ダイヤモンド工具の研磨に関する研究 (第6報)*

—— 単結晶ダイヤモンド線引きダイスの結晶方位と伸線の湾曲 (その1) ——

上 神 謙 次 郎**

Study on Lapping of Diamond Tool (6th Report)
 -Characteristics and Crystallographic Orientation
 of Single Crystal Diamond Die for Wire Drawing (Part 1)-

Kenjiro UEGAMI

The internal surfaces of hole of the single crystal diamond die for wire drawing are composed of the various crystallographic orientations. A manner of representation of the diamond crystal planes and the directions rubbing with wire is proposed. It is shown as the diagram of crystallographic orientation on developing chart of diamond reference sphere expressed in the restricted Mercator's projection. The distributions of frictional force ratio on the die hole, curvature and curved direction of drawn wire, distribution of hardness on outside of drawn wire are measured, and the relation among them are discussed. The results are following: the drawn wire bends to the direction of small frictional force ratio on the diamond die hole and the surface hardness of drawn wire is higher on the surface of outside of curved wire.

Key words: single crystal diamond, crystallographic orientation, die, wire drawing, diagram of diamond reference sphere, friction, curve of wire.

1. は じ め に

単結晶ダイヤモンド(以下、ダイヤと略称)を材料とする工具には切削工具のほかに線引きダイスがある。この線引きダイスの穴面は結晶方位が連続して変化する面群で構成されている。一方、ダイヤは摩擦・摩耗に対し顕著な異方性を示す¹⁾。したがって、ダイス形状が正確に製作されていてもダイス穴面の摩擦・摩耗は一樣ではなく、正常な線引きができるとは限らず、加工表面層の塑性変形および残留応力などに差を生じ伸線は湾曲することがある。最終的に線材は巻き取られるから湾曲するが、この巻き取りによる湾曲は矯正工程で修正できる。しかし、伸線時の湾曲は巻き取りによる湾曲とは異なり、強固な残留応力のため簡単には矯正できない場合が多い。特に、ワイヤ放電加工に用いられるワイヤは、できるだけ真直になることが求められるため伸線時の湾曲はできるだけ少ないことが要求される²⁾。

本報ではダイス穴面の結晶方位の図示方法を提案するとともに穴面の摩擦分布を測定し、そのダイスによって線引きされた伸線の湾曲および表面の加工硬化の分布などの関係を明らかにして、最適な線引きダイスの結晶方位の究明を目的とする。

2. 実 験 方 法

2. 1 ダイス結晶方位の測定

単結晶ダイヤのダイスとして2個(D1: 穴径 $\phi 0.564$ mm, 以下、同じ, D2: $\phi 0.529$, 以後、ダイスD1, D2などという), そして、比較対照としてダイス穴面が一樣な材質で構成され穴面に異方性がないとみなされるPCD(粉末焼結ダイ

ス)ダイス1個(P: $\phi 1.185$)および超硬ダイス2個(W1: $\phi 1.29$, W2: $\phi 1.24$)の計5個を用意した。

ダイスD1およびD2の結晶方位測定はX線背面反射ラウエ法による回折斑点の撮影によって行った。測定したダイヤの結晶面はダイス入口側の面でダイス底面に平行する面である。この面の露出部は極くわずかであるうえに、回折したX線が補強マウント²⁾やケースの円すい部に邪魔されて撮影できる斑点は極めて少ない。これらの少ない斑点によって結晶方位を特定することは困難なので、別のダイヤ原石を用いて結晶投影球の単位三角球面内⁴⁾の5°ごとの結晶面について、各々の斑点像をあらかじめ撮影しておき、これらとダイスによる斑点像を照合する方法でダイスの結晶方位の同定を行った。そして、その結晶面の北極方向(2.6項で後述する)に相当する向きに入口側ダイスケース表面上にけがき線をつけ、Nと刻印した。また、ダイスP, W1およびW2についても測定基準位置としてケガキ線を引いた。

