Review

N. Koga

焼結ダイヤモンドの塑性加工工具への適用技術

古閑　伸裕 *

1．まえがき

塑性加工におけるアブレシブ摩耗や凝着摩耗などによる工具寿命の低下や，これによる製品精度の悪化を防止または低減することは，同加工における永遠の課題である．これら課題の解決策の１つとして，TD 処理や窒化処理，硬質膜コーティングなどの表面処理法がある．これらはいずれも未処理工具に比べ工具の寿命向上は実現できるものの，切削工具のように使い捨てできない塑性加工工具の場合は，再処理のための時間や労力，再処理後に表面処理の効果が薄れるといった点が問題になる場合が多い．

さて，高硬度と耐凝着性を備えるダイヤモンドは，線引きダイなどに古くから用いられてきたが，工具製作の困難さやコストの観点からその用途は限られている．最近になって，放電加工による工具製作が可能な焼結ダイヤモンド（PCD：Sintered Polycrystalline Diamond）[1] が市販されるようになった．これが各種塑性加工工具として利用できれば，上記摩耗の問題が大幅に改善でき，メンテナンスフリー金型の実現などが期待できる．

本研究では，深絞り加工工具とせん断加工工具へのPCDの適用性を評価するとともに，各種材料の連続加工実験により、その実用性を評価する．

2．PCD の特性評価 [2), 3)]

各種加工において，工具と被加工材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，工具と被加工材間の摩擦係数が低減することで親和性が改善できれば，成形性の向上や工具寿命の向上が期待できる．

そこで，様々な加工において工具への凝着が問題となるアルミニウム合金（A5052）と，工具へのダメージが大きいとされるステンレス鋼（SUS304）について，**図１**に示すようなボールオンデスクタイプの摩擦摩耗試験機による評価を行った．

表１に示す３種類の試験片を準備し，それぞれについてA5052 製と SUS304 製のボールによる試験を行った。**図２**に，A5052 製ボールを用いた場合の摩擦係数測定結果を示す．PCD は CVD 法により成形した導電性ダイヤモンド厚膜（厚み：0.5mm）と同様に，試験終了時まで 0.1 程度の低い摩擦係数のままであることが判明した。また，SUS304 ボールを用いた試験においてもほぼ同様の結果が得られ，PCD のアルミニウムやステンレスに対する凝着防止効果が高いことが確認できた。

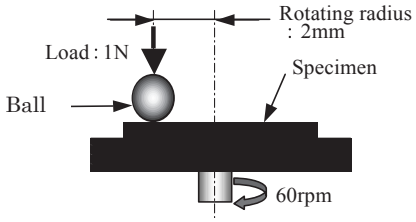


図１　摩擦摩耗試験の方法と条件

表１　摩擦摩耗試験を行った試験片

Specimen	Material	Surface roughness (μm)	Size (mm)
A: Carbide	UXR25 (Misumi)	Ra: 0.10 Ry: 0.60	13×13×3
B: PCD	CTB-010 (Element Six)	Ra: 0.07 Ry: 0.40	11×11×0.5
C: CVD diamond	CVDITE-CDE (Element Six)	Ra: 0.08 Ry: 0.40	10×10×0.5

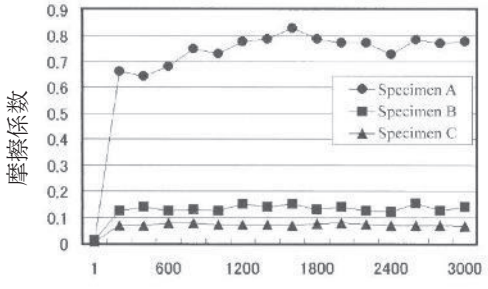


図２　摩擦摩耗試験における摩擦係数測定結果 (Ball：A5052)

