

NACHI
**TECHNICAL
REPORT**
Machining

Vol. **20**A2
March/2010

マシニング事業

■ 寄稿・論文・報文・解説

「ダイヤモンドコーティングの
塑性加工への適用」

Application of CVD Diamond Films to Press Forming Tools

〈キーワード〉 ダイヤモンドコーティング・ドライ・表面粗さ・
摩擦特性・絞り加工・アルミニウム・SUS304

機械工具事業部／工具技術部／コーティング

高野 茂人 Shigeto TAKANO

東京都立産業技術研究センター／開発本部／開発第二部
先端加工グループ 副主任研究員

玉置 賢次 Kenji TAMAOKI

福井工業大学／工学部／機械工学科

教授 神田 一隆 Kazutaka KANDA

湘南工科大学／コンピュータデザイン学科

教授 片岡 征二 Seiji KATAOKA

株式会社 不二越



要 旨

世界的な地球環境保護の観点から、塑性加工を行なう現場でも環境負荷の少ない潤滑技術へのニーズが高まっている。プレス加工におけるドライ化もその一例といえよう。ダイヤモンド膜は機械的特性、化学的特性に優れ、ドライプレス加工を推しすすめるにあたって最適な物質である。ダイヤモンドコーティングの塑性加工への適用可能性を探るため、摩擦特性、限界絞り比に関する調査を行なったのち、アルミニウム合金、冷間圧延鋼板、およびステンレス鋼の連続絞り加工試験を実施した。その結果、ダイヤモンドコーティングを施した金型は、ドライ環境という厳しい条件のもと、いずれも優れた性能を示した。

Abstract

As the worldwide awareness on protection of the global environment has been increasing, the demand for a lubrication technology with lower environmental load is becoming high in plastic forming. One solution to this is dry press. A diamond film is excellent in mechanical and chemical characteristics and the optimal substance for dry press. To find out the applicability of diamond coating for plastic forming, the friction characteristics and limited drawing ratio are investigated. Then, progressive drawing tests were conducted on aluminum alloy, cold-rolled steel plate and stainless steel. The results indicated that all dies coated with diamond films showed excellent performances under the severe, dry environment.

1.ダイヤモンドコーティング 工具の適用拡大に向けて

ダイヤモンドは現存する物質の中で最高の硬度を持つことから、理想的な非鉄材料加工用の薄膜材料として切削工具への適用が図られてきた。この特徴を活かして、これまで、放電加工用電極に用いられるグラファイトなどのように工具摩耗の早い材料の加工、あるいは、高シリコンアルミニウム合金のようにマトリクス中に硬質材料を含む難削材の加工に威力を発揮してきた。また、最近では航空機産業で普及がすすんでいるカーボン繊維強化プラスチック(CFRP)の加工にも多用されはじめている。

一方、塑性加工の分野に目を向けてみると、ダイヤモンドコーティング工具の普及は、切削加工分野に比べてほとんどと言っていいほど進んでいない。しかし、近年の地球環境保護の観点から塑性加工の分野においても、加工時に用いられる潤滑剤や洗浄時に排出される廃液が問題となってきた。ダイヤモンドの高硬度かつ耐摩耗性に優れる特徴に加え、化学的に安定な性質を活かせば、ドライ環境下でのプレス加工¹⁾²⁾が可能になり、塑性加工分野へのダイヤモンドコーティングの適用が期待される。

そこで、アルミニウム合金、圧延鋼板、およびステンレス鋼を被加工材料とし、CVDダイヤモンド膜との摩擦特性およびダイヤモンドコーティング金型による限界絞り比について調査を行なうとともに、ダイヤモンドコーティング金型を用いてドライ絞り加工を行ない、その適用可能性を調査した。

