ダイヤモンド（平均粒径：約 10 μm ）の焼結体（PCD）であり，C は CVD により成

形した導電性ダイヤモンド膜（厚さ：0.5mm）である。

それぞれの試験片について、回転数：60rpm、回転半径：2mm、回転回数：3000回、無潤滑の条件で摩擦摩耗試験を行った。この試験により得られた摩擦係数測定結果を図1に示す。超硬製の試験片Aでは試験開始直後から、摩擦係数が急激に増大する傾向が認められたが、BとCのダイヤモンド製試験片においては、いずれも0.1前後の低い摩擦係数の状態で試験終了時まで安定していた。試験後の試験片表面を観察した結果、図示はしないが、試験片Aにはアルミニウムの凝着物が顕著に認められたのに対し、BとC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。

表1 摩擦摩耗試験条件

試験片	材質	表面粗さ(μm)	サイズ(mm)
A:超硬	UXR25 (Misumi)	0.10mmRa 0.60mmRz	13×13×3
B:PCD	CTB-010 (Element Six)	0.07mmRa 0.40mmRz	11×11×0.5
C:CVD diamond	CVDITE-CDE (Element Six)	0.08mmRa 0.40mmRz	10×10×0.5

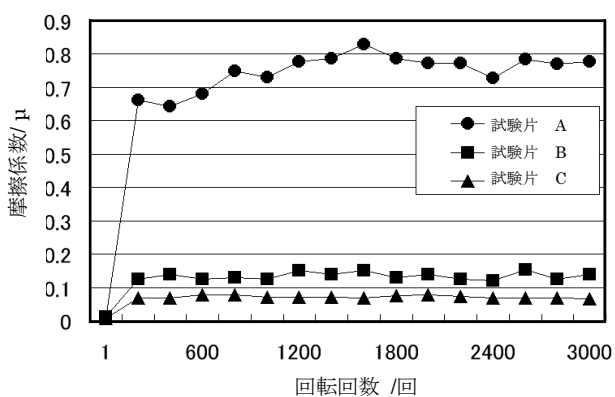


図1 摩擦摩耗試験結果

以上の観察結果から、上記のようにダイヤモンド試験片とアルミニウム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、アルミニウムのダイヤモンドへの凝着が防止できたためと推測される。

また、ステンレス硬球を用いた同様の試験を実施し、ダイヤモンド（PCD）の摩擦係数低減効果を確認した。

2.2 シェービング試験

塑性加工では一般に工具に断続的に大きな荷重が作用するため、これに耐えうる靱性を有する工具材料の選定が不可欠である。そこで、2.1節の試験で用いた試験片をロウ付けした工具により、図2に示すように、2×12×10mmの5052アルミニウム製角柱の端面を、削り代0.1mm、シェービング速度100mm/min、無潤滑の条件で断続的に1,000回のシェービング試験を行い、それぞれの工具の刃先や仕上げ面性状などを観察する。この場合、いずれの工具もすくい角8°、逃げ角7°、刃物角75°とする。

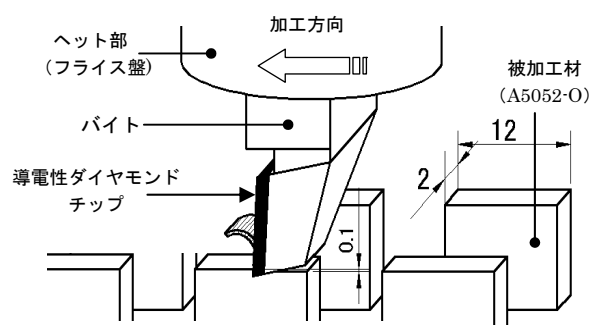


図2 シェービング試験概略図

図3に1,000回加工後の工具刃先性状を示す。いずれの工具刃先にもチッピングなどの発生は認められなかった。しかし、Aの超硬試験片をロウ付けした工具Aの場合は、刃先やすくい面にアルミニウムと思われる凝着物の発生が顕著に認められた。これに対し、工具Bや工具Cのダイヤモンド製工具にはこのような凝着物の発生はほとんど認められなかった。