2. 2 伸線方法および伸線の湾曲測定法

旋盤を用いて市販銅線を伸線した。ダイスの北極方向(あるいは測定基準位置)を上に向けて旋盤チャックに取付け、往復台と心押台を主軸側に近づけておく。銅素線の先端をサンドペーパーで細くし、主軸内を通した後、ダイスを貫通させて先端を心押台に取り付けたドリルチャックに固定する。心押台のストッパをゆるめた状態で往復台をZ軸の+側方向に動かして心押台を移動させ、銅素線をダイスから引き出し伸線する。ダイスおよび銅素線ともアセトンであらかじめ油分をふき取って伸線した。伸線長さは500 mmの一定にし、伸線速度は約0.15 m/sとした。500 mmの伸線から約350 mmを試料として切断した。切断前に油性インクでダイスの北極方向に印をつけ、ニッパの刃をダイスの南北方向に合わせて切断した。銅素線は市販の工業

* 原稿受付 平成9年3月19日

** 正 会 員 大阪市立大学工学部(大阪市住吉区杉本3-3-138)

Fig. 1 Manner of definition of curved direction of the drawn wire

Fig. 2 Measuring jig for the curved wire and the hardness of the drawn wire

(a) Measuring method of frictional force ratio

Fig. 3 Photograph of die hole and taking method of die hole shape by resin

(b) Appearance of apparatus

Fig. 4 Measuring method of the frictional force ratio on the internal surface of die hole

用銅線で、450℃、1時間の焼きなましを行い、生じた酸化膜は液剤で除去した。市販銅線の線径は限られているので、断面減少率はダイスによって異なり、15.1～35.1%の範囲であった。

線引き後の伸線は程度の差こそあれ、いずれのダイスでも湾曲したが、各回の伸線での350 mmの長さ内では湾曲方向は一定であり、平面に置いても浮き上がる部分はなかった。切断した伸線を方眼紙上に置き、方眼紙目盛を20 mmごとに読み、湾曲を円弧と仮定しても良いことを確認した。そして、湾曲半径は10点以上の方眼紙目盛から最小二乗法で求め、その大きさを曲率(m^{-1})として表した。また、湾曲の方向は図1に示すように、ダイスの北極を0°として旋盤のC軸回転方向、すなわち、ダイス入口側から見て時計回りの角度とした。この湾曲方向の測定は、図2に示すジグを用いて伸線を平面に置き、上で述べたダイスの南北方向に切断したニッパの刃跡の傾き角度をジグの分度器で読み取った。

2. 3 ダイス内面形状測定

図3(a)は印象材のシリコン樹脂で型取りしたダイス穴面形状の顕微鏡写真の1例である。図3(b)に示すように、水平台の上にダイスを置き、ダイス底面と表面の平行度を水準器で確認する。つぎにダイス表面側に穴をまたぐように同径の針金を2本置きシリコン樹脂を流し込んでその上からスライドガラスを針金を跨ぐようにかぶせる。樹脂が硬化した後、このスライドガラスとともに樹脂をダイスから抜き取る。これをゴニオメータに取り付け型取りしたダイス穴軸が顕微鏡光軸と直交するようにゴニオメータを調整した後、45°ごとに回転させて順次撮影した。ダイス穴軸とケース底面との直角度は約0.3°以内であり、ダイス穴面形状の対称性も良いことを確認した。

2. 4 細線によるダイス穴面の摩擦力比分布測定法

図4(a)はダイス穴面の摩擦力比分布の測定法の概略図、(b)はその装置の写真を示す。ダイス穴面に黄銅細線(市販の工業用黄銅線： $\phi 0.35mm$)を通して、それに張力を掛けダイス穴面に一定の力($F_N:1.0\sim 1.2N$)で押し付ける。つぎに入口側から出口側へ細線を移動させダイス穴面を摩擦してダイス

穴面との摩擦力 F_F を測定し、 F_F/F_N を摩擦力比とした。

黄銅細線はケース軸から入口、出口側でそれぞれ3～11°および3.0°傾けて接触させ、移動速度は1.0 mm/sとした。黄銅細線の入口側の接触角はダイスによって異なる。前項の2.3のダイス穴面形状の顕微鏡写真と伸線する銅素線直径によって決めた。すなわち、それぞれのダイス穴面のリダクション部に銅素線が接触し始める位置と同じ位置で黄銅細線が接触し始めるようにした角度である。出口側の3.0°はベアリング部での接触を確実にするための角度である。そして、ダイスを22.5°ごとに順次回転させて、ダイス穴面の摩擦力比の分布を測定した。