2.CVDダイヤモンドの表面粗さと摩擦特性

1)ダイヤモンド膜の表面粗さの改善

現状、気相合成(CVD)法で合成されるダイヤモンドは多結晶体で表面粗さが悪く、そのままでは平滑な表面が要求される金型には適用できない。ダイヤモンド膜の表面粗さを向上させる手段としては、砥石を用いて機械的な研磨を施す方法が一般的であるが、CVDダイヤモンド膜の成膜時に原料ガス中の炭素原子数比(具体的には水素に対する炭化水素ガスの濃度)を変化させる方法でも解決できる³⁾。

今回、試験を開始するにあたり、メタン濃度を変化させて合成したダイヤモンド膜を作成したが、表面粗さは $0.6\mu\text{mRz}$ であったものの、摩擦係数は0.3という通常メタン濃度で作製したものと同程度の高い値を示した。そこで本研究では、粒度 $6\mu\text{m}$ のダイヤモンドパッドと仕上げ用の粒度 $1\mu\text{m}$ のダイヤモンドペーストを用いて機械的な研磨でダイヤモンド膜表面を平滑化した。

したがってダイヤモンド膜の合成は、熱フィラメント法により代表的な合成条件であるメタン/水素比1%を採用し、ガス圧30Torr、基板温度を $600\sim 900^\circ\text{C}$ の条件で行ない、膜厚は約 $10\mu\text{m}$ とした。

なお、金型材として一般的に用いられているSKD11などの鉄鋼材料は、ダイヤモンドとの密着度の点で相性が悪いため、ダイヤモンドコーティングの基材には切削工具で実績のある超硬合金を使用した。

2)ボールオンディスク試験機による摩擦摩耗試験⁴⁾

CVDダイヤモンド膜の表面粗さと摩擦特性の関係を調査するため、図1に示す摩擦試験機を用いて摩擦摩耗試験を行なった。本機では、固定した3つのボールと回転するディスクの摩擦面に垂直荷重を負荷することができる。試験は、垂直荷重100N、摺動速度 31mm/s 、摺動距離 50m とし、大気中にて無潤滑条件で行なった。また、相手材には $\phi 6\text{mm}$ のSUS304ボールを使用した。

図2は、CVDダイヤモンド膜の表面を $0.8\mu\text{mRz}$ 、 $0.5\mu\text{mRz}$ 、 $0.07\mu\text{mRz}$ まで段階的に研磨したもの、および研磨を施さない $1.5\mu\text{mRz}$ の計4種類の試料を用いて、表面粗さによって摩擦特性がどのように変わるかを示したものである。

試験開始直後から4種類のディスクで摩擦係数に違いがみられ、未研磨($1.5\mu\text{mRz}$)のもので0.4前後と、非常に高い値を示した。研磨を施した表面粗さ $0.8\mu\text{mRz}$ では0.15、表面粗さ $0.5\mu\text{mRz}$ では0.05、表面粗さ $0.07\mu\text{mRz}$ では0.04程度と表面粗さを小さくすればするほど摩擦係数が低くなり、また摩擦係数の振れ幅も小さく安定化する傾向がみられた。また、それぞれの表面粗さと摩擦係数について詳しくみると、表面粗さ $1.5\mu\text{mRz}$ から $0.5\mu\text{mRz}$ までは研磨することで劇的に摩擦係数が低下するが、 $0.5\mu\text{mRz}$ から $0.07\mu\text{mRz}$ の間では摩擦係数の差は極めて小さいことがわかる。つまりこれは、 $0.5\mu\text{mRz}$ まで研磨することで鏡面状態($0.07\mu\text{mRz}$)まで研磨した時とほぼ同等の摩擦係数が得られることを示している。この結果から、DVDダイヤモンド膜を金型に適用する際にどの程度の研磨面が必要かという点について重要な指針が得られた。

