

単結晶ダイヤモンド線引きダイスの性能に 及ぼす結晶方位の影響に関する研究

大阪市立大学 工学部 機械工学科

上神謙次郎

(平成5年度研究開発助成 AF-93008)

1. 研究の目的

単結晶ダイヤモンド線引きダイスの穴面は曲面円錐で、穴面の結晶面は連続して変化している。線材は各々これらの結晶面と摩擦して伸線される。

一方、ダイヤは摩擦・摩耗に対し顕著な異方性を示すから^{1, 3, 14-20}、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・摩耗は一様ではなく、伸線の加工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(線くせ)することがある。最終的に線材は巻取られるから湾曲するが、巻取りの湾曲は矯正が容易である。しかし、伸線時の湾曲は巻取りの湾曲とは異なり、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るワイヤは真直であること、放電加工時の振動発生のため湾曲や残留応力の不均衡が少ないことが要求される²⁸⁻³⁰。

これらのことから本研究では、

- (1) ダイス穴面の結晶方位の拘束メルカトル法表示
- (2) ダイスの結晶方位と伸線の湾曲の関係。
- (3) ダイスの傾斜による伸線の湾曲抑制。
- (4) 伸線が湾曲しないダイスの結晶方位の推測。
- (5) 伸線が湾曲しないダイスの製作と伸線実験結果について報告する。

2. 単結晶ダイヤモンド線引きダイスの結晶方位とその図示方法

2.1 単結晶ダイヤモンド結晶投影球面の拘束メルカトル法表示

ダイス穴面の結晶面および線材の摩擦方向を図示し、各々のダイスの結晶方位を比較できれば³⁾、伸線の種々の現象の説明や考察に役立つと考えられる。結晶学で賞用されるステレオ投影図は結晶の配向を取扱う場合には非常に有用であるが、摩擦・摩耗に係わる場合に援用すると、甚だ不便であり正確を期し難い面がある。結晶上等価な面、等価な摩擦方向は同じ図形に表示され、偏角が生じないことが望まれ、ステレオ投影図ではこれらが満たされない。グノモン投影図も同様である。そこで、単結晶ダイヤモンド結晶投影球の拘束メルカトル法表示⁴⁾を提案する。以下、これについて述べる。

図1の左上図は単結晶ダイヤモンド結晶の投影球である。太線で表した(110)面(図中◆、以下同様)を中心とする(100)と(010) (■)および(111)面と(11 $\bar{1}$) (▲)で囲まれた四角球面に限ってメルカトル法による表示をする。そして結晶の対称性から、これと同じものを12個連ねて結晶投影球の全展開図とし、図1右下