シェービングされた切口面は、工具Aでは10回加工後頃から加工面の一部にうろこ状の破断面の発生が認められるようになり、1,000回加工後には図4(a)に示すように、加工面の全域がむしれ状態になり、シェービング方向に対し垂直な方向にも大きなかえりの発生が認められた。これに対し、工具Bと工具Cのダイヤモンド製工具により加工されたシェービング面は、同図(b), (c)に示すように、1,000回加工後においても平滑な仕上げ面が得られた。これは、被加工材と工具間の摩擦抵抗が工具Aに比べ低減し、切削機構により容易にシェービング屑の排出がなされたことに加え、断続的な加工を行ったにも関わらず工具

刃先にチッピングなどの工具不良が発生せず、刃先にアルミニウムが凝着し構成刃先を発生させることなく加工が行われたためと推測される。

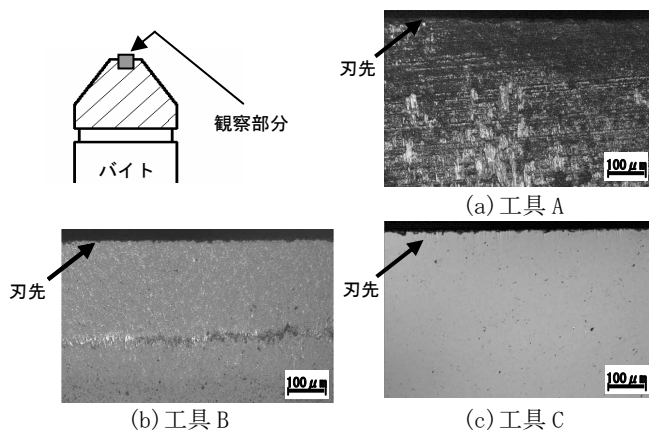


図3 1,000回シェービング加工後の工具刃先性状

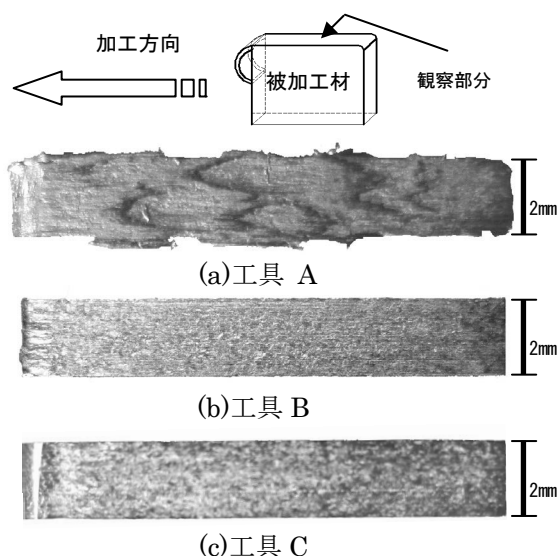


図4 1,000回加工後の被加工材シェーピング面

以上の結果から、本実験で用いたダイヤモンドは塑性加工工具に用いてもチッピングなどの工具不良が発生しない程度の靱性を有し、被加工材の凝着も防止できることから、塑性加工工具として利用できる見通しが得られた。

3. 深絞り加工実験

代表的な板材成形法である深絞り加工におけるダイヤモンド製工具の有効性や実用性を評価検討する。

3.1 単型による深絞り加工


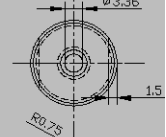

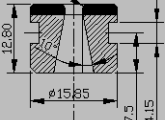
3.1.1 実験条件および方法

深絞り加工に用いるダイには、被加工材の変形を容易にするため、肩部には被加工材板厚の5倍程度の半径のアーチが設けられる。従って、ダイヤモンド製のダイを製作するためには、少なくともこのアーチ半径以上の厚みのダイヤモンド板が必要である。しかし現状においては、まだ深絞り工具として用いるに十分な厚みの導電性CVDダイヤモンドを入手することは困難である。そこで、本実験では、2mm厚の多結晶ダイヤモンド(PCD)を焼結したPCD製深絞り工具(ダイとしわ抑え)を製作し、これらPCD製工具の有効性を調査する。