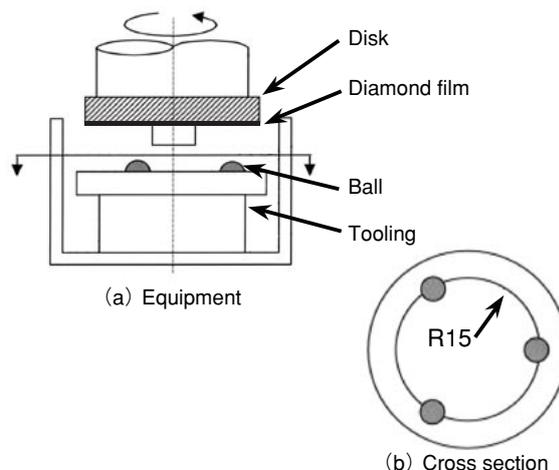


図1 摩擦試験概略図

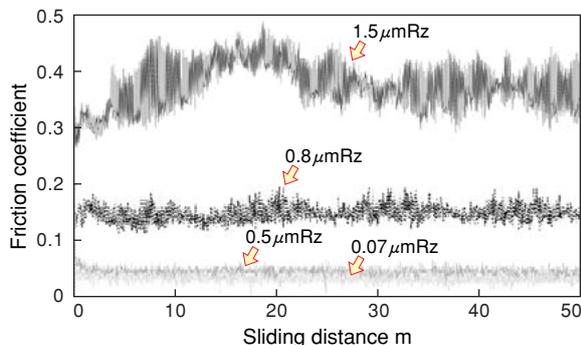


図2 ダイヤモンド膜の表面粗さによる摩擦係数の違い (相手材:SUS304)

3. 限界絞り比測定⁴⁾

金型加工の中でも、とくに絞り加工を行なう際にはどれほどの深絞りが可能なのかが問題となる。仮に、ドライ環境下でダイヤモンドコーティングを施した金型が有効となっても、絞り性が良くなければ、適用範囲は限られたものになってしまうであろう。

ここでは、ダイヤモンドコーティング金型の絞り性を測定するため、100kN絞り加工試験機を用いて限界絞り比の評価を行なった。本実験に用いた金型の概略図を図3に示すが、ダイス(図中⑦)にダイヤモンドコーティングした超合金を使用し、パンチ(同①)しわ押え(同②)にはSKD11を用いた構成となっている。

また、被加工材としては純アルミニウム板A1100P-O、冷間圧延鋼板SPCC、ステンレス鋼板SUS304の3種類を準備し、評価を行なった。板厚はいずれも0.6mmである。

図4に限界絞り比(L.D.R.)の測定結果を示す。従来の工具であるSKD11をダイスとして用いた場合、油潤滑下では全ての被加工材において限界絞り比2.0以上という高い値を示すが、アセトン中で超音波洗浄し、完全脱脂状態(ドライ)とした被加工材を用いると1.5~1.8程度まで低下してしまう。これに対して、ダイヤモンドコーティングダイスを用いた場合、ドライ環境下においても、コーティング後に研磨を施さないもの(表面粗さ $1.5\mu\text{mRz}$)で1.9前後を示し、さら

に表面粗さ $0.5\mu\text{mRz}$ まで研磨仕上げしたものを用いれば、SKD11工具の油潤滑下での値と同様、限界絞り比2.0を超える良好な絞り性が得られた。

図5~7は、限界絞り時の成形品表面性状である。図5は純アルミニウム板、図6は冷間圧延鋼板、図7はステンレス鋼板のものであり、各写真の左上に表面粗さが記載してある。(b) SKD11のドライ加工を除いて、いずれの被加工材においても表面粗さはおおむね $3\mu\text{mRz}$ 前後の値となった。すなわち、ドライ環境下でダイヤモンドダイスを用いても、油潤滑下でのSKD11ダイスと同等の成形品表面粗さを得ることができた。ただ、(a) SKD11の油潤滑 (c) ダイヤモンドの未研磨 ($1.5\mu\text{mRz}$) のドライ (d) ダイヤモンドの研磨 ($0.5\mu\text{mRz}$) のドライによる表面性状を比較すると (c) のダイヤモンドの未研磨 ($1.5\mu\text{mRz}$) のドライでの縦方向の細かい傷が目立つ。これは、ダイヤモンド膜の結晶の凹凸によるものとみられるが、表面粗さに大きな違いはなくとも成形品の表面性状に悪影響をおよぼすことが確認され、やはり研磨が必要不可欠であることが示された。

