

高硬度材微小穴あけ用の単結晶ダイヤモンド製マイクロドリルのレーザ加工技術の開発

中部大学 工学部 機械工学科
教授・鈴木 浩文
(平成 27 年度 一般研究開発助成 AF-2015212)

キーワード：マイクロドリル，単結晶ダイヤモンド，レーザ加工，高硬度材微小穴あけ，超硬合金

1. 研究の目的と背景

近年，一般のプリント基板やシャドーマスクなど微小な穴あけのニーズが増大している．また航空機や自動車用の CFRP 素材，SiC ウェハチャック，半導体プローブ，燃料電池，バイオ機器用超硬製微細金型などでは，高能率・高精度微小穴開けの要求が高まっている．

一方，主に超硬合金製のマイクロドリルの精密研削・研磨が可能となり，多数の穴あけが行われるようになった．しかし，超硬合金製のドリルでは摩耗が大きく寿命が十分でなかった．また，高速で穴あけを行うとドリルの損傷や破損が起りやすいため，穴あけ加工の能率には限界があった．またレーザを用いた方法やウオータージェットによる穴あけ法もあるが，アスペクト比の大きな深穴に対しては真直度と円筒度が劣るなどの問題がある．

超精密加工装置のアジア諸国への進出により，比較的容易にダイヤモンド砥石を用いた研削加工により高精度なマイクロ工具を加工することが可能となり始め，超硬合金製ドリルの分野における日本の優位は失われつつある．マイクロ工具自体の販売金額はさほど大きくないものの様々な先端的な分野（デジタル情報家電，自動車，航空機，エネルギー，光学部品）の性能を左右する基幹的な部品（キーパーツ）であり，その製造技術の優位性を保つことは業界全体の方向性を決定する重要なカギであるといえる．

これに対して，提案者らは以下に示すようなダイヤモンド製の工具の開発を提案した．ダイヤモンド工具には刃先に多結晶ダイヤモンドを用いたものや超硬材へダイヤモンド粒子を電着したもの，コーティングでダイヤモンドの薄膜を形成したものがある．しかし，粒子の欠落や耐摩耗性が低く工具寿命が短く，多結晶体であるために刃先をシャープエッジに形成できないなどの問題点を有している．また，単結晶ダイヤモンド加工技術を用いた工具の開発を行い，微細加工の技術は完成したが，単結晶ダイヤモンドを先端に用いた工具であっても，単結晶ダイヤモンドの任意の加工が充分でなく，刃先先端の切れ込み速度不足となり，また必要径と同径の結晶を軸に接合しているために微細工具径になると軸との接合面積が十分でなく，強度が非常に弱くなるという致命的欠陥があった．さらに，工具精度面においても，従来は軸への接合時に振れを取る方法を実施していることから，工具の精度および切り込みが十分ではなかった．

そこで本報告では，レーザ光を 3 次元走査することにより単結晶ダイヤモンド製マイクロドリルを微細加工し，単結晶ダイヤモンド製のマイクロドリルの試作評価を行い，超硬合金基板に対して微小穴あけ実験を

行ったので報告する．

2. レーザファブリケーションによる形状創成

切削加工や研削加工に代表される機械加工法では母性原理に基づいて形状が創成される．すなわち工具を工作機械で駆動し，その軌跡を工作物に転写して形状創成を行う（工具奇跡転写の原理に基づく）．それに対してレーザなどのビームにより形状を創成する場合は，研磨加工と同じく，滞留時間制御の原理に基づいて形状創成を行うものである．ビームの横方向の焦点位置は重要であるが，ビームに直行する方向の位置決めはそれほど重要ではない¹⁾．