3．深絞り加工工具への適用

3.1　実験条件および方法

前記実験において，PCD の優れた凝着防止効果が確認できたため，**図３**に示すような，PCD 製工具（ダイとしわ抑え）と比較のための SKD11 製工具による，アルミニウム合金板（A5052, t=0.15mm）とステンレス鋼板（SUS304, t=0.1mm）の無潤滑深絞り実験を行った．

* 日本工業大学工学部・機械工学科　教授

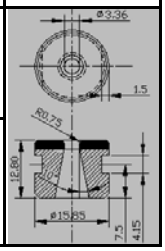
Tool	Photograph	Surface roughness	Dimensions of Tool 2
Tool 1 (SKD11)		0.09μmRa: 0.50μmRz	
Tool 2 (PCD)		0.07μmRa: 0.50μmRz	

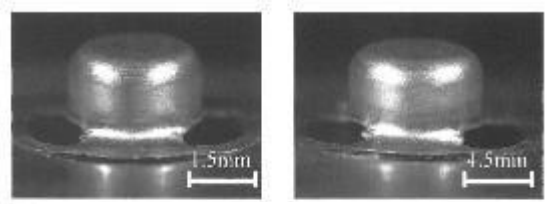
図３　深絞り加工実験に用いた工具
(SKD11, PCD 製ダイ)

3.2　実験結果および考察

(a) アルミニウム合金板 [2)]

まず, 外径 φ3.0mm のパンチ (先端アール半径 : 0.5mm) と内径 φ3.36mm のダイ (肩アール半径 : 0.75mm) を用い, 無潤滑深絞り加工における限界絞り比 (LDR) の調査を行った. その結果, SKD11 製工具の場合の LDR が 1.91 であったのに対し, PCD 製工具による加工では LDR が 1.95 まで向上した。

つぎに, 絞り比 1.80 の条件で無潤滑連続加工を行った. SKD11 製工具による加工においては, わずか数回の加工後にダイ肩アール部にアルミニウムと思われる凝着物が発生するようになり, これにより成形品側壁部には大きな擦り傷の発生が認められるようになった。これに対し, PCD 製工具による加工では, **図４**に示すように, 5,000 回の加工を行っても初回成形品とほとんど遜色の無い高精度の成形品が得られることが判明した。



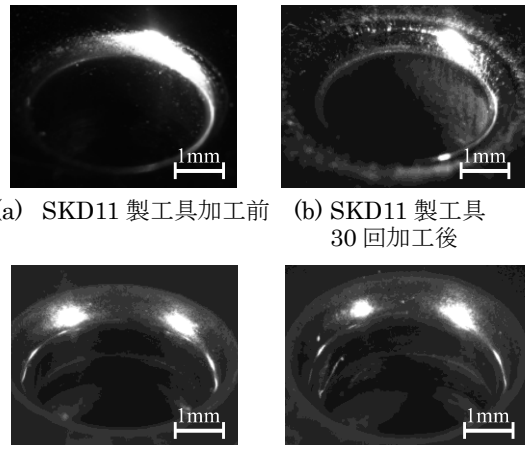
(a) 初回成形品　　(b) 5,000 回目の成形品

図４　PCD 製工具により得られた成形品
(被加工材 : A5052, t=0.15mm)

(b) ステンレス鋼板 [3)]

ステンレス鋼板の無潤滑深絞りにおいても, SKD11 製工具より PCD 製工具を用いた場合のほうが LDR が 0.5 程度向上することがわかった.