この測定に伸線と同じ材質の銅細線を用いないで黄銅細線を使った理由は、当初市販の銅線で行ったが再現性がなく、材質的にむら無く、結晶粒も非常に少ない音響用の無酸素銅の細線を用いた。しかし、同様に再現性が改善されず調べたところ、銅細線の表面が摩擦により変形していた。そこで近い材質の黄銅線で加工硬化が著しく硬いものを用いたところ、良い結果を得たので、この黄銅細線を使用した。測定前にダイス穴面は硝酸で十分洗浄し、黄銅線もアセトンで油分をふき取った。

2. 5 伸線後の銅線表面硬さ分布測定法

素線および伸線の外周の硬さ分布の測定は図2で示したジグを用いた。線材をジグの長さに切り、線材の一端を測定角度にねじで固定し、薄鋼板で線材をジグ表面に押し付けて固定する。硬さ測定部に当たるところには薄鋼板に穴をあけておき、微小ビッカース硬さ計にこのジグ全体を固定して測定した。JIS⁵⁾には線材などの円筒面の硬さ測定には修正係数を用いるよう指示されておりこれに従った。

2. 6 ダイス穴面の結晶面群と素線摩擦方向の図示方法

ダイヤモンドは同じ結晶面上においても、摩擦方向が異なると摩擦摩擦特性が変化する¹⁾。したがって、ダイスの穴面の結晶面群を図示するには結晶面の表示とともに、その面における摩擦作用方向も表示されることが望ましい。結晶学で用いられるステレオ投影図においては、中心とする面が異なると図も変化する。結晶上等価な面の等価な摩擦方向であっても、同じ角度で図示

Fig. 5 Developing chart of the diamond reference sphere represented in the restricted Mercator's projection and diagram of crystallographic orientations of the internal surface of die D1 hole

Fig. 6 Relationship between the reference sphere and the internal surface of die hole

Fig. 7 Diagram of crystallographic orientations of the internal surface of die D2 hole

できるとは限らず、また、偏角を持ってしまうこともある。そこで、従来から提案している制限付きメルカトル法表示⁴⁾によれば、これらの問題は解消されて表示できる。すなわち、結晶投影球を地球儀になぞらえ、投影球面の展開図を図5のように定めて原則として変化させない。そして、特定の結晶面は緯線経線で示し、その面での作用方向は北極方向を0°とする方位角で示す。球のメルカトル投影では方位は偏角なく投影される。

図5の左上図はダイヤモンドの投影球である。この投影球面の制限された範囲内をメルカトル法によって表示する。投影球面の太線で表した(110)面(図中◆で示す、以下同様)を中心とする(100)と(010) (■)および(111)面と(111) (▲)で囲まれた四角球面に限ってメルカトル法表示する。そして結晶の対称性から、これを12個連ねて結晶投影球の全展開図とする。あるいは左下図に示すように3軸の円筒への各々の四角球面の投影と考えることもできる。こうすると各四角球面ごとに極点の方向は異なることもあるが、その中では摩擦作用角は偏角なく表すことができ、各々結晶上等価であるから、比較対照が容易にできる。ダイス穴面のように軸対称に対向する結晶面とその摩擦方向を互いに比較する必要がある場合は特に便利である。

図6はダイス穴面の結晶面群とダイヤモンド投影球の関係を示す。まず、ダイス穴軸は結晶投影球の中心を通っており、その結晶方位は前述の2.1項の方法によって特定されている。つぎに、小さなもう一つの投影球を考え、この投影球が大きさを順次変

えながらダイス穴面に接しつつダイス穴内を通過する状態を想定する。その際に、この小さな投影球の結晶方位は、ダイスのそれと一致させる。こうすると、ダイス穴面と接する小さな投影球の小円が定まり、この小円と中心に対称な反対側の小円がダイス穴面の結晶面群に相当することになる。こうしてダイス各部の結晶方位が特定できる。これを上述の図5の展開図上に描くと、ダイス内面のアプローチ部からエグジット部の各々の結晶面群をそれぞれ閉曲線として表示できる。そして、ダイス入口から出口側に向かって放射状に線を引き、ダイス穴面の各位置での伸線の摩擦方向を表示できる。