レーザ光を被加工面に一定時間滞留させるとある一定の形状の単一加工痕（Footprint）が図 1 に示すように創成される．この加工量分布は次式で表される．

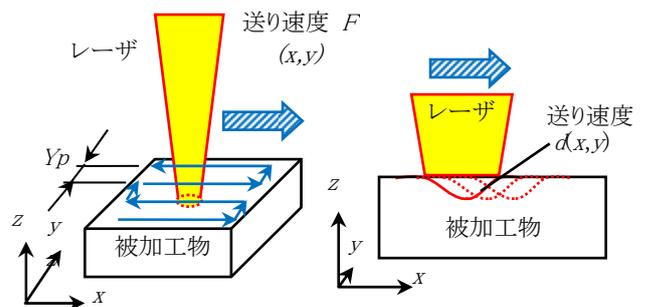
$$d=d(x,y) \quad (1)$$

この単一加工痕を被加工面上において走査すると被加工面は重畳積分（Convolution）の原理から次式で示される除去分布の加工が行われる．

$$\delta(x,y)=\iint d(u,v) \cdot T(x-u,y-v) du dv \quad (2)$$

ここで $\delta(x,y)$ は被加工面の加工前の形状と目標形状の差の分布に相当する．したがってこの積分を逆変換（De-convolution）することにより，被加工面の各々のポイントにどれくらい滞留すればよいか，すなわち単一加工痕の滞留時間（Dwell）の分布が計算できる．これを元に装置の各軸の動きを NC 制御し一つの面を加工することになる．実際にはレーザの滞留時間 $T(x,y)$ は各ポイント (x,y) における必要な走査速度 $V(x,y)$ は y 方向のピッチを Y_p とすると以下で表される．

$$V(x,y)=Y_p/T(x,y) \quad (3)$$



(a) レーザ走査 (b) 単一加工痕の重畳積分
図 1 レーザ走査による自由曲面の創成

最小単位の加工ツールであるレーザ光は被加工面上を
 做うだけであり平面や球面だけでなく自由曲面の加工
 をも容易に行うことができる。ただし、微小工具による
 形状修正研磨加工と同じように、レーザ光のスポット
 径が加工の最小単位となり、レーザ光のスポット径
 より小さな刃先アールは創成できない。

3. レーザ光による単結晶ダイヤモンド製工具の加工

単結晶ダイヤモンド製のドリルのマイクロファブリ
 ケーションプロセスを図2に示す。円柱状に研磨した
 単結晶ダイヤモンドを超硬製の円柱状シャンクにろう
 付けし、シャンクとの同軸度を確保しながら外周をレ
 ーザ加工する。次にレーザにより外周部の刃を加工し、
 ねじりを加えてツイストドリルの形状に創成する²⁾³⁾。

最後に先端をダイヤモンド砥石などで機械加工を行
 い、シャープな刃先を創成する。原理的にレーザ光の
 スポット径が刃先の最小アールとなる。レーザ加工で
 は基本的に尖った先端を創成することは困難であり、
 尖った刃の創成は機械加工に仕上げた。

単結晶ダイヤモンドの方位は軸方向が(111)面とな
 るようにした。上述のようにしてレーザビームを用い
 た三次元加工により試作した単結晶ダイヤモンド製の
 マイクロドリルのSEM写真を図3に示す。シャンク径
 はΦ3mm、工具径はΦ0.3mmである。