以上の限界絞り比測定結果から、ダイヤモンドをコーティングしたダイス、とくに表面粗さを $0.5\mu\text{mRz}$ まで研磨したものによるドライ絞り加工は、従来の加工であるSKD11工具による油潤滑絞り加工と同程度の限界絞り比および表面性状が得られることを確認した。

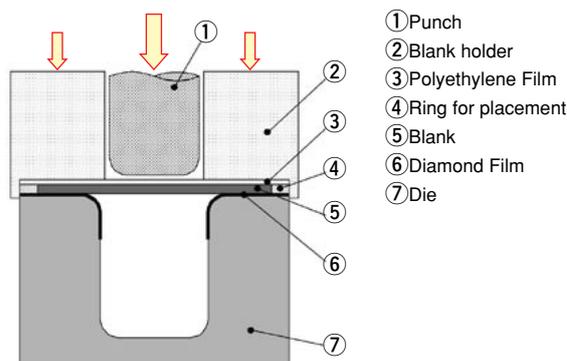


図3 絞り性評価用金型概略図

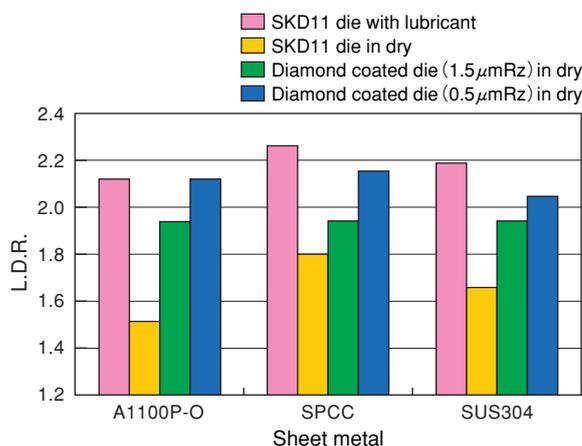


図4 限界絞り比測定結果

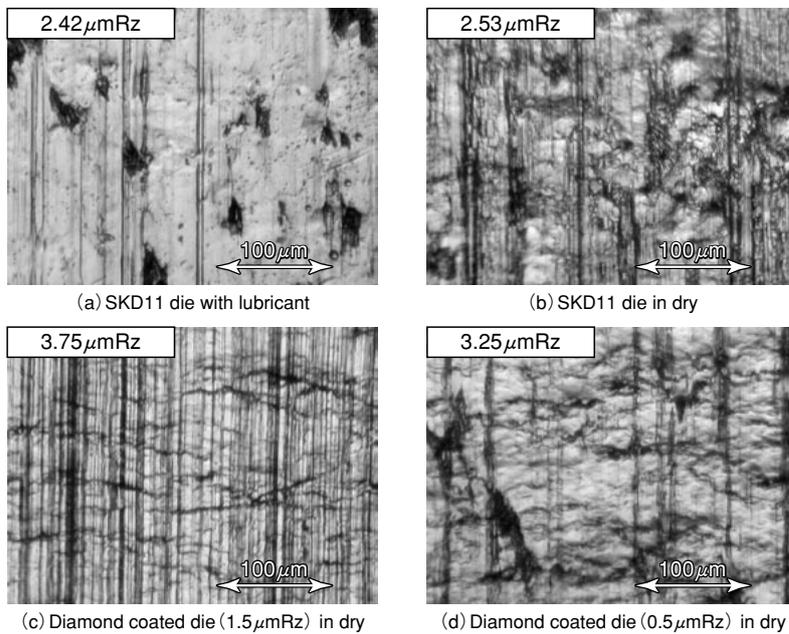


図5 限界絞り時の成形品表面写真(純アルミニウム板)