まず、PCD製深絞り工具の成形性及びす効果を検査するため、表2に示す2種類の工具(ダイのみを表示)により、板厚 $t=0.15\text{mm}$ の5052アルミニウム合金板と、板厚 $t=0.1\text{mm}$ のSUS304ステンレス鋼板の限界絞り比を調査する。工具1は比較のためのSKD11製工具である。工具2は、超硬基材に厚み2mmのPCDを高温焼結により接合した円柱ブロックから、放電加工と研磨加工により製作した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 $D_p = \phi 3.0\text{mm}$ (パンチ先端アーチ半径 $R_p = 0.5\text{mm}$)とし、ダイ内径は $D_d = \phi 3.36$ (ダイ肩アーチ半径 $R_d = 0.75\text{mm}$)とする。これら工具により、直径の異なるそれぞれの円形の被加工材について無潤滑深絞り加工を行い、それぞれの工具を用いた場合の限界絞り比(LDR)を調査する。

図5に、上記工具をセットした深絞り金型(単型)の構造概略図を示す。この金型は、ダイヤモンド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隙間が保てるようにし、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、PCD製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。

表 2 工具 (ダイ) 条件

工具	外観	表面粗さ	工具寸法図
工具 1 (SKD11)		0.09 μ mRa 0.50 μ mRz	
工具 2 (PCD)		0.07 μ mRa 0.50 μ mRz	

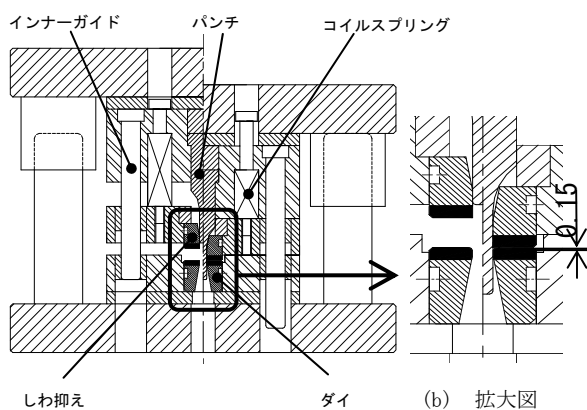


図 5 金型 (単型) 構造概略図

3.1.2 実験結果および考察

(a) アルミニウム合金板

表 3 に限界絞り比 (LDR) 調査結果を示す。工具 1 の場合の LDR は 1.91 であったのに対し、工具 2 を用いると LDR が 1.95 まで上昇した。これは 2.1 節の摩擦係数測定の結果からも分かるように、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測される。

表 3 限界絞り比の調査結果

	1.90	1.91	1.92	1.93	1.94	1.95	1.96
工具 1	○	○	×	—	—	—	—
工具 2	○	○	○	○	○	○	×

(b) ステンレス鋼板

ステンレス鋼板の加工においても、表 4 に示すように、工具 1 の場合の LDR は 2.13 であり、工具 2 では LDR が 2.18 まで上昇する結果が得られた。

アルミニウム合金板だけでなく、難加工材の一つとされ

ているステンレス鋼板の深絞り加工においても、PCD 製工具の有効性が確認された。

表 4 限界絞り比の調査結果

	2.12	2.13	2.14	2.15	2.16	2.17	2.18	2.19
工具 1	○	○	×	—	—	—	—	—
工具 2	○	○	○	○	○	○	○	×

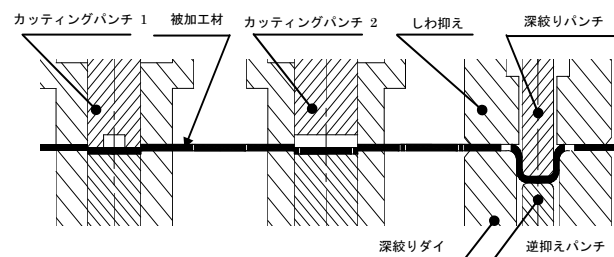
3.2 順送型による深絞り加工

3.2.1 実験条件および方法

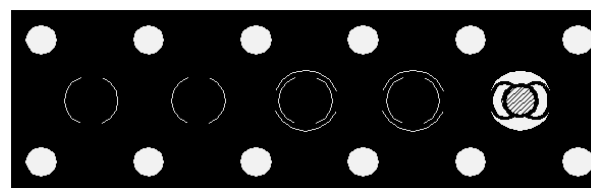
円形の被加工材を用いた単型による加工では、より多くの加工回数による評価が難しいこと、さらには円形の被加工材のセッティングや成形品の取り出しなどに時間を要するため、加工ストローク数が大きく設定できないことから発熱の影響が把握し難いことなど、実用的な評価が行えないことが懸念される。

