

# 単結晶ダイヤモンド測定針の高精度加工法

Development of High-Precision Processing Technology for Single-crystal Diamond Stylus

久保 雅 裕  
Masahiro Kubo

鷹 巢 良 史  
Yoshifumi Takasu

和 田 紀 彦  
Toshihiko Wada

## 要 旨

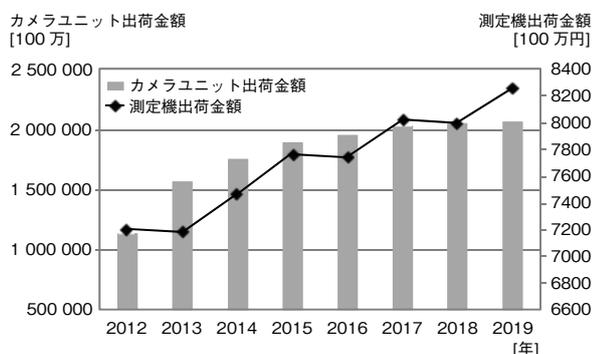
高精度が要求される光学部品の3次元形状測定は、高精度に球形状加工された測定針を用い、被測定表面をトレースすることで行われる。そのため測定針の形状精度の維持管理が重要となり、物理的、化学的に安定し、摩擦しにくいダイヤモンドが針先端材料として多く利用されている。しかしながら、その材料特性ゆえに機械加工やエッチングによる加工が困難である。ダイヤモンドがもつ結晶方位による加工性の違いを改善するため、紫外線を援用することによって結晶方位の影響低減を検討し、高精度加工プロセスの開発を行うことにより、先端球状部半径20  $\mu\text{m}$ のダイヤモンド測定針を形状精度0.1  $\mu\text{m}$ で加工できた。

## Abstract

The 3-D shape of optical components that require high accuracy is measured by tracing the surface with a stylus that is given a highly accurate spherical shape. Therefore, it is very important to ensure the stylus shape remains accurate, and this is the reason why we use a diamond stylus which is physically and chemically stable and does not wear easily. However, it is difficult to process diamond with mechanical processing or etching due to its material characteristics. In order to improve differences in workability that occur due to the orientation of diamond crystals we studied the effect of ultraviolet rays and developed a high-precision machining process that can achieve a 20 $\mu\text{m}$  radius diamond with a precision of 0.1 $\mu\text{m}$ .

## 1. はじめに

近年のスマートフォン市場の拡大に伴い、使用される光学レンズの生産数は年々増加しており、第1図に示すように、2016年にはカメラユニットの出荷金額1兆5千億が見込まれている。これら光学レンズの開発・生産には高精度な面形状測定が不可欠であり、測定機の市場も年々増加している [1]。形状測定機のなかでも当社製3次元形状測定機UA3Pは、グローバルで第2位の17.4%というシェアを獲得している[2]。UA3Pはプローブ走査型と呼ばれる高精度に球形状加工された測定針により形状面を走査して形状測定を行う測定機であるため、より測定精度を高め、また、使い勝手を向上するためにも、新たな測定針の開発が望まれている。

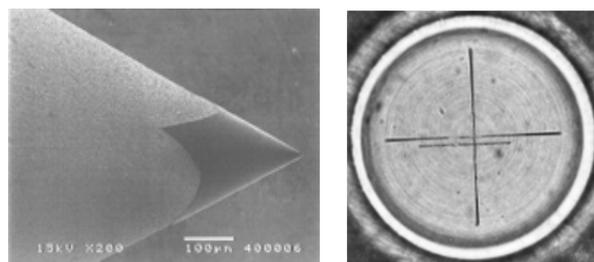


第1図 カメラユニットおよび測定機の市場規模

Fig. 1 Market scale of camera unit and measuring system

一般的に測定針にはダイヤモンドが用いられる。理由として正確に測定するためには測定針の形状精度の維持管理が重要となり、物理的、化学的に安定し、摩擦しにくいダイヤモンドが最適であると考えられているためである。

ダイヤモンドの測定針を用いた測定において、レンズ全体の生産数の90%超を占めるプラスチックレンズの測定の際に生じるスクラッチ痕により、光学特性に影響を与えることが問題となっている。このスクラッチ痕は、第2図に示すような、先端球状部半径（以下、R）2  $\mu\text{m}$ と微細なダイヤモンド測定針においては測定針の接触面積が小さくなり、測定針自体が鋭利な工具のように振る舞うために発生する。このスクラッチ痕をつけないためには、ルビーなどを素材とする先端R（250  $\mu\text{m}$ ～）の大きい測定針が用いられる。しかし、先端Rの大きい測定針