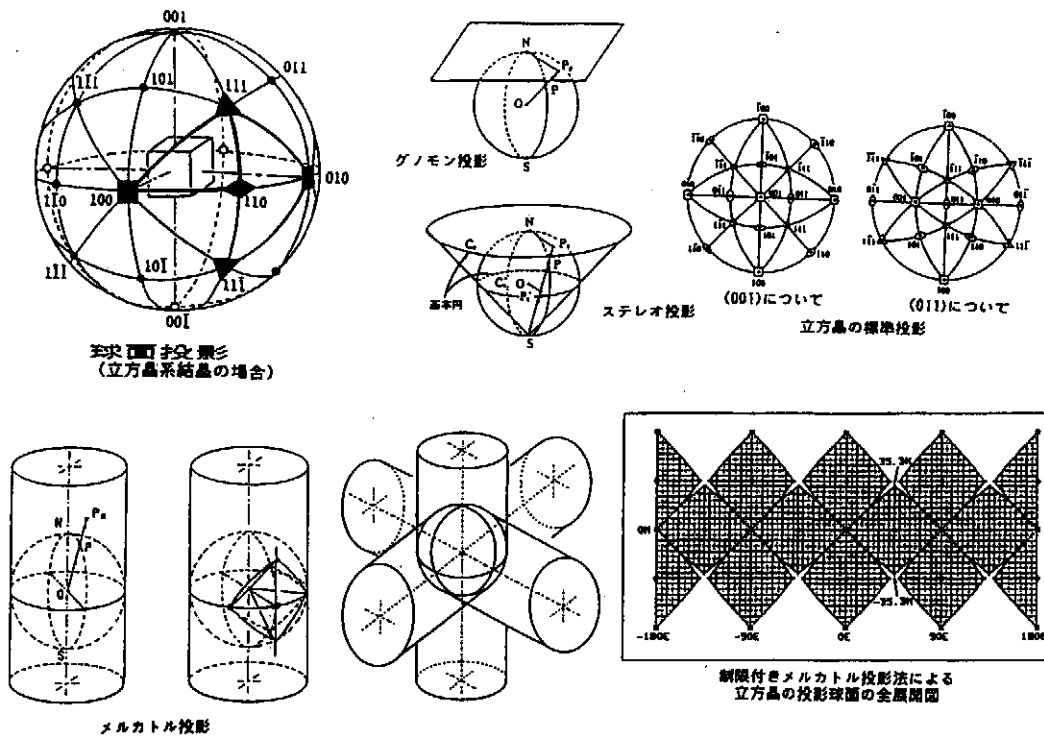


図1 単結晶ダイヤモンド投影球の拘束メルカトル法表示および展開図

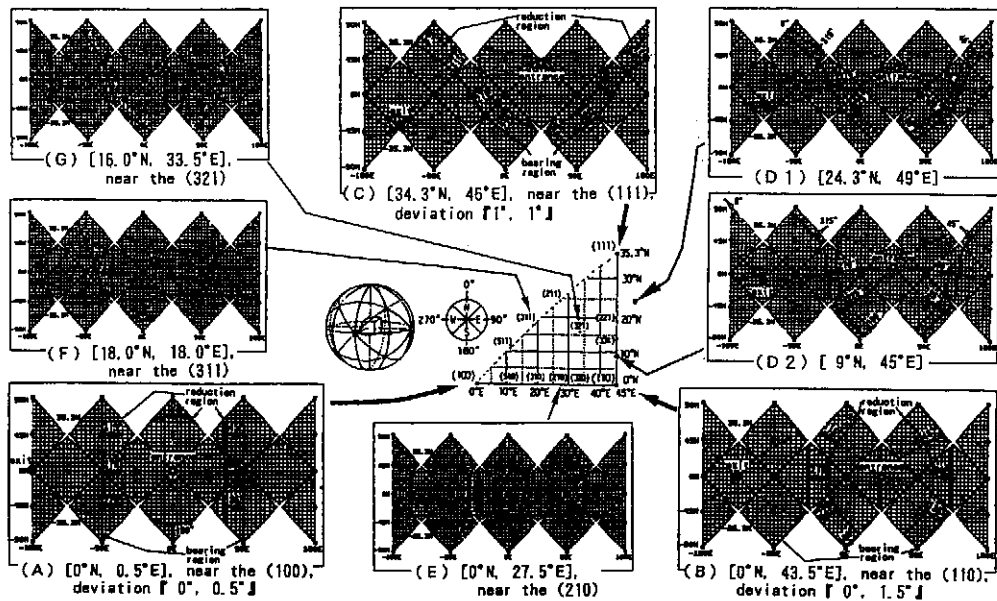


図3 各種穴軸結晶面の単結晶ダイヤモンド線引きダイスのダイヤグラム

図のように定め原則として変化させない。

そして、結晶面は緯度、経度で示し、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角は偏角なく投影され、摩擦作用角も同様に表される。各四角球面は結晶上等価であるから、各々互いに容易に比較できる。ダイスの穴面のように、軸対称に対向する結晶面および摩擦方向を互いに比較する必要のある場合、あるいは軸対称の平衡を考慮する場合はこの方法が特に便利で有用である。

2.2 ダイヤモンドダイス穴面の結晶面群および素線の摩擦方向の表示ダイヤグラム

図2はダイス穴面の結晶面群と単結晶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いる。ダイス底面に平行な入り口側の結晶面（以下、穴軸結晶面）およびその方向は後述の3.1項の方法によって測定される。つぎに、小さなもう一つの投影球を考え、この小さな投影球が半径を変えてダイス穴面に接触しつつ通過する状態を想定する。この小さな投影球の結晶方位は、ダイスの結晶方位と一致させる。こうすると、ダイス穴面に沿って順次接触する小さな投影球の小円が定まる。さらに、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。これを図1の展開図上に描くと、ダイス穴面のアプローチ部からエグジット部への結晶面群を各々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けば、ダイス穴面の各位置での伸線の摩擦方向を示すことになる。伸線作用はリダクション部とベアリング部でなされるから、これらのみを示し、各結晶方位のダイスを図3に描いた。