そこで、図 6 に示すような行程で連続深絞り加工が行える順送型 (プログレッシブ) を準備し、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い、PCD 製工具の実用性を評価する。

被加工材には、A5052 アルミニウム合金板と SUS304 ステンレス鋼板を用いる。それぞれの板材の板厚は 0.15mm (A5052)、0.1mm (SUS304) であり、板幅はいずれも 20mm とし、これを金型内に送りピッチ 10mm



(a) 加工工程



(b) 被加工材

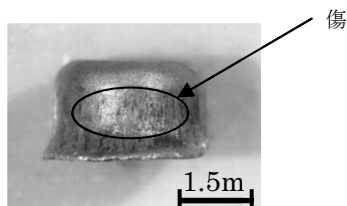
図 6 加工原理概略図

で順次送り込む。そして、曲率半径が異なる 2 種類の工具により 2 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 $D_p = \phi 3.0\text{mm}$ (パンチ先端アール半径 $R_p = 0.75\text{mm}$) のパンチと、内径 $D_d = \phi 3.36\text{mm}$ (ダイ肩アール半径 $R_d = 0.75\text{mm}$) のダイにより加工する。この場合の絞り比は $DR = 1.80$ であり、無潤滑で加工を行う。

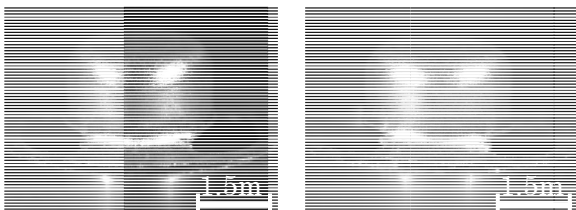
3.2.2 実験結果および考察

アルミニウム合金板とステンレス鋼板の無潤滑連続深絞り加工を行ったところ、SKD11 製工具 (工具 1) の場合は、図 7 (a) や図 8 (a) に示すように、少ない加工回数で成形品側壁部にすり傷の発生が認められた。これに対し、PCD 製工具 (工具 2) を用いた加工では、図 7 (c) や図 8 (b) に示すように、いずれの板材の成形においても 5,000 回目に得られた容器は、1 回目に得られた容器とほぼ変化のないものであることが判明した。また、図 9 に示す成形回数の増加に伴う成形品側壁部の表面粗さの変化からもわかるように、PCD 製工具を用いれば安定した加工が行われたことが理解できる。

ただし、5,000 回の加工後には、金型内の材料位置決め用の穴の打抜き加工に用いたパンチ (SKD11) には、被加工材の凝着や摩耗が顕著に認められた。すなわち、ダイヤモンド製工具による製品の加工を行う場合には、このような点を考慮した金型設計や生産技術の改善が必要になると思われる。