3. 実験結果および考察

3.1 単結晶ダイヤモンドダイスD1, D2の結晶方位表示

図5にはアプローチ部からエグジット部まですべてを描くと繁雑になるので、試料ダイスD1のリダクション部およびベアリング部だけの結晶面群と中心軸の入口、出口の位置、45°ごとの伸線の摩擦方向を矢印で示した。図中のリダクション部は、2.3項で測定したダイス穴面形状と銅素線の直径とから、銅素線が接触し始めるリダクション部の結晶方位を示す。ダイス穴面は曲面円すいになっているから、このリダクション部からベアリング部への範囲の結晶面群にわたって摩擦方向線に沿って、連続して銅素線が接触摩擦して加工されることになる。

Fig. 8 Experimental results of the drawing wires: the curved direction and curvature, the frictional force ratio on internal surface of die hole, and the skin layer hardness of raw and drawn wire

図7は同様にダイスD2の場合の結晶方位図を示す。図5および図7のダイスD1、D2の入口は(110)と(111)を結ぶ線の付近にあり、その入口は各々(111)面近くと、(110)面近くにある。このため、両ダイスの90°および270°方向のベアリング部の結晶面はほぼ(110)面に等しく、摩擦方向は結晶方位の等価性から同じ方向に斜めに横切っている。したがって、これらの穴面の摩擦状態は等しいと考えられる。

3. 2 伸線の湾曲、ダイス穴面の摩擦力比分布 および伸線表面の周方向硬さ分布

図8は実験結果を一括して示す。各円グラフの角度は、単結晶ダイヤモンドD1およびD2ではその穴軸の結晶方位の北極方向を0°として表した。ダイスP、W1およびW2ではダイスに付けた測定基準位置の起点を0°とした。最上欄にダイス穴径、加工前素線径、断面減少率および銅素線が接触する位置でのダイス半角を示す。円グラフは上から順に各ダイスによる伸線の湾曲方向とその曲率、ダイス穴面の黄銅細線による摩擦力比分布および伸線表面の周方向硬さ分布の測定結果である。伸線表面の硬さは上欄の湾曲グラフ中の●点で表した伸線を一例として示した。また、硬さ分布グラフの内側の測定値は伸線前の銅素線の硬さ分布で、焼きなましによりおおむね一様な硬さになっていた。

図8から明らかなように、単結晶ダイヤモンドの伸線の湾曲

は大きく、その湾曲方向も一定の範囲内ではばらついて偏っている。また、ダイス穴面の摩擦力比も偏っており、その偏りは伸線の湾曲方向のほぼ反対方向で大きくなっている。ダイスD1では、0°↔180°方向で低く、0°方向の方がより低い。さらに、伸線の表面硬さにも偏りがあり、硬さが高い方向は伸線の湾曲の反対側、すなわち、湾曲の外側で摩擦力比が大きくなっていることと大略符合する。ダイスD2ではさらに顕著である。一方、ダイスP、W1およびW2では、ダイスの穴面の摩擦力比がほぼ一定値であり、伸線の湾曲も非常に少なく伸線表面硬さにも偏りは少ない。ダイスW1およびW2による伸線の外周面硬さが低いのは、銅素線がリダクション部に接する部分でのダイス半角が大変浅いためである⁶⁾。

ダイヤモンドの測定結果の偏りはダイス穴面の摩擦力比に起因しているといえる。すなわち、ダイスD1およびD2の穴面の摩擦力比の大きな部分で伸線はしごかれて引き伸ばされるため、これと反対の方向に伸線は湾曲する。そして、この方向の大きな摩擦のため伸線は他の部分より加工硬化して硬さが増加したといえる。2. 2項で述べたように、各回の伸線での350mmの長さ以内では湾曲の方向は一定であったが、これは一旦伸線が始まるとダイス穴面による伸線の加工状態は揺らぐことなく、初期始動の状態が安定し、かなり持続することを現している。ただし、この初期始動は無秩序に起こるのではなく、穴面

Fig. 9 Comparison of the frictional force ratios on the experiments with the cutting off diagrams crystallographic orientations on the opposite internal surface of die hole: D 1, D 2