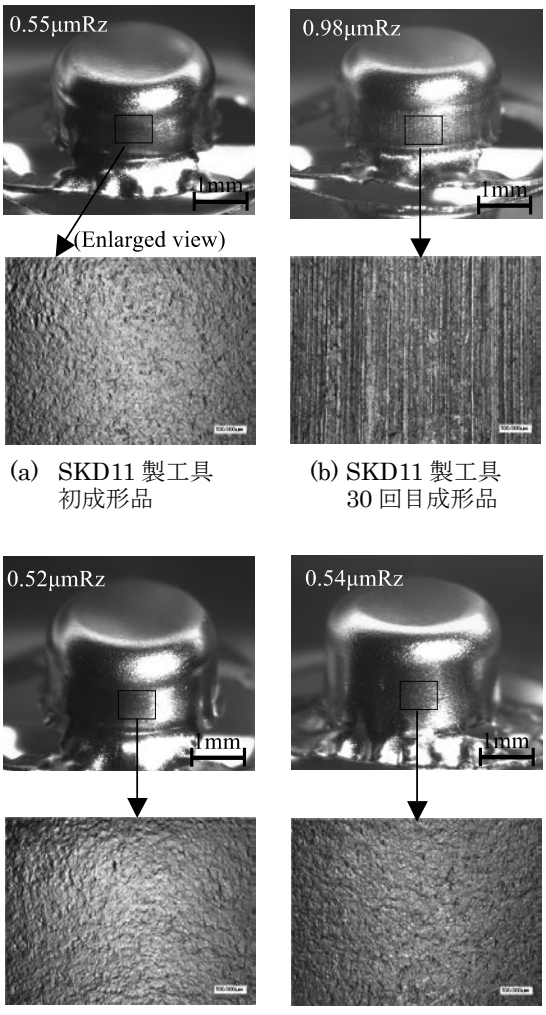
また, 無潤滑連続深絞り実験においては, SKD11 製工具ではわずか 30 回加工時点でダイ肩アール部に凝着が発生 (**図５**(b)) するようなり, 成形品の側壁部には加工方向に擦り傷が顕著に発生 (**図６**(b)) ようになった. これに対し、PCD 製工具は 5,000 回加工後 (図 5 (d)) も凝着の発生はほとんど認められなかった。このため, 5,000 回目に得られた成形品 (図 6 (d)) には擦り傷の発生は認められず, 初回成形品 (図 6 (c)) とほとんど変化のない良好な性状を有する成形品を得ることができた。



(a) SKD11 製工具加工前　(b) SKD11 製工具 30 回加工後

(c) PCD 製工具加工前　(d) PCD 製工具 5,000 回加工後

図５　加工前後のダイ肩アール部性状の比較
(被加工材 : SUS304, t=0.1mm)



(a) SKD11 製工具 初成形品　(b) SKD11 製工具 30 回目成形品

(c) PCD 製工具 初回成形品　(d) PCD 製工具 5,000 回目成形品

図６　SKD11 製工具と PCD 製工具により得られた成形品とその側壁部性状
(被加工材 : SUS304, t=0.1mm)

4．せん断加工工具への適用 [4)]

4.1　実験条件および方法

せん断加工においても，表面処理を施すことで工具の寿命が向上できる [5)] が，せん断工具の場合は刃先に大きな応力が作用するため，刃先近傍の数 μ の厚みの硬化層が加工初期に脱落し，表面処理の効果が十分に持続できないケースが多い．

そこで，**図７**に示すような被加工材板厚に近い厚みのバルク状の PCD を切り刃部にろう付けしたパンチとダイを用いることにより，大幅な工具の寿命向上が期待できる。