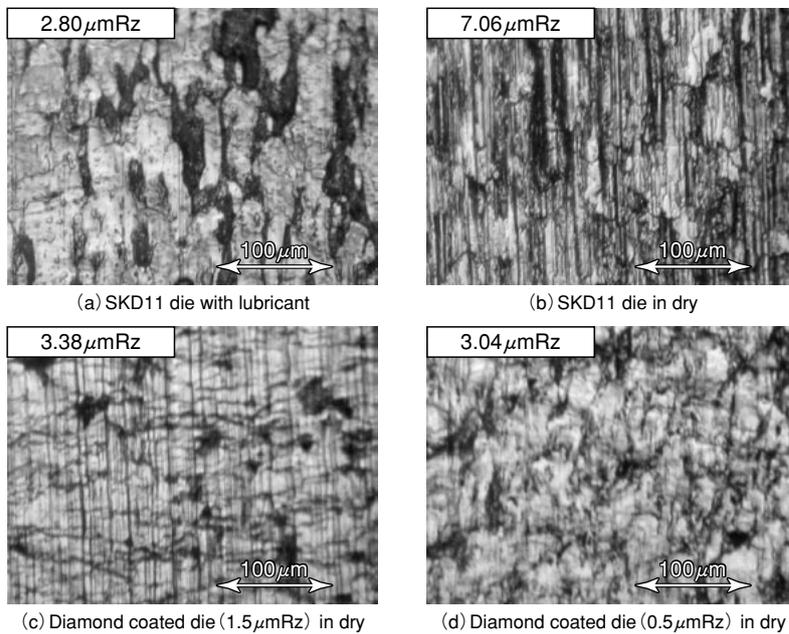


図6 限界絞り時の成形品表面写真(冷間圧延鋼板)

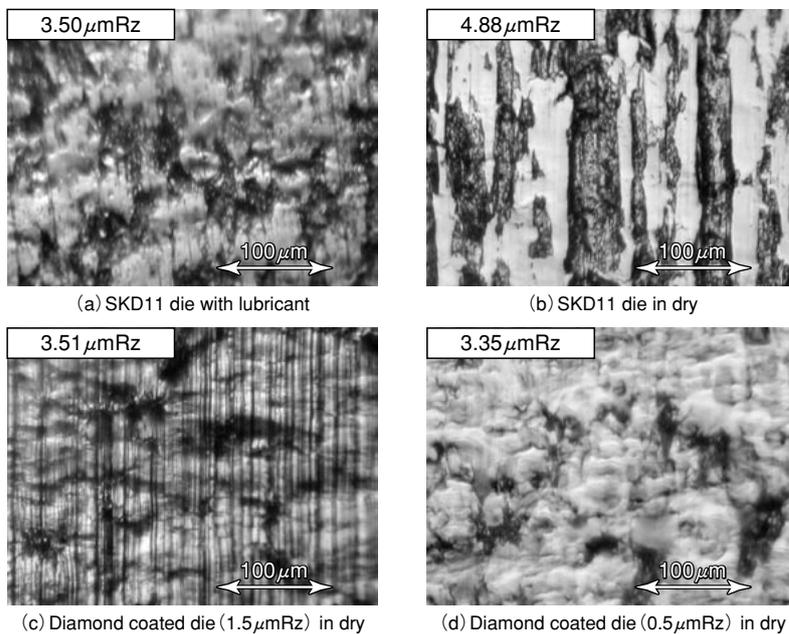


図7 限界絞り時の成形品表面写真(ステンレス鋼板)