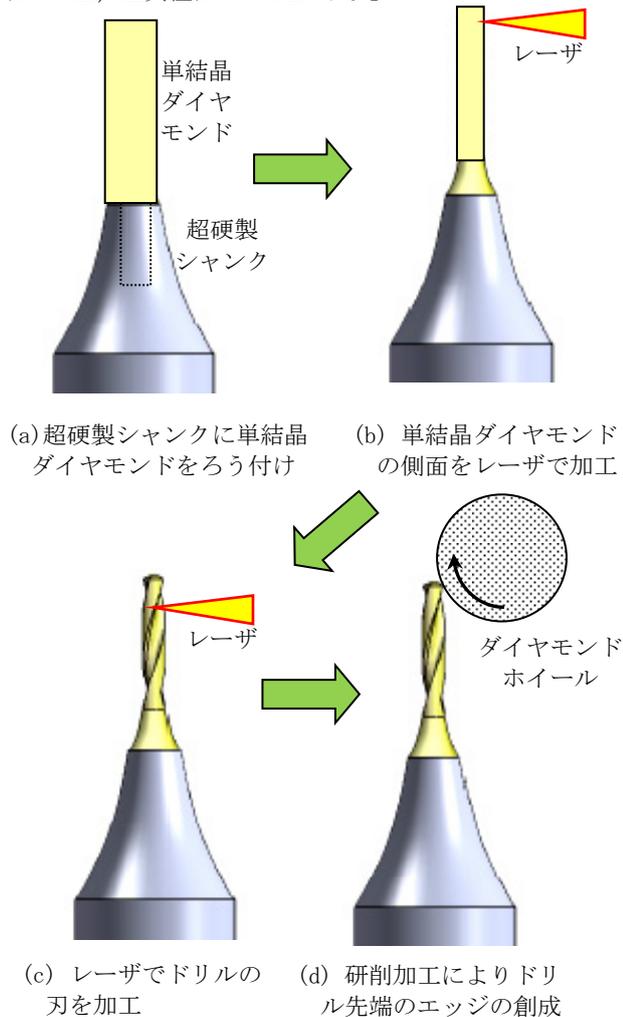


図2 単結晶ダイヤモンド製マイクロドリルのレーザ走
 査ファブリケーション

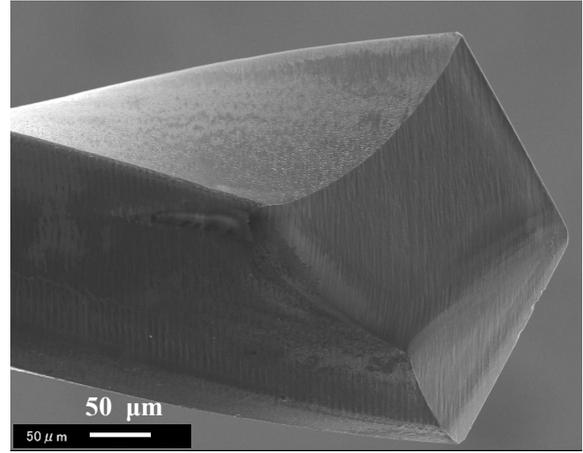


図3 試作した単結晶ダイヤモンド製のマイクロドリル
 の先端のSEM写真

4. 実験装置および実験方法

試作した単結晶ダイヤモンド製マイクロドリルを用
 いてバインダレス微粒子超硬合金超硬（日本タングス
 テン㈱製 RCCFN）の穴あけ実験を行った。実験の概要を
 図4に、外観を図5に示す。1nm分解能のリニアモータ
 駆動の超精密加工機 ULG-100D (SH3) を用いた。工具ス
 ピンドルは高速エアスピンドルであり、Z軸方向に切込
 んだ。まず、加工前のドリルでグラファイトカーボン
 板にプランジカットし、初期のドリル形状のレプリカを
 取り、超硬基板に穴をあけるたびにドリル形状のレ
 プリカを取り、摩耗によるドリル先端の形状の変化を
 加工実験度にレーザプローブ式形状測定器により計測
 し評価した。また、加工前後のドリル形状および穴形
 状もレーザプローブ式形状測定器により計測し評価した。