本研究では，板厚 t=1mm のアルミニウム合金板とステンレス鋼板の無潤滑連続打抜き実験を行い，PCD 製工具の有効性と実用性を調査する．

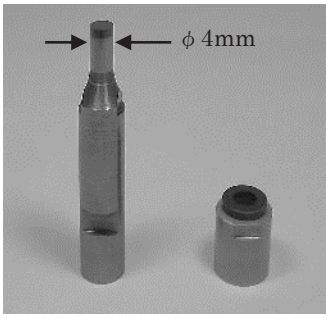


図７　PCD をろう付けしたパンチとダイ

本実験では，PCD のなかでも靭性に優れ，刃立性がよいとされる超微粉（平均粒径：0.5μm）の PCD を用いた工具（パンチ，ダイ）を用いた．アルミニウム合金板の打抜きでは外径ϕ3.9mm のパンチと穴径　ϕ4.0mm のダイ（クリアランス：C=5%t）を使用し，ステンレス鋼板の打抜きでは外径ϕ 4.0mm のパンチと穴径 ϕ 4.2mm のダイ（C=10%t）を用いる．工具端面の PCD の厚みは，基本的には被加工材の厚み（ t =1mm）にパンチとダイの下死点でのオーバーラップ量 (0.2mm) を加えた値以上であれば，被加工材の工具への凝着防止効果が発揮できると考えられる．そこで，いずれの材料の打抜きにおいても，パンチとダイの刃先部の PCD の厚みは 1.5mm とした．また，比較のため，PCD 製工具と同形状，同寸法の SKD11 製工具も準備し，同様の実験を行った．

表２　被加工材の化学成分と機械的性質

A5052-H18	Al	Fe	Si	Mn	Cr	Cu	Mg	Zn	-	-	-
	Bal	0.38	0.20	0.10	0.20	0.10	2.60	0.08	-	-	-
SUS304	Fe	C	Si	Mn	Cr	Cu	P	Ni	S	Mo	N
	Bal	0.05	0.04	1.0	18	0.20	0.03	8.0	0.03	0.10	0.03

Material	Thickness	Tensilestrength	Elongation	Hardness
A5052-H18	1mm	350Mpa	10%	HV101
SUS304	1mm	660Mpa	53.1%	HV170

実験にはサーボプレス（クランクモーション）を用い，アルミニウム合金板の打抜きでは 50spm，ステンレス鋼板の場合は 30spm のストローク数でそれぞれ加工を行う．この場合，いずれの場合も潤滑油の供給は一切行わないドライ加工とする．被加工材には，**表２**に化学成分と機械的性質を示すA5052 アルミニウム合金と SUS304 ステンレス鋼板（いずれも板厚 t=1.0mm）を用いる．

4.2　実験結果および考察

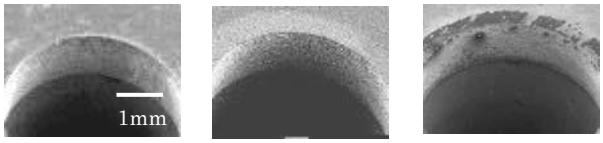
(a) アルミニウム合金板

まず，SKD11 製工具による打抜き実験を行い，2,000 回毎に工具性状と切口面の観察を行った．**図８**に加工前と 2,000 回，4,000 回打抜き後のパンチとダイの性状を示す．2,000 回加工後にはパンチ側面に部分的に被加工材と思われる凝着物の発生が認められるようになり，4,000 回加工後にはパンチ側面全周にわたり凝着物の発生が認められた．また，ダイ穴内面にも，パンチほどではないが，4,000 回加工後には部分的に凝着物の発生が認められた．

図９に打抜き１回目，2,000 回目，4,000 回目に得られたそれぞれの切口面性状を示す．打抜き加工中やストリッピング時にパンチ側面に接していた穴側切口面は，2,000 回目には１回目の切口面には存在していた破断面が認め