4.ダイヤモンドコーティング金型によるドライ絞り加工

1) アルミニウムの連続絞り加工⁴⁾

切削加工でのダイヤモンドコーティング工具の対象ワークは非鉄系材料であり、もっとも代表的なのはアルミニウムである。ダイヤモンドコーティングを金型に適用するにあたり、その被加工材としては、まず切削加工分野でドライ加工の実績のあるアルミニウムについて検討した。

図8に連続絞り金型の概略図を示す。金型は抜き絞り方式で、金型条件はダイス内径26.8mm、ダイス肩半径3mm、パンチ直径25mm、パンチ肩半径3mmとし、絞り比は1.7である。ダイヤモンド膜は超硬合金製のダイス①およびしわ押え③にコーティングし、研磨により表面粗さ $0.46\mu\text{mRz}$ に仕上げた。加工機には、100kNサーボプレス機を用いた。

図9は板厚0.6mmの純アルミニウム板A1050P-Oを被加工材として連続ドライ絞り加工を行なった際の成形品表面粗さの推移である。表面粗さを $0.46\mu\text{mRz}$ まで研磨したダイヤモンドコーティング金型を用いて成形したものは、表面粗さ $2.0\mu\text{mRz}$ 程度で1万回まで安定して加工することができた。これに対して、コーティングを施さない超硬合金工具を用いた場合は、加工初品は $2.3\mu\text{mRz}$ と低い値であったが、加工回数の増加に伴って表面粗さの値が上昇し、10回目には $4.9\mu\text{mRz}$ と高い値を示し、成形品はダイスに焼き付いてしまった。

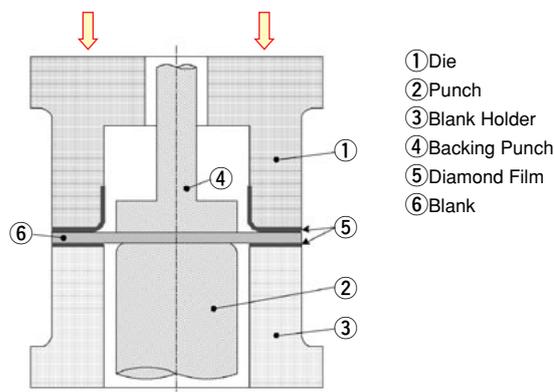


図8 連続絞り加工用金型概略図

図10は、1万回加工後のダイヤモンドコーティング金型および10回加工後の超硬金型の外観写真であるが、焼き付きを起こした超硬金型の方は、金型の肩半径部分に広範囲にわたって被加工材のアルミニウムが凝着していることが確認できた。これに対して、ダイヤモンドコーティング金型は1万回加工後にもかかわらず、被加工材のアルミニウムの凝着等も観察されず、加工前の状態とほとんど変わらなかった。

以上のことから、アルミニウムのドライ絞り加工においてダイヤモンド膜には十分な耐焼き付き性、および十分な耐久性があることが示されたといえよう。

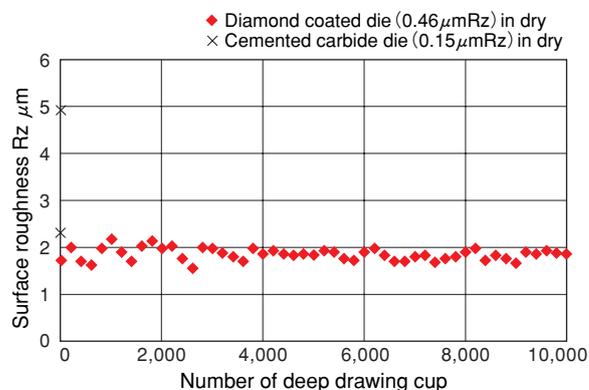
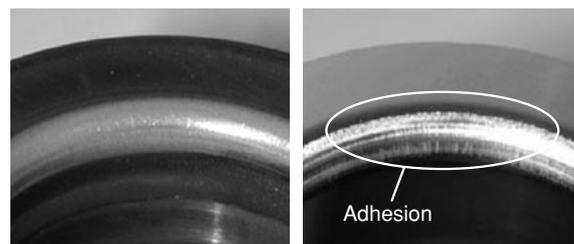