第2図 2  $\mu\text{m}$ Rダイヤモンド測定針およびレンズ面のスクラッチ痕

Fig. 2 Diamond stylus (noze R 2  $\mu\text{m}$ ) and scratch on plastic lens

を用いた場合には被測定物上の付着物によるノイズが測定結果に発生しやすくなる。また、表面に回折格子のような数 $\mu\text{m}$ 程度の大きさの微細構造をもつレンズでは、先端Rの大きい測定針ではその構造自体を測定できないため、スクラッチ痕が発生するにもかかわらず先端R2  $\mu\text{m}$ 以下のダイヤモンド測定針が用いられている。

また、近年のスマートフォン向けカメラの高性能化に伴い、傾斜角度60度を超えるプラスチックレンズを測定するために、真球を測定した際の測定誤差がP-V 0.1  $\mu\text{m}$ 以下で高精度に測定できる測定機への要望も高まっている。そのような状況において、従来の測定針でカバーできていない測定針の先端Rが数10  $\mu\text{m}$ 程度の大きさを持ち、かつ60度までの測定精度がP-V 0.1  $\mu\text{m}$ を満足する測定針をラインナップすることが必要である。

測定精度向上のために、3次元形状測定機の測定機構部を改善した高精度な新型機も開発されているが、測定針の改善は、ほとんど進んでいないのが現状である。

現在、タングステンカーバイドの微粒粉末を結合材にコバルトを用いたWC-Co合金（以下、超硬合金）を素材とした先端R20  $\mu\text{m}$ の測定針については、試作レベルであるが既に開発を完了しており、先端Rが20  $\mu\text{m}$ であれば、UA3Pの微少な接触圧ではプラスチックレンズにスクラッチ痕を残さないことが確認できている。

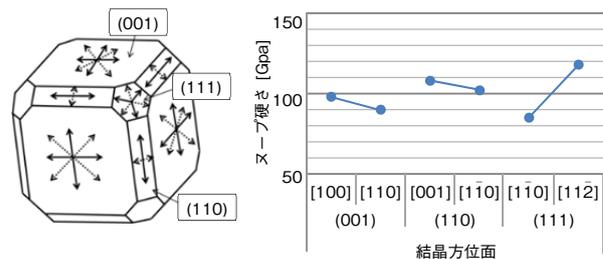
そこで、被測定物に対してスクラッチ痕を与えずに測定することが可能で、かつ超硬合金製測定針に対して耐摩耗性を向上させることを目的に、60度の傾斜角度までの測定精度がP-V 0.1  $\mu\text{m}$ 以下で先端Rを20  $\mu\text{m}$ に拡大した単結晶ダイヤモンド測定針を製作する工法を開発したので報告する。

## 2. 従来技術の問題点と開発コンセプト

測定針として適した材料であるダイヤモンドではあるが、その材料特性ゆえに機械加工やエッチングによる加工が困難である。現在使用されているダイヤモンドの測定針は宝石などの研磨技術と同じスカイフ研磨により製作することが一般的である。しかし、宝石などと違い1  $\mu\text{m}$ 以下の形状精度を求められる測定針ではダイヤモンドの結晶方位による加工性の違いが問題となる。

第3図はダイヤモンドの結晶方位と、その方向による硬度を示しているが、結晶方位および研磨方向により、破線で示した難加工方向と実線で示した易加工方向において、最大2倍程度の硬度の差が存在する [3]。

そのため、ダイヤモンドの研磨には、研磨箇所に応じた厳密な除去量の管理が必要で、研磨が安定して実施できないという問題があった。



第3図 単結晶ダイヤモンドの硬度

Fig. 3 Hardness of single-crystal diamond

一方で、近年半導体デバイス材料として、ダイヤモンドに注目が集まっており、半導体ウェハとしての加工技術の研究開発が進められている。その加工技術研究の1つとして紫外線を援用した平面の研磨加工が報告されており、結晶方位の影響を低減し、高品位な加工が報告されている [4]。

本開発では、スクラッチ痕を発生する要因である接触圧の低下を目的に先端Rの大きなダイヤモンド測定針を加工可能な新工法を、以下のコンセプトに基づき開発した。

1. 紫外線援用加工による結晶方位影響低減
2. 先端Rの創成を自在に行える独自加工工法

まず、単結晶ダイヤモンドの加工難易度を上げている最大の要因は、前述した結晶方位による硬度差である。高精度な球形状を加工するためには、この結晶方位の影響による加工性の変化を低減しなければならないが、紫外線の援用により、結晶方位の影響を低減することが報告されている。