a-1) 加工前　　a-2) 2,000 回加工後　　a-3) 4,000 回加工後

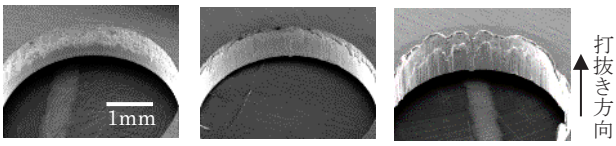
(a) パンチ刃先近傍の性状



b-1) 加工前　　b-2) 2,000 回加工後　　b-3) 4 ,000 回加工後

(b) ダイ刃先近傍の性状

図８　打抜き加工回数増加に伴う SKD11 製工具の性状変化（被加工材：A5052, t=1.0mm）



a-1) １回目　　a-2) 2,000 回目　　a-3) 4,000 回目

(a) 穴側切口面の性状

b-1) １回目　　b-2) 2,000 回目　　b-3) 4,000 回目

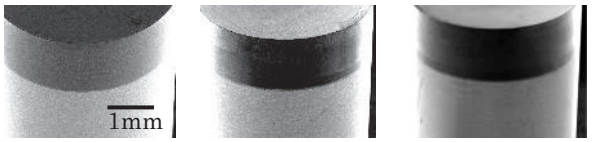
(a) 抜き落とし側切口面の性状

図９　SKD11 製工具による打抜きにより得られた切口面の変化（被加工材：A5052, t=1.0mm）

られなくなり，切口面のほぼ全域が削られたような切口面に変化した．そして，4,000 回目には凹凸の大きな切口面となり，打抜き方向に塑性ばり [5]と呼ばれる大きな突起物（かえり）の発生が認められるようになった．

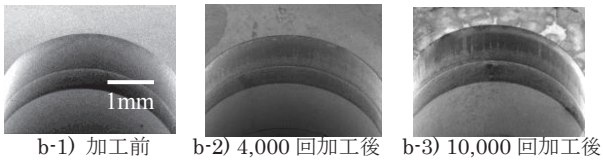
ダイ穴下方に抜き落とされる打抜き品の切口面は，4,000回目においても1回目に得られた切口面に比べてその性状が大きく変化する現象は認められなかった．このように穴側と抜き落とし側の切口面が大きく異なるのは，ダイ内面は抜き落とし品が下方に落下する際に接触するだけであるのに対し，パンチ側面はせん断加工中とストリッピング時のいずれのストローク域においても穴側材料の切口面と接触するためと考えられる．しかし，4,000 回後にはダイ側面にも凝着物の発生が認められるようになっていることから，さらに打抜き回数が増せば，抜き落とし側切口面も性状が悪化することが予測される．

つぎに，PCD 製工具による打抜き実験を行った．**図 10** に加工前，4,000 回および 10,000 回加工後のパンチとダイの性状を示す．10,000 回の連続打抜きを行ってもチッピングやろう付け部からの PCD の剥離などは発生しなかった．また，10,000 回加工後のダイ端面には打抜き時に発生したアルミニウムの粉が堆積したと思われる白化が認められたものの，パンチやダイの刃先や側面には被加工



a-1）加工前　a-2）4,000 回加工後　a-3）10,000 回加工後

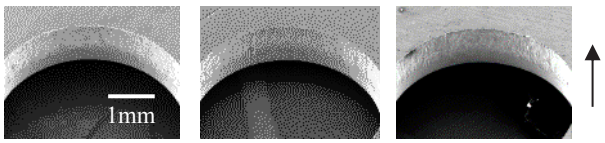
(a) パンチ刃先近傍の性状



b-1）加工前　b-2）4,000 回加工後　b-3）10,000 回加工後

(b) ダイ刃先近傍の性状

図 10　打抜き加工回数増加に伴う PCD 製工具の性状変化（被加工材：A5052, t=1.0mm）



a-1）1 回目　a-2）4,000 回目　a-3）10,000 回目

(a) 穴側切口面の性状

b-1）1 回目　b-2）4,000 回目　b-3）10,000 回目

(a) 抜き落とし側切口面の性状

図 11　PCD 製工具による打抜きにより得られた切口面の変化（被加工材：A5052, t=1.0mm）

材の凝着はほとんど認められなかった．また，刃先の摩耗もほとんど認められなかった．このため，**図 11** に示すように，4,000 回目や 10,000 回目に得られた穴側および抜き落とし側の切口面は，1 回目に得られた切口面に対し，ほとんど変化が認められず良好なものであった．また，PCD 製工具による打抜きでは，加工終了時までかえり高さの増大はほとんど認められなかった．