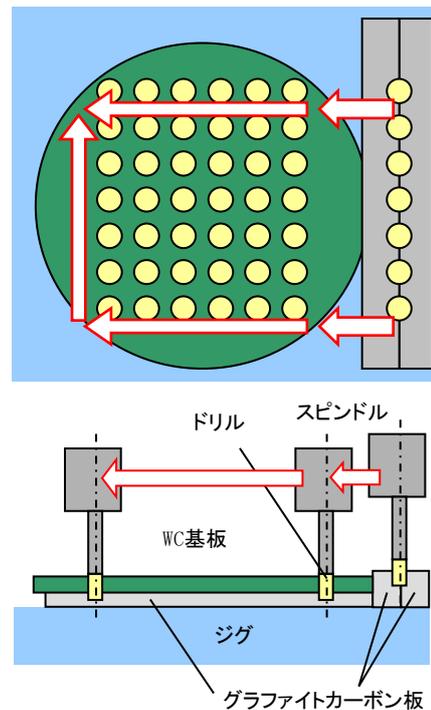


図4 穴あけ実験の手順

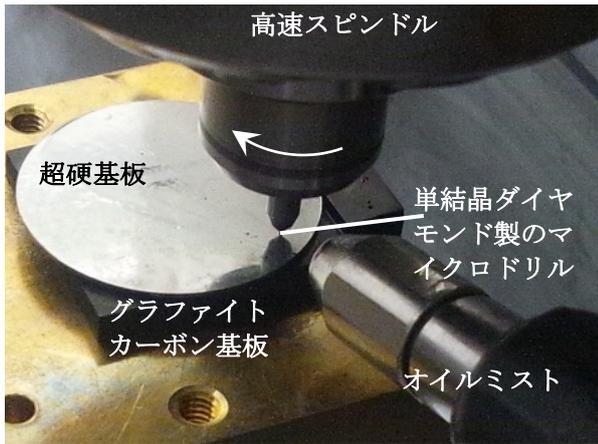


図5 穴あけ実験の外観

表1 穴あけ条件

ドリル	SCD
外径	Φ0.3 mm
回転数	40,000 min ⁻¹
工作物	バインダレス超硬
厚さ	1 mm
送り速度	2 mm/分
切込み量	0.1 mm/パス
クーラント	白灯油ミスト

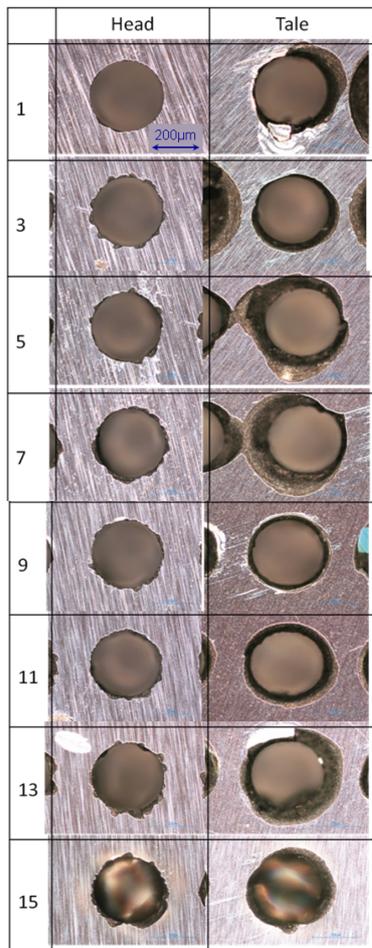


図6 超硬基板にあけられた穴の顕微鏡写真

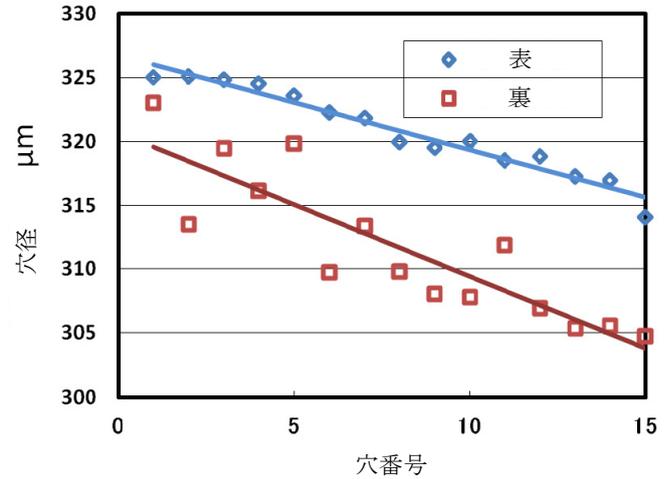


図7 超硬基板にあけられた穴径の変化 (表裏)