しかし、既に報告されている紫外線援用研磨は、平面に限定された内容であり、高精度な球形状の加工は困難である。

そこで、高精度な球形状を加工できないという課題を解決するために、平面の紫外線援用研磨とは異なる、工具の摩耗が球形状の精度に影響を与えにくい工法の検討を行った。

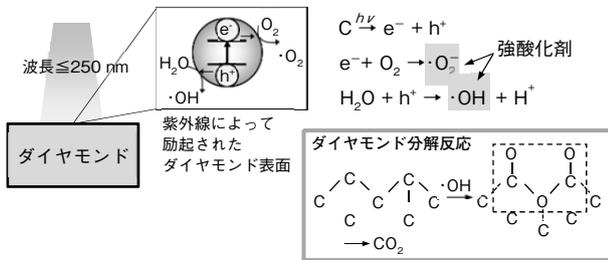
加えて、加工が工具の移動軌跡の転写であることから、加工時の駆動軸を少なくすることで、転写誤差を最小にする独自加工軌跡での検討を行った。

## 3. 開発技術

### 3.1 紫外線照射時のダイヤモンド変質メカニズム

ダイヤモンドは半導体材料のため、そのバンドギャップに相当する波長（約250 nm以下）を照射・吸収することで第4図に示すような反応が起こると推測される。ここで、ダイヤモンドが紫外線を吸収し、ホールとエレクト

トロンが分離し、Oラジカル・OHラジカルといった強酸化剤が発生することでダイヤモンド(C)がCOまたはCO<sub>2</sub>として分解される。その結果、ダイヤモンド結晶構造が崩れ、加工性が向上すると推測されている。



第4図 紫外線下でのエッチング反応  
Fig. 4 Etching under UV light

### 3.2 紫外線援用効果確認実験

紫外線援用の有無による結晶方位の影響による加工性の変化を確認するため、ダイヤモンド(100)面の難加工方向および易加工方向にそれぞれ溝加工を行い、その溝深さを比較した。

紫外線援用加工による結晶方位への影響を確認するための試料は単結晶ダイヤモンド平面素材の(100)面を用いた。試料の加工には1 nm分解能を有する超精密5軸加工機を使用し、工具には円柱形状の多結晶ダイヤモンドを用いた。以降の加工実験において全て同一の加工装置を用いた。

工具はエア軸受・同期モータスピンドルにより、60000回転/分で高速回転させている。紫外線光源には、低圧水銀ランプ(200 W)を用い、加工点近傍での照度は紫外線照度計(中心波長250 nm)での測定値で100 mW/cm<sup>2</sup>とした。

溝加工の実施方法は、紫外線援用の有無それぞれにおいて、単結晶ダイヤモンド素材と工具が接触した深さを基準として、1.0 μmおよび2.0 μmの深さまで工具を0.2 μm/passの切り込みで行った。

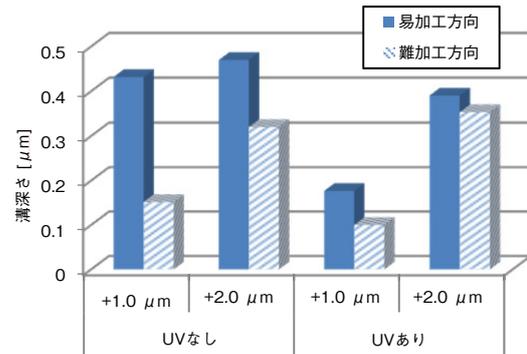
加工された溝の深さの測定には、位相シフト干渉顕微鏡を用いた。単結晶ダイヤモンド素材(100)面への溝加工測定結果を第5図に示す。

紫外線援用がない状態において、基準深さより2.0 μm切り込んだ溝の深さは、易加工方向が0.47 μmに対して難加工方向が0.35 μmとなり、紫外線援用がある状態で加工された溝の深さは、易加工方向が0.39 μm、難加工方向が0.35 μmとなっている。