(b) ステンレス鋼板

鋼板の打抜きでは，アルミニウム合金板の場合に比べ工具に作用する衝撃力が大きくなるため，チッピングや PCD の基材からの剥離などの発生がより懸念される．

硬質膜コーテッド工具による鋼板の打抜き [5]では，刃先部分は加工早期に硬質膜が剥離するため，刃先の摩耗防止は困難であり，またコーテッド工具の利用により側面の摩耗の増大時期を遅らせることはできても，その根本的な解決策にはなり得ない．すなわち，上記工具不良が発生することなく PCD 製工具による鋼板の打抜きが可能になれば，アルミニウム合金板の打抜き以上にその利用価値が高まることは明白である．

ステンレス鋼板の打抜きにおいても，まず SKD11 製工具による実験を行った．**図 12** に加工前と 5 万回，10 万回打抜き後のそれぞれの工具刃先性状を示す．10 万回加工後には，加工中に被加工材の切口面と接触していたと思われる刃先から約 1.3mm のパンチ側面全周にわたり大きな摩耗が発生し，摩耗量の不均一により刃先輪郭の真円度が大きく悪化する現象が認められた．また，ダイもパンチほどではないが，側面摩耗の発生が認められた．これにより実質的にクリアランスが増大し，1 回目より 5 万回目や 10 万回目に得られた切口面のほうが破断面の切口面に占める割合が増加する傾向が認められた．また，加工回数が増すと，大きなかえりが局所的に発生する現象も認められるようになった．

つぎに PCD 製工具による 20 万回の連続打抜き加工を行った．加工終了時までチッピングや PCD の剥離などの工具不良の発生は一切認められなかった．**図 13** に加工前，10 万回および 20 万回加工後の工具性状を示す．10 万回

a-1）加工前　a-2）50,000 回加工後　a-3）100,000 回加工後

(a) パンチ刃先近傍の性状

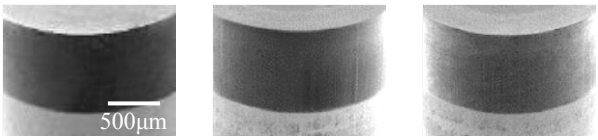
b-1）加工前　b-2）50,000 回加工後　b-3）100,000 回加工後

(b) ダイ刃先近傍の性状

図 12　打抜き加工回数増加に伴う SKD11 製工具の性状変化（被加工材：SUS304, t=1.0mm）

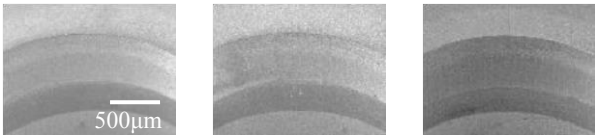
および 20 万回加工後にはパンチやダイの側面がわずかに変色する程度の変化が認められたが，刃先や側面の摩耗はほとんど認められなかった．

図 14 には 10 万回打抜き後の SKD11 製パンチと 20 万回打抜き後の PCD 製パンチのそれぞれの刃先の形状測定（先端アール半径 5 μ m のスタイラスにて測定）結果を示す．この結果からも PCD 製工具の顕著な耐摩耗性向上効果が確認された．



a-1) 加工前　a-2) 100,000 回加工後　a-3) 200,000 回加工後

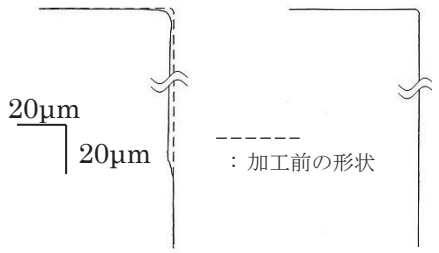
(a) パンチ刃先近傍の性状



b-1) 加工前　b-2) 100,000 回加工後　b-3) 200,000 回加工後

(b) ダイ刃先近傍の性状

図 13　打抜き加工回数増加に伴う PCD 製工具の性状変化（被加工材：SUS304, t=1.0mm）



(a) 10 万回打ち後の SKD11 製パンチ刃先形状　(b) 20 万回打ち後の PCD 製パンチ刃先形状

図 14　打抜き加工後のパンチ刃先輪郭形状の比較（被加工材：SUS304, t=1.0mm）

このように PCD 製工具は 20 万回の打抜き後もほとんど性状や形状の変化がないため，10 万回目や 20 万回目に得られた切口面も初回に得られたものとほとんど変化が認められなかった。