図9 アルミニウム連続絞り加工時の成形品表面粗さの推移



(a) Diamond coated die after 10,000 times

(b) Cemented carbide die after 10 times

図10 アルミニウム連続絞り加工後の金型外観写真

2) SUS304の連続絞り加工⁵⁾

切削分野では通常、ダイヤモンドコーティングを鉄系材料の加工に適用しようとはしない。加工時の温度上昇によりダイヤモンド、すなわち炭素が鉄に溶けてしまい、ダイヤモンドが持つ高い硬度や耐摩耗性など本来の特性を活かせないからである。

しかし、絞り加工の場合、切削加工ほどの温度上昇はないと見込まれるため、被加工材が鉄系材料の場合でもダイヤモンドコーティング金型が適用できる可能性がある。そこで、今度は被加工材を板厚0.3mmのSUS304に変えてアルミニウムと同様の連続絞り加工を行なった。

SUS304板厚が0.3mmと薄くなっているため、金型条件のうちパンチ直径を25.9mmに変更し、絞り比は1.64となっているが、その他の試験条件についてはアルミニウムの場合と同様である。

まず、従来の成形法である超硬金型に潤滑剤を塗布して加工した場合の成形品表面粗さの推移を図11に示す。このときの、成形品表面粗さは $0.3\mu\text{mRz}$ 程度でほぼ一定であり、加工回数500回まで安定な加工が可能であった。図11には同じ超硬金型を用

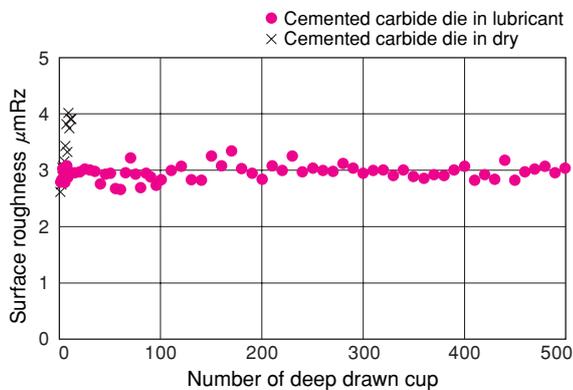


図11 超硬金型によるSUS304連続絞り加工時の成形品表面粗さの推移

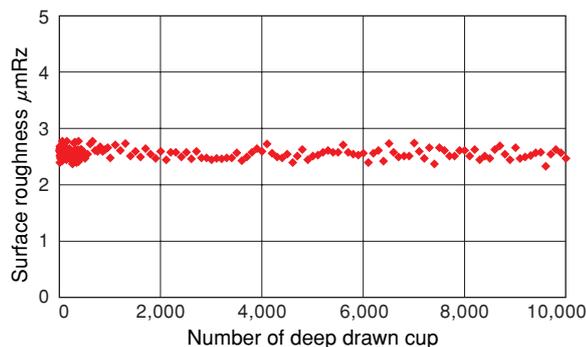


図12 ダイヤモンドコーティング金型によるSUS304連続絞り加工時の成形品表面粗さの推移

いてドライで加工した結果も併せて示しているが、油潤滑の無い状態では加工回数12回目で $4.0\mu\text{mRz}$ まで表面粗さが低下してしまい、加工を中止した。

これに対して、ダイヤモンドコーティング金型を用いたドライ絞り加工では、図12に示したように、加工回数1万回まで表面粗さ $2.5\mu\text{mRz}$ とほぼ一定に推移し、かつ油潤滑条件下で超硬金型を用いて成形したものよりもばらつきの小さい加工結果が得られた。それぞれの加工試験における最終段階での成形品外観写真および顕微鏡写真は図13のとおりである。