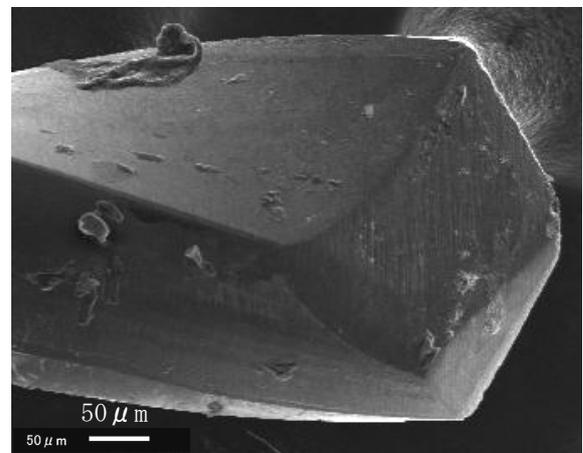


図8 15穴の穴あけ後の単結晶ダイヤモンド製マイクロドリルの先端のSEM写真

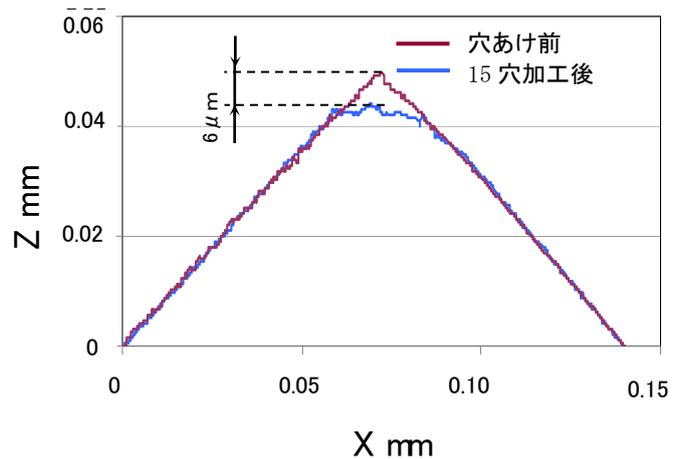


図9 工具摩耗による単結晶ダイヤモンド製ドリル先端の形状の変化

5. 穴あけ実験結果

5.1 ツイストドリルによる穴あけ実験の結果

厚さ1mmのバインダレス微粒子超合金基板に、図3に示す単結晶ダイヤモンドドリルにより穴あけ実験を行った。穴あけ条件を表1に示す。φ0.3mmのダイヤモ

ンド製のドリルをコレットチャックにより高速空気静圧スピンドルに固定し、40000min⁻¹で回転させた。穴方向の送り速度は2mm/minとし、0.1mm切り込んでは0.1mm後退し、往復運動を繰り返した。

穴あけ後の超硬基板の外観を図6に示す。表と裏を表示しているが、裏では穴の貫通時にエッジの欠けが見られる。また、穴あけ後に計測した穴の直径の変化を図7に示す。裏表とも大きく変化し、ドリルの磨耗が観察される。15個の穴あけ後の単結晶ダイヤモンド製ドリルの電子顕微鏡写真を図8に示す。また、穴あけ前後のドリル刃先の形状を非接触測定器で測定し、重ね合わせた図を図9に示す。6μm程度の刃先の磨耗が確認される。

通常の金属のドリル穴あけ加工では切りくずはドリルのねじれ刃に沿って連続切りくずの形態で排出されるが、超硬合金では切りくずは粉状になるため、このような工具形状は適切であるとはいえないと考えられる。そこで、次に工具形状を改良して穴あけ実験を行った。

5.2 ツイストドリルによる穴あけ実験の結果

図10に工具の写真を示す。φ1mm、4枚刃の単結晶ダイヤモンド製ドリルを試作して、超硬合金の穴あけ実験を行った。穴あけ条件を表2に示す。ドリル回転数を28,000 min⁻¹とした。



図10 4枚刃の単結晶ダイヤモンド製のドリル

表2 穴あけ加工実験の全般の条件

表2 穴あけ加工実験の全般の条件	
工基板	超硬 G6
厚さ	1mm
穴径	φ1.0mm 貫通
穴あけ加工試験機	東芝機械 UVM-450C
主軸種類	空気静圧軸受
主軸回転数	28,000 min ⁻¹
案内面	転がり案内
駆動方式	リニアモータ駆動
位置決分解能	10nm
加工時間	
もみつけ加工	12 秒/穴
ドリル穴加工	2分50秒/穴

試作した4枚刃のダイヤモンドドリルによりあけられた穴の顕微鏡写真を図11に示す。加工実験の結果1242穴以上加工することができ、耐久性において超硬合金基板に対して1000穴以上を達成した。4枚刃にすることにより寿命が延びたことから、刃数が多い方が有効であることがわかる。表、裏の穴径を測定した結果を図12に示す。初期段階の裏穴径が著しく減少しているのはドリル磨耗によるものと考えられる。超硬板④以降は、穴加工深さを0.1mm深くしたことにより安定した結果が得られた。穴あけ回数が多くなるほど小さくなっているが表穴では10μm程度であり、φ1mmに対して1%と良好な結果が得られた。裏穴については加工深さを深くすることにより改善できると考えられる。