図 15 に加工回数の増加に伴う，穴側および抜き落とし側切口面のかえり高さの変化を示す．SKD11 製工具による打抜きでは，穴側，抜き落とし側いずれも 10 万回までかえり高さが増大する現象が認められた．これに対し，PCD 製工具の場合は，初回から 20 万回目までかえり高さの変化はほとんど認められず，11～12μm 程度の小さなかえりであった．この結果から，PCD 製工具による加工では，刃先がアール状またはテーパ状に摩耗することなく 20 万回まで安定した加工が行えたことが理解できる．

打抜き後の穴部平均内径と抜き落とし品平均外径の測定結果を**図 16** に示す．SKD11 製工具により得られた穴の内径や抜き落とし品の外径は，加工回数の増加とともに変化する現象が認められた．これに対し，PCD 製工具の場合は，20 万回目に得られたものでも初回打抜き品とほぼ同寸法であった．これらの結果から，PCD 製工具を用いれば，側面摩耗が大幅に低減または防止できるため，寸法精度の優れた打抜き品や穴あけ品が安定して得られることが判明した．

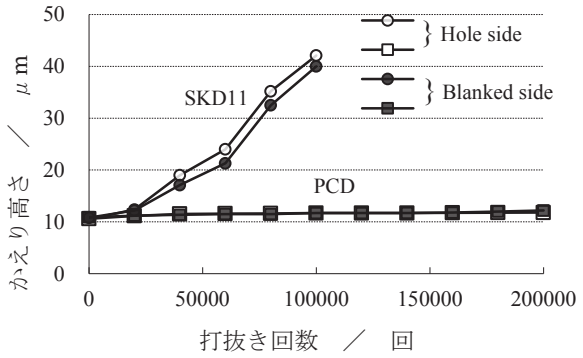


図 15　打抜き回数増加に伴うかえり高さの変化（SUS304, t=1.0mm）

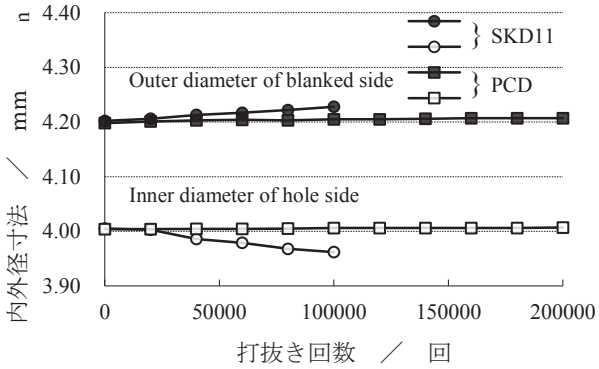


図 16　打抜き回数増加に伴う内外径寸法の変化（SUS304, t=1.0mm）

５．あとがき

深絞り加工工具とせん断加工工具への PCD 製工具の適用性を評価し，いずれの加工においても PCD 工具を用いると，工具の寿命が大幅に向上できることを明らかにした。

謝　辞

本研究は，公益財団法人天田財団からの一般研究開発助成により実施した研究に基づいていることを付記するとともに，同財団に感謝いたします．

参考文献

1) トーメイダイヤ(株) HP：http://www.tomeidiamond.co.jp/diasyouketu/DIAs.html
2) 古閑伸裕・許　昌龍：軽金属，61-3 (2011)，107-111.
3) 古閑伸裕・薄　憲毅・許　昌龍：塑性と加工，53-612 (2012)，74-78.
4) 古閑伸裕・姜　文赫・薄　憲毅：塑性と加工，54-628 (2013)，446-450.
5) 古閑伸裕：塑性と加工，45-518 (2004)，12-15.