図14は超硬金型(絞りダイス)の加工前と12回ドライ絞り加工後の外観写真であるが、R部に凝着と思われる縦筋が複数確認された。一方、図15に示すダイヤモンド金型の加工前と加工後の外観写真では、1万回加工後にもかかわらず、ダイヤモンド膜の剥離およびダイヤモンド膜へのステンレスの凝着はまったくみられず、加工前とほとんど変わらない状態である。

以上より、被加工材がステンレス鋼板であってもダイヤモンド膜の耐久性、耐摩耗性は十分なレベルにあることが示された。

	Photograph	Micrograph
Diamond coated die in dry (cup 10,000)		
Surface roughness : $2.48\mu\text{mRz}$		
Cemented carbide die in dry (cup 12)		
Surface roughness : $3.91\mu\text{mRz}$		
Cemented carbide die with lubricant (cup 500)		
Surface roughness : $3.05\mu\text{mRz}$		

図13 成形品外観写真および顕微鏡写真

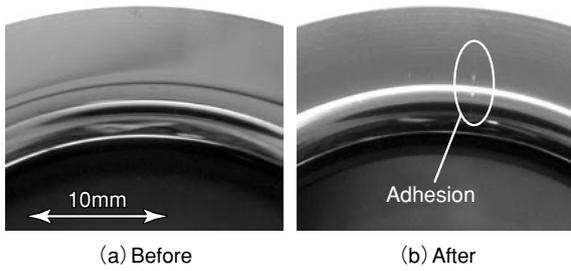


図14 SUS304連続絞り加工前後の金型外観写真
(超硬金型)

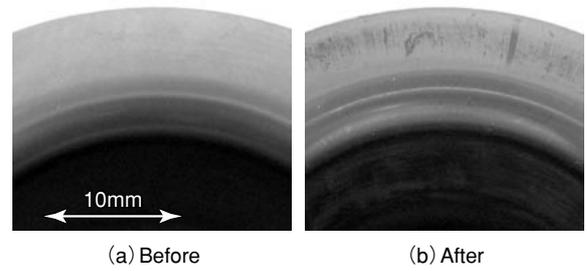


図15 SUS304連続絞り加工前後の金型外観写真
(ダイヤモンドコーティング金型)

5. ダイヤモンドコーティングのさらなる発展をめざして

ダイヤモンドコーティングの新たな用途展開として、塑性加工分野への適用について検討した。ダイヤモンドコーティングを用いる最大のメリットは、無潤滑すなわちドライ環境下でプレス加工が可能となる点であるが、今回の実験により、連続絞り加工のような厳しい環境下でも、十分な耐久性、耐摩耗性、耐焼付き性があることを確認できた。

とくに今回、鉄系材料であるSUSのドライ絞り加工においてもダイヤモンドコーティング金型の効果が認められたことは大きな収穫である。これまで、切削加

工の分野で非鉄系材料の加工に限定されていたダイヤモンドコーティングの用途や適用範囲が、塑性加工の分野で一気に広がる可能性が出てきたといえよう。

今後のダイヤモンド金型の本格的な普及には、ダイヤモンド膜の成膜域の拡大や効率的な研磨方法の確立など残された技術的課題はまだ多い。これらの課題をひとつひとつ解決しながら、ドライプレス化への道を開拓し、少しでも環境負荷の低減に寄与できるよう努めていく所存である。

参考文献

- 1) 片岡征二：トライボロジスト、46(7)、P.509～515(2001)
- 2) 片岡征二：塑性と加工、43(492)、P.3～10(2002)
- 3) 高野茂人・河上登：不二越技報、157(2)、P.9～16(2002)
- 4) 玉置賢次・片岡征二・神田一隆・高野茂人：材料試験技術、53(4)、P.247～253(2008)
- 5) 玉置賢次・片岡征二・神田一隆・高野茂人・寺西義一：材料試験技術、54(4)、P.227～231(2009)