3. 実験方法および実験装置

3.1 ダイヤモンドダイスの結晶方位測定法

ダイスの結晶方位の測定は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。測定するダイヤモンドの結晶面はダイス入口側の面で、ダイス底面に平行な面である。測定したダイスの結晶方位の北極方向に、けがき線をダイスケース表面上に引き、Nと刻

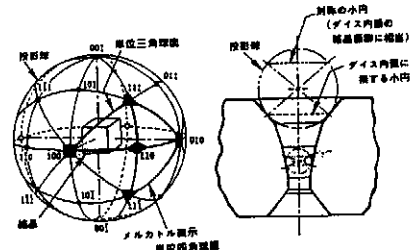


図2 単結晶ダイヤモンド投影球とダイス穴面の結晶方位の関係

印した。また、比較に用いた焼結粉末ダイヤモンドダイスP、超硬ダイスW1およびW2についても測定基準位置として同様にケガキ線を引いた。

3.2 ダイス穴形状の測定法

ダイス穴面形状は印象材のシリコン樹脂で型取りした。これをゴニオメータに取付け調整後、ゴニオメータを45°ごとに回転させて順次写真撮影した。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各々ダイスについて確認した。

3.3 伸線方法、伸線の湾曲（線くせ）方向およびその曲率測定法

旋盤を用いて市販の銅線を伸線した。ダイス北極方向（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、旋盤の主軸内を通した後、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ておき往復台を+Z軸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。

伸線長さは500mm一定、伸線速度約0.15m/sとした。500mmの伸線から約350mmを試料としてニッパで切断した。切断前の伸線に油性インクでダイスの北極側に印を付け、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用銅線で、450°C、1時間の焼きなましを行い、生じた酸化膜は液剤で洗浄して除去した。市販銅線の線径は限られているので、断面少率はダイスによって異なり、15.1~35.1%の範囲

Die material and symbol	Single crystal dia. D1	Single crystal dia. D2	Poly-crystal dia. P	Tungsten carbide W1	Tungsten carbide W2
Diameter of die hole (mm)	φ 0.564	φ 0.529	φ 1.185	φ 1.29	φ 1.24
Diameter of raw wire (mm)	φ 0.70	φ 0.60	φ 1.40	φ 1.40	φ 1.40
Pct. reduction in area (%)	35.1%	22.3%	28.4%	15.1%	21.6%
Semi-cone angle on contact pt. γ (deg.)	11°	13°	10.5°	5°	3°

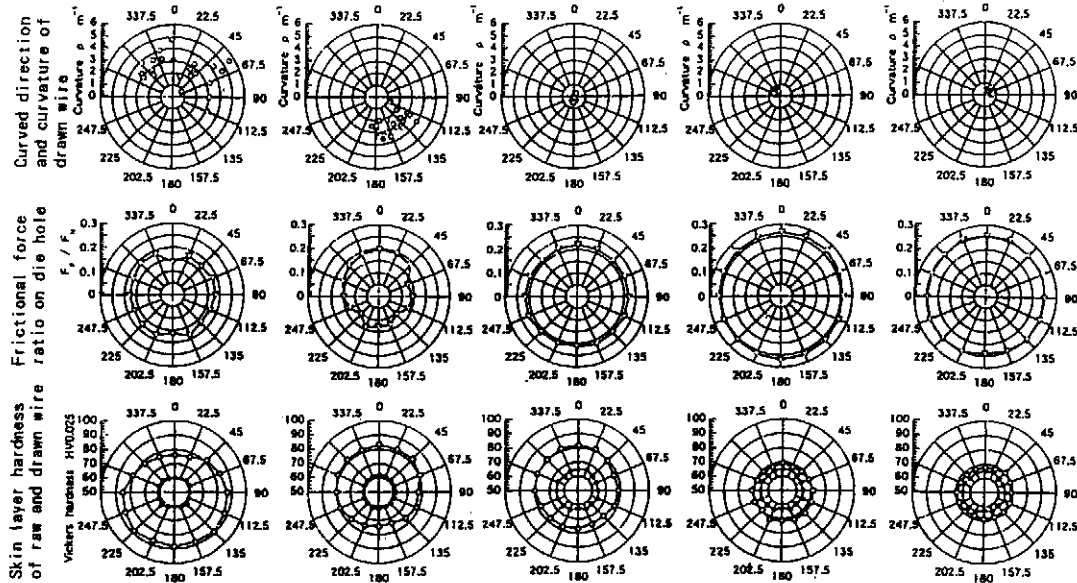


図5 各種ダイスによる伸線の湾曲，穴面の摩擦力比および伸線表面の硬さ分布

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，伸線の湾曲方向はダイスの北極を0°として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，伸線の切断時のニッパ刃跡の傾き角度をジグの分度器で読み取った。また，切断した伸線を方眼紙上に置き，湾曲は円弧とみなし湾曲半径は10点以上の方眼紙目盛から最小二乗法で求め，曲率 (m^{-1}) として表した。

3. 4 ダイス穴面の摩擦力比測定法

図4はダイス穴面の摩擦力比分布の測定法の概略図を示す。黄銅細線（市販の工業用黄銅線：φ 0.35mm）をダイス穴面に通して，それに張力を掛け図に示すように一定の力 ($F_N: 1.0 \sim 1.2N$) で黄銅細線をダイス穴面に押し付ける。つぎに入口側から出口側へ黄銅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°はベアリング部で接触を確実にするための角度である。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。

3. 5 伸線表面周方向硬さ分布測定法

銅素線および伸線の表面硬さの周方向分布の測定は微小ビッカース硬さ計で測定した³¹⁾。

4. 単結晶ダイヤモンドダイス，焼結ダイヤモンドダイスおよび超硬ダイスによる伸線比較

4. 1 単結晶ダイヤモンドダイスD1，D2の結晶方位表示

単結晶ダイヤモンドダイス2個 (D1: 穴径φ 0.564

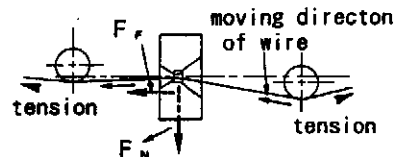


図4 ダイス穴面の摩擦力比測定法の概略

■，D2: φ 0.529)，比較対照としてダイス穴面が一般的なPCD（焼結ダイヤモンド）ダイス1個 (P: φ 1.18) および超硬ダイス2個 (W1: φ 1.29, W2: φ 1.24) の計5個を用意した。図3は各結晶方位のダイスのアプローチ部とエグジット部を描いている。穴軸の入口(◎)，出口(⊙)の結晶面の位置，さらに，45°ごとの伸線の摩擦方向を矢印で示した。図の右上2つは単結晶ダイヤモンドダイスD1およびD2の穴面の結晶方位を示す。図中のリダクション部は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。

4. 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硬さ周方向分布

図5は実験結果を一括して示す。各円グラフの角度は，ダイヤモンドダイスD1およびD2ではその穴軸の結晶面の北極方向を0°として表し，ダイスP，W1およびW2ではダイスに付けた測定基準位置を0°の起点とした。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硬さ周方向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。下欄の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。

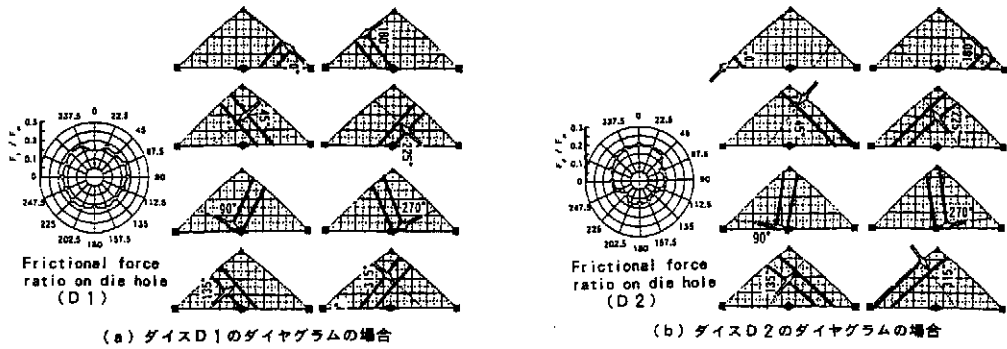


図6 互いに対向するダイス穴面の結晶方位ダイヤグラムの比較

図5から明らかなように、単結晶ダイヤモンドダイスの伸線の湾曲は大きく、その湾曲方向も一定の範囲内で偏ってばらついている。また、ダイス穴面の摩擦係数も偏っており、その偏りは伸線の湾曲方向の偏り範囲方向のほぼ反対方向で大きくなっている。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である。単結晶ダイヤモンドダイスの伸線測定結果の偏りはダイス穴面の摩擦係数に起因し、ダイスD1およびD2の穴面の摩擦係数の大きな部分で伸線はしごかれて引き伸ばされ、これと反対の方向に伸線は湾曲し、他の部分より加工硬化して硬さが増したといえる。

一方、ダイスP、W1およびW2では、ダイスの穴面の摩擦係数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の硬さにも偏りは少ない^{28, 29)}。

4.3 D1, D2の互いに対向するダイス穴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伸線機の場合との問題は残るが、伸線の湾曲に関する穴面の摩擦特性との関係の傾向は変わらないと考える。2.1節で述べたように、図3の展開図の各々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6は図5のダイスD1およびD2の摩擦係数分布と図3のD1, D2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。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。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、図6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、穴面の摩擦係数も等しくなっている。その他の各々の組合せではベアリング部の結晶面はほぼ等しい結晶面ではあるが、矢印の方向が互いに逆で、そのため、穴面の摩擦係数にも差異が生じている。むしろ、互いに対向する位置ではないが、45°と315°そして、135°と225°方向に注目すると、互いに等価な結晶面であり、しかも、矢印方向も等価で、その穴面の摩擦係数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ことではあるが、本実験の摩擦係数の測定値が妥当である証左になっている。

5. 伸線が湾曲する単結晶ダイヤモンドダイスの傾斜による湾曲の抑制

5.1 ダイス傾斜装置

ダイスを傾斜させて伸線でき、また、傾斜したダイス穴面の摩擦係数を測定できる装置を製作した。

5.2 ダイス傾斜による伸線の湾曲抑制結果

図7は単結晶ダイヤモンドダイスD1およびD2ダ

イスを傾斜させて行った実験結果を一括して示す。

まず、図7上段の円グラフ【a-1】および【b-1】は伸線の湾曲方向と湾曲の曲率を示す。円グラフ中の○印はダイスを傾けない場合の値であり、その他の印はダイス傾斜の値である。ダイスを傾斜させる方向はダイスD1に対しては112.5°-292.5°を軸に22.5°の位置(NNE)をダイスの入口側に倒す傾斜を正の傾斜角とした。ダイスD2では、45°-225°を軸に135°の位置(SE)をダイス入口側への傾斜角を正とし打点した。

図7の【a-1】では正方向1°に傾斜させると湾曲はさらに大きくなり、逆の-0.5°で抑制されるが、さらに負方向-1°では反対方向に再び湾曲は大きくなる。【b-1】も同様で、いずれも湾曲を最小にするダイスの傾斜角があることが分かる。このことを湾曲方向は問わずに湾曲の曲率のみの値で整理したのが折れ線グラフ【a-1'】および【b-1'】である。これらのグラフからも湾曲を最小にする傾斜角があることが分かる。

図7の中段はダイス穴面の黄銅細線(φ0.35 mm)による摩擦係数分布を示す。図中の▽印はダイスを傾斜させない場合で▼印は湾曲を最小にするよう傾斜させた場合の穴面の摩擦係数である。各々円グラフ【a-2】、【b-2】そして、折れ線グラフ【a-2'】、【a-2''】と【b-2'】、【b-2''】にそれぞれ表した。湾曲が最小になるダイス傾斜の場合、穴面のすべての方向で摩擦係数が少し低くなると共に大小差も少なくなり、摩擦係数が平準化されることが分かった。

図7の下段は伸線の外周面の硬さ分布で、◇印はダイスを傾斜させない場合、◆印は湾曲を最小にする傾斜角での伸線のものである。上段の湾曲の円グラフの【a-1】および【b-1】中に矢印をつけた○および■の伸線について測定した値を各々一例として示している。小さな中心近くの◆印の値は伸線前の素線の硬さである。伸線の硬さの偏りもダイス傾斜により平準化されていることが分かる。

これらの実験結果からダイスを傾けると湾曲が小さくなることが分かった。しかし、完全に湾曲をなくすることができるのか、あるいは一定の湾曲以下にはできないのかなどの疑問が残る。今後の課題としたい。

6. 伸線が湾曲しない単結晶ダイヤモンドダイスの穴軸結晶方位の推測

6.1 伸線が湾曲しないダイスの結晶方位予測

ダイヤモンドダイスの穴面の摩擦特性がすべて等しくはなり得ない。伸線が湾曲しないためには対向する穴面の摩擦特性が各々互いに等しくなるか、あるいは、穴軸対称に穴面全周の摩擦特性が平衡状態になるようにしてやることである。

このような位置は単結晶ダイヤモンドが立方晶であ

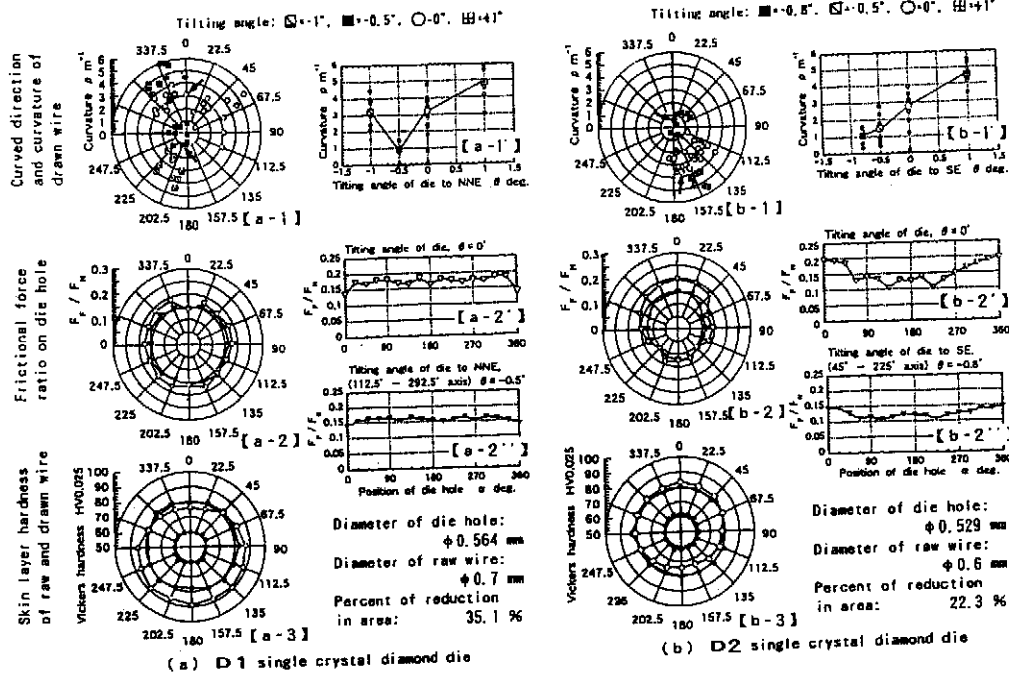


図7 ダイス傾斜による伸線の湾曲抑制

るので、代表的な三面しか存在しない。図3中のA、BおよびCダイスがそれらのダイグラムである。正確には実際に製作したダイスの測定結果について描いている(φ1.0 mm)。穴軸結晶面は各図の下にメルカトル法表示の緯度、経度として記し、わずかな製作誤差がある。図3のAおよびBダイスでは穴面の対向する結晶面が等価で、線材の摩擦方向も等価であることは図から明らかである。Cダイスは対向する結晶面が等価ではなく、120°ごとに等価になり、3回対称になっていて、互いに三脚状・かなえ状を呈し穴面全周にわたって平衡する状態で、伸線は湾曲しないはずである。

図3のD1、D2、E、FおよびGダイスは上述の条件を満足しないのは明らかで、このことから、伸線が湾曲しないダイスは三代表面以外にはない。

6.2 穴軸結晶面が三代表面の単結晶ダイヤモンドダイスによる伸線

図8は穴軸結晶面が三代表面のダイスによる伸線の実験結果を一括して示す。図8の最上段に示す伸線の湾曲はいずれの場合もその曲率が1 m⁻¹以下であり、D1、D2に比べ、極めてわずかな湾曲しか生じていない。

図8の2、3段目に示す穴面の摩擦力比は各々異なる。まず、(a)の(100)のAダイスでは、【a-2'】の折れ線グラフで明らかなように4周期の高低が測定されている。これは図3のAとしてステレオ投影図からも明らかなように、このベアリング部は{100}と{110}の間の結晶面群([100]晶帯に相当)を[100]方向に4周期の形態を持つこととよく符号している。

つぎに図8(b)の(110)のBダイスでは【b-2'】に示す穴面の摩擦力比に少し偏りが生じている。これはダイスが図3のBに示すようにわずかではあるが、1.5°偏っているためと思われる。その結果、【b-2'】では少し回転してずれているが、ほぼ2周期の摩擦力比を呈している。しかし、このずれは対向する面同士で大きな差はなく、伸線時には摩擦力の平衡が保たれて、伸線の湾曲にはほとんど影響を及ぼしていない。

図8(c)の(111)のCダイスでは穴面の摩擦力比は

図3のCから、120°ごとの3周期の変化を呈するはずで、この図からは120°ごとの明瞭な周期性が認められないが、3つの高低がある。しかし、その差はわずかであるので伸線は湾曲も少なく、【c-3】に示すように表面の周方向硬さ分布もほぼ一律の値を示している。

以上、結晶の三代表面を穴軸結晶面とするダイスは伸線の湾曲が極めて少なく、優れたダイスであると推測した通りであることが証明できた。

7. 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の周方向分布などを測定して以下のことが明らかになった。

- (1) 拘束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の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、曲率および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い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。
- (4) 伸線が湾曲する結晶方位のダイスであっても、ダイスを適当な方向に傾斜させて伸線すると、湾曲は抑制される。そのような状態においては黄銅細線によるダイス穴面の摩擦力比分布は平準化され、伸線表面の周方向硬さ分布も均一化される。
- (5) 伸線が湾曲しない穴軸は互いに対向する穴面の結晶方位が等しいか、もしくは3周期で繰返されていて穴面の周全体において平衡する場合と予測できる。
- (6) (5)のような穴軸結晶面は(1)の展開図上において、単結晶ダイヤモンドの三代表面であり、そのよ

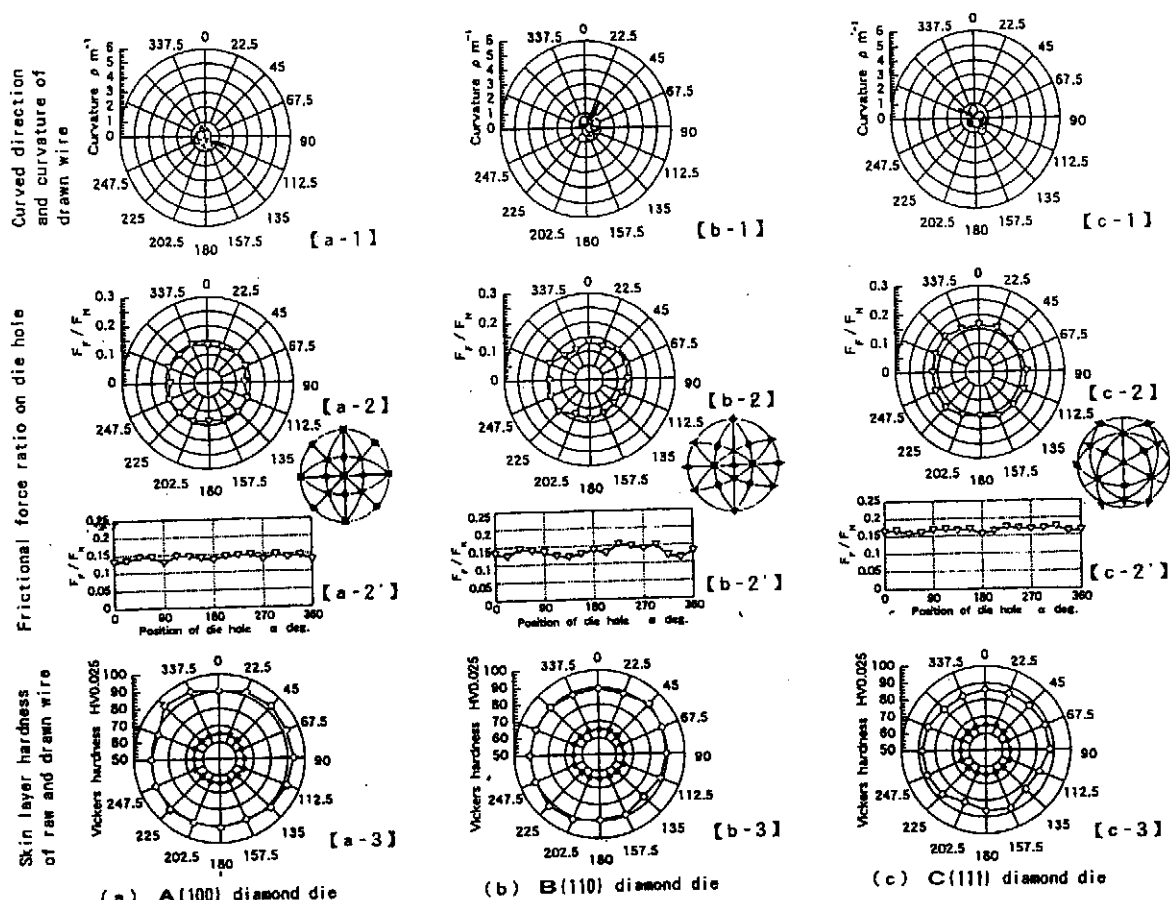


図8 三代表面を穴軸結晶面とするダイスによる伸線

うなダイスを製作し伸線した結果、湾曲が起こらないか、もしくは極く低くなる。

参考文献

- 1) 上神, 他3名, 精密工学会誌, 54, 11 (1988) 2138.
- 2) 上神, 他4名, 精密工学会誌, 56, 6 (1990) 1036.
- 3) 張, 上神, 他3名, 精密工学会誌, 59, 2 (1993) 281.
- 4) K. K. JANG, K. UEGAMI, et al., Int. J. of JSPE., Vol. 28, No. 1, (Mar. 1994) 23.
- 5) 上神, 他5名, 精密工学会誌, 60, 5 (1994) 693.
- 6) 上神, 他6名, 精密工学会誌, 60, 10 (1994) 1455.
- 7) K. UEGAMI, et al., J. of Mech. Working Tech, 17 (1988) 147.
- 8) K. UEGAMI, et al., Progress in Precision Eng. Proc. 6th IPES, 2nd Int. Con. Ultraprec. Manf. Eng. Braunschweig, Germany, (1991) 392.
- 9) K. UEGAMI, Proc. 7th Int. Prec. Eng. Seminar, 5 (1993) 657.
- 10) K. UEGAMI, Proc of the 8th Annual Meeting ASPE, Nov. 7~12 (1993) 258.
- 11) 上神, 精密工学会1992年度関西地方定期学術講演会講演論文集, (1992) 71.
- 12) 上神, 科学と工業, 68, 10 (1994) 508.
- 13) 上神, 精密工学会誌, 61, 6 (1995) 759.
- 14) D. M. Rainier: How Gem diamonds Fashioned, Ind. Dia. Rev., Sep. (1970) 350.
- 15) T. Nishiguchi, M. Masuda and Y. Maeda: Advanced Grinding Technology for Precision Diamond Cutting Tools-Improving Accuracy of Tool Geometry, 5th Int. Prec. Eng. Seminar, Sept. (1989) 183.
- 16) 吉川, 昭和57年度精機学会秋期大会学術