の摩擦抵抗の分布に制約されているといえる。

3. 3 互いに対向するダイス内面の結晶方位の比較

本実験では伸線速度が微速、そしてダイス穴面の摩擦測定では超微速であり実機の場合との問題は残るが、伸線の湾曲に關しての穴面の摩擦特性の傾向は変わらないと考える。図8で示した摩擦力比分布と図5および図7の結晶方位図との関係を明らかにするには、ダイヤのすべての結晶面のあらゆる方向に対する摩擦特性が分かっている必要があるが、それらは今のところ未知である。しかし、2.6項および3.1項で述べたように、ダイヤ結晶投影球面の展開図のそれぞれの単位四角球面は結晶の等価性から比較対照できるので、以下のようにいえる。

図9は図8のダイスD1およびD2の摩擦力比分布と図5および図7の対向するダイス穴面の結晶方位を切り取って並べて示した。単位四角球面の上半分について(111)を上にし(110)を中心にして対向する穴面を対にして並べた。図中の矢印の先端がベアリング部の結晶面で、その方向が線材の摩擦方向である。伸線時にはダイス穴面への垂直力は対向する穴面同志では等しいと見なしてよいから、摩擦力の差異は結晶面とその摩擦方向に依存するはずである。

まず、図9のD1、D2ともに90°→270°方向ではベアリング部が{110}面にあり、矢印の方向も結晶等価性から等しい。その結果、穴面の摩擦力比も等しくなっている。その他の組み合わせではベアリング部の結晶面は同じく結晶等価性からほぼ等しい結晶面であるが、矢印の方向が互いに逆で、リダクション部が互いに反対側にある。そのため、穴面の摩擦力比にも差異が生じている。むしろ、ダイスD1およびD2の各々において、互いに対向する位置ではないが、45°と315°、135°と225°方向に注目すると、互いに結晶面および矢印方向も等しく、その穴面の摩擦力比もほぼ同じ値である。これは伸線の湾曲には何ら関係しないと思われるが、本実験の摩擦力比の測定値が妥当である証明になっている。以上のように、単結晶の摩擦などを検討する場合には、その結晶投影球を制限付きのメルカトル法で図示することが有用であることが分かった。

4. 結 論

単結晶ダイヤモンド線引きダイスの穴面の結晶方位群を図示する方法を提案し、銅素線を線引きして伸線の湾曲、ダイス穴面の摩擦力比分布および伸線後の線表面の硬さ分布などを測定して以下のことが明らかになった。

- (1) 制限付きメルカトル法による単結晶ダイヤモンド投影球の展開図上に単結晶ダイヤモンド線引きダイス穴面の各部の結晶面群および線材の摩擦方向を図示する方法を提案した。
- (2) ダイス穴面を細線で摩擦して、摩擦力比分布を求め、この分布の偏りが伸線の湾曲方向およびその曲率、そして、伸線表面の周方向硬さ分布と対応することが分かった。
- (3) ダイス軸対称で対向する2つのダイス穴面の比較検討には、(1)の展開図の結晶方位図を互に対照させればよく、結晶面の位置および伸線の摩擦方向を比較検討すれば、摩擦力比の差異とよく符合することが分かった。

本研究を遂行するに際し、その費用の一部は財団法人天田金属機械振興財団研究助成金に負った。また、大阪ダイヤモンド工業(株)の中谷征司氏、岡幸嗣氏、小島一志氏にはご援助と貴重な助言をいただいた。ともに記し謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) たとえば、E.M.Wilks and J.Wilks: The Resistance of Diamond to Abrasion, J. Phys. D: Appl. Phys., 5, (1972) 1902.
- 2) ダイヤモンド工業協会編: ダイヤモンド工具マニュアル, 工業調査会, (1979) 129.
- 3) JIS B 4132-1983, ダイヤモンド線引ダイス.
- 4) 上神謙次郎: 単結晶ダイヤモンド工具とその結晶方位, 精密工学会誌, 61, 6, (1998) 759.
- 5) JIS Z 2244-1992, ビッカース硬さ試験方法, 5.
- 6) 鈴木弘編: 塑性加工(改訂版), 裳華房, (1993) 177.