以上の結果から、紫外線が援用されている加工結果において、紫外線の援用がない加工結果に対して、加工方

向による変化割合が1/3に減少しており、紫外線の援用によって結晶方位の硬度差が加工に与える影響の低減が確認できた。

また、紫外線援用状態の溝深さが非援用状態に比べ浅くなっているのは、加工に用いた工具自体もダイヤモンドのため、工具摩耗が増加しているためである。



第5図 加工深さ評価結果  
Fig. 5 Results of evaluating cutting depth

## 4. 高精度加工プロセス検討

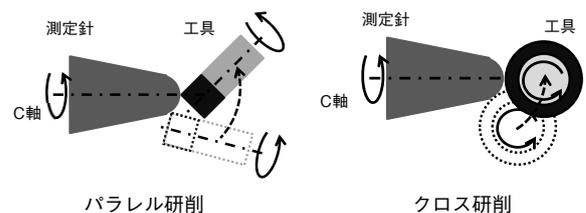
### 4.1 研削加工方式検討

被測定物に接触して、測定を行う3次元形状測定機では測定針の真球度が測定精度に直結するため、要求される形状精度は、既に述べたように傾斜角度60度でP-V 0.1 μm以下と非常に高精度なものとなっている。

機械加工において加工される測定針の形状精度は、加工装置の軸駆動精度、工具の振れおよび外乱振動によって決定される。

そこで、回転運動を行う回転軸を用いる方法と直線運動を行う直動軸を使用する斜軸加工方法を比較し、使用加工軸数が少なく、軸の駆動精度が加工精度に与える影響が少ない回転軸のみを使用する加工工法を選択した。

回転軸を使用する工法として第6図に挙げる工具の回転軸と加工装置の主軸回転軸の対向方向により、工具の回転軸と被削物の回転方向が平行になるパラレル研削法



第6図 研削方式の違い  
Fig. 6 Difference of grinding

および工具の回転軸と被削物の回転方向が交差するクロス研削法の2種類の工法がある。

今回開発を行った微細な先端球形状を有する測定針においては、パラレル研削法を用いた場合において、工具の損耗による工具先端と加工装置主軸の軸芯が一致しない状況が発生する。その結果、測定針の先端部分にへそと呼ばれる突起が発生し、測定針の真球精度が悪化する。

また、研削加工においては工具の振れが面粗さに直結し、形状精度の悪化をもたらすため、加工する工具の振れを抑えることは非常に重要である。

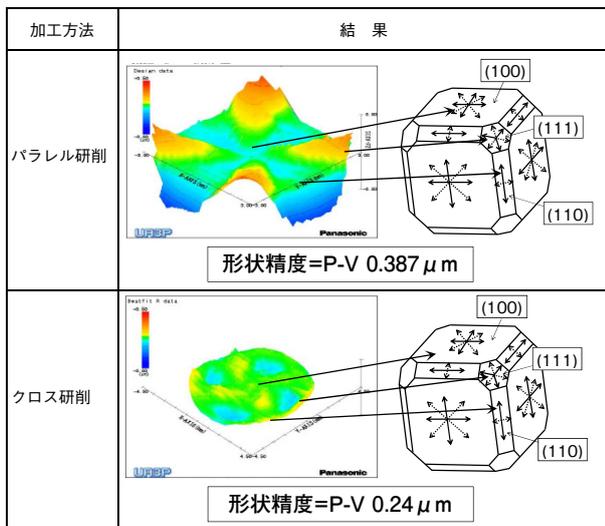
そのため、今回の加工において使用する工具は、全て加工機上にて非接触で工具を放電加工により整形することで工具の振れを可能な限り抑えている。

### 4.2 研削方式による加工精度差の確認

既に述べたとおり単結晶ダイヤモンド素材においては、結晶面および加工方向によって硬度差が存在するため、工具の回転方向と単結晶ダイヤモンド素材の回転方向により加工除去量に差異が発生すると考えられた。そこで、紫外線援用を行わない状態で単結晶ダイヤモンドに対して、クロス研削方法およびパラレル研削方法それぞれで球形状の加工を実施した。第7図にそれぞれの研削方法で加工した先端R20 μmの球形状を測定した結果を示す。

単結晶ダイヤモンド素材の(100)面を先端に配置した場合において、パラレル研削方法は工具の回転方向が素材の回転方向と平行になるため、(111)面では難加工方向と一致し、(110)面では易加工方向と一致している。

そのため、(111)面と(110)面での加工レートの差に起因する差異が発生していると推定される。



第7図 研削方法による方位影響の差  
Fig. 7 Difference of grinding direction

それに対してクロス研削方向での加工では、工具の回転方向が素材の回転方向と交差するため、(111)面と(110)面の加工レートの差が相対的に小さくなっていると推測される。

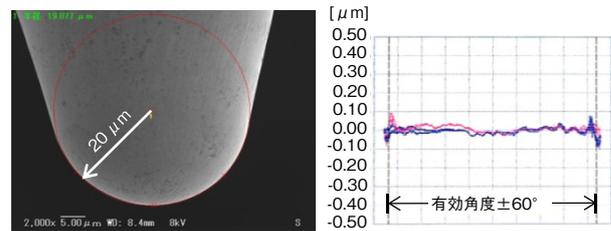
従って、結晶方位による加工レートの差が少ないクロス研削方向が、より高精度に加工できる可能性が高いと判断できる。