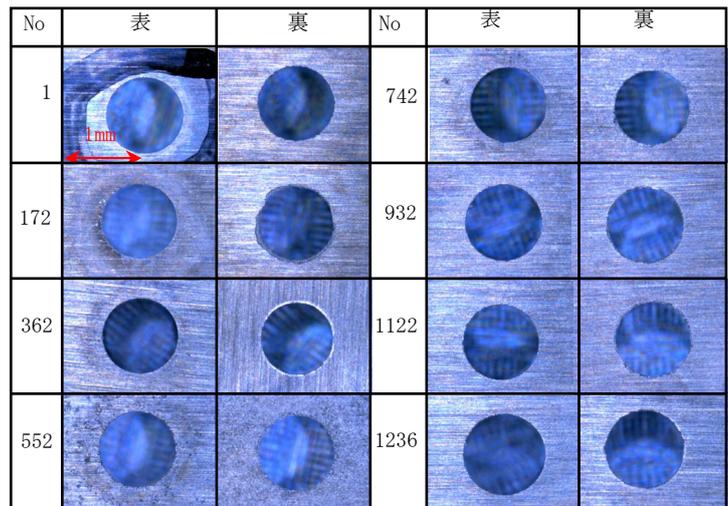


図11 4枚刃のダイヤモンドドリルによりあけられた穴の顕微鏡写真

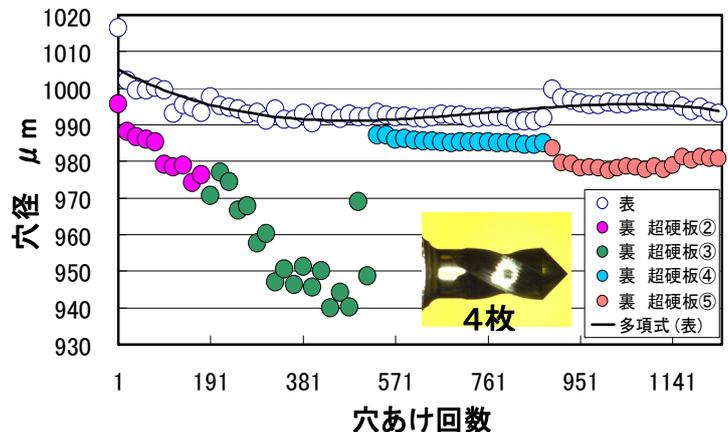


図12 4枚刃ドリルによりあけられた穴径の変化

6. おわりに

近年、一般のプリント基板やシャドーマスクなど微小穴あけのニーズが増大している。また航空機や自動車用のCFRP素材、SiCウエハチャック、半導体プローブ、燃料電池、バイオ機器用超硬製微細金型などでは、高能率・高精度微小穴開けの要求が高まっている。そこで本研究では、単結晶ダイヤモンド製マイクロドリルをレーザ加工により試作し、超硬合金基板に対して微小穴あけ実験を行った。その結果、厚さ1mmの超

硬基板に対して、 $\phi 1\text{mm}$ の穴が 1000 個以上あくことが示され、レーザ加工プロセスによる単結晶ダイヤモンド製のドリルが有効であることが示された。

謝辞

本研究は、(公財)天田財団の助成を受けて行われたものである。ここに深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 川井誠一, 大谷和男: スモールツールによる研磨過程のコンピュータ・シミュレーション, 光学, 10, 4(1981) pp.270-277.
- 2) H. Suzuki, M. Okada, K. Fujii, S. Matsui, Y. Yamagata: Development of micro milling tool made of single crystalline diamond for ceramic cutting, Annals of the CIRP, 62, 1(2013) pp.59- 62.
- 3) H. Suzuki M. Okada, K. Okada, I. Yosuke: Precision Cutting of Ceramics with Milling Tool of Single Crystalline Diamond, International Journal of Automation Technology, 9, 1(2015) pp.26-32.