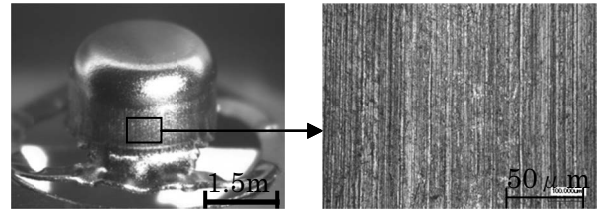


(a) SKD11 製工具により 150 回目に得られた容器

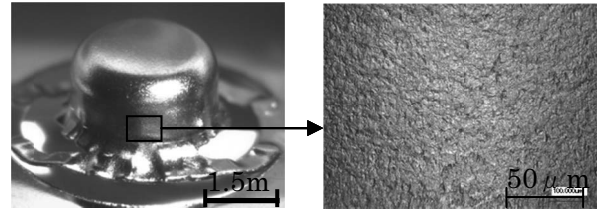


(b) PCD 製工具による加工 1 回目 (c) PCD 製工具による加工 5,000 回目

図 7 アルミニウム合金板の無潤滑深絞り加工により得られた成形品

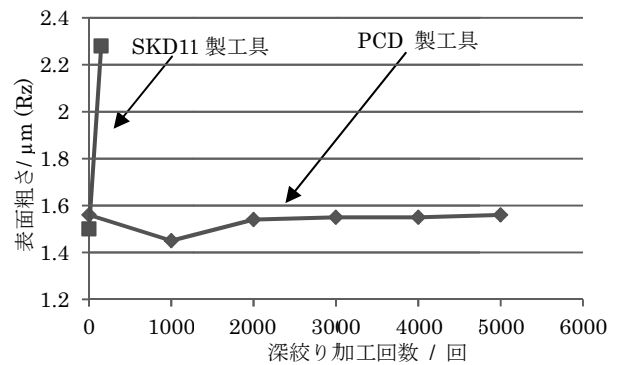


(a) SKD11 製工具による加工 30 回目 拡大図

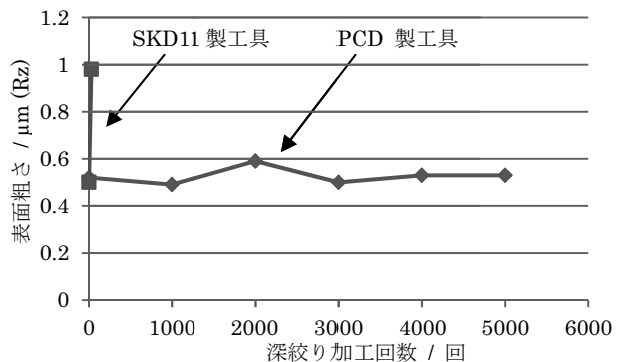


(b) PCD 製工具による加工 5,000 回目 拡大図

図 8 ステンレス鋼板の無潤滑深絞り加工により得られた成形品



(a) アルミニウム合金板



(b) ステンレス鋼板

図 9 表面粗さ測定結果

4. 結 言

放電加工が可能なダイヤモンドの塑性加工工具への適用性を評価するため、摩擦摩耗試験、シェービング試験、そして深絞り加工実験を行った。その成果を以下にまとめる。

- 1) 摩擦摩耗試験の結果から、多結晶ダイヤモンド焼結体 (PCD) やボロンをドーブした板状の導電性 CVD ダイヤモンドは、DLC 膜やダイヤモンド膜と同様に、アルミニウムに対する摩擦係数は超硬や合金工具鋼に比べ大幅に低減できることが明らかになった。また、ステンレスに対しても、ダイヤモンド (PCD) の摩擦係数低減効果が確認された。
- 2) 断続的な切削を行うシェービング試験の結果より、いずれのダイヤモンドもこのような加工にも十分耐える靱性を有し、超硬工具に比べ被加工材の工具への凝着防止効果が高いことから、安定して良好な仕上げ面が得られることが明らかになった。
- 3) ダイヤモンド (PCD) 製のダイヤしわ抑えを用いた深絞り加工を行えば、アルミニウム合金板、ステンレス鋼板いずれの成形においても、鋼 (SKD11) 製工具に比べ限界絞り比が向上することが確認できた。
- 4) アルミニウム合金板とステンレス鋼板の深絞り加工において、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、5,000 回目に得られた成形品は初回成形品と同程度の精度を有しており、さらな

る加工も十分可能であることが明らかになり、ダイヤモンド工具の実用化の見通しが得られた。

謝辞

最後に、本研究の実験をお手伝いいただいた、日本工業大学大学院生の許 昌龍、薄 憲毅の両君、および卒研生の前戸貴裕に感謝する。

本研究は、財団法人天田金属加工機械技術振興財団の平成 21 年度一般研究開発助成を賜り実施したものであり、同財団に厚く御礼申し上げる。

参考文献

- 1) 古閑伸裕：塑性と加工，45-518 (2004)，158-161.
- 2) M.Murakawa,N.Koga,S.takeuchi：Transactions of the ASME,121 (1999),674-678.
- 3) 玉置賢次，片岡征二：プレス技術，47-3 (2009)，58-61.
- 4) 鈴木清，二ノ宮進一，岩井学：電気加工学会全国大会講演会論文集，(2009)，57-60.
- 5) 竹内貞雄，村石貴志：表面技術，61-3 (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，44-105 (2010)，17-24.
- 7) 日本塑性加工学会編：塑性加工技術シリーズ 6 引抜き加工，(1990)，51-53.