### 4.3 加工精度確認

結晶方位の影響を除き、工法自体の加工精度を確認するため、超硬合金に対してクロス研削加工での球形状加工を実施した。

第8図に旋回軸のみにて形状加工を行った測定針の形状精度および外観SEM写真を示す。傾斜角度60度までの測定範囲で測定針の形状精度はP-V 0.08 μmとなっており、目標数値であるP-V 0.1 μm以下を達成した。

本結果より、結晶方位の影響を低減することで、クロス研削での旋回軸加工により単結晶ダイヤモンド素材の高精度加工が実現可能と判断した。



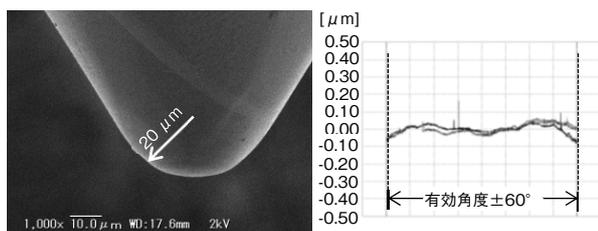
第8図 超硬合金製測定針の加工精度  
Fig. 8 Accuracy of WC-Co stylus

### 4.4 紫外線援用を用いた先端R20 μm測定針加工

前述した加工プロセスと紫外線援用を用いた研削加工により単結晶ダイヤモンド素材への高精度加工を実施した。

加工装置は先の実験と同じ超精密5軸加工機を用い、工具には円柱形状の多結晶ダイヤモンドを用いた。第9図に本加工検討で研削加工を施した単結晶ダイヤモンド素材の測定針の形状精度を示す。

紫外線援用を行った研削加工において、測定針の形状精度はP-V 0.10 μmとなっており、目標数値に到達した。



第9図 先端R20 μm単結晶ダイヤモンド測定針の球形状精度  
Fig. 9 Form accuracy of 20 μm radius single-crystal diamond stylus

## 5. まとめ

本開発では、紫外線援用を行った超精密研削加工によりダイヤモンドへの高精度形状加工を検討した。以下に開発結果を示す。

- (1) 紫外線援用を行うことにより、ダイヤモンドの多結晶方位影響が1/3程度に低減されることを確認した。
- (2) 高精度な球形状加工工法として、回転軸を利用したクロス研削法を検討し、先端R20 μmの超硬合金製測定針においてP-V 0.08 μmの加工精度を得た。
- (3) 紫外線援用を行った研削加工により、単結晶ダイヤモンド素材への先端R20 μmの球形状加工を実施し、P-V 0.10 μmの加工結果を得た。

以上の結果より、単結晶ダイヤモンド素材の結晶方位影響を低減する高精度な加工工法を開発したことで、先端R20 μmの測定針を製作することができた。

本開発技術では、従来の測定針加工技術であるスカ이프研磨で実現が困難であった2 μmを超えるサイズのダイヤモンド測定針の高精度加工が可能となった。

先端R20 μmの単結晶ダイヤモンド測定針の高精度加工を実現したことにより、年間40台前後の販売実績がある形状測定機において、関連する高精度新型測定機の新規販売増に貢献していく。

## 参考文献

- [1] 2014 イメージング&センシング関連市場調査, (株) 富士キメラ総研, 東京, 2014, p.158.
- [2] 2014 イメージング&センシング関連市場調査, (株) 富士キメラ総研, 東京, 2014, p.263.
- [3] 原野佳津子 他, “ナノ多結晶ダイヤモンドの切削性能,” SEIテクニカルレビュー, no.177, pp.107-113, 2010.
- [4] 峠陸 他, “紫外光励起による単結晶ダイヤモンドの研磨メカニズムに関する研究,” 精密工学会誌, vol.80, no.1, pp.112-116, 2014.

## 執筆者紹介



久保 雅裕 Masahiro Kubo  
生産技術本部 生産技術研究所  
Production Engineering Lab.,  
Manufacturing Technology and Engineering Div.



鷹巣 良史 Yoshifumi Takasu  
コーポレート戦略本部  
Corporate Strategy Div.



和田 紀彦 Toshihiko Wada  
生産技術本部 生産技術研究所  
Production Engineering Lab.,  
Manufacturing Technology and Engineering Div.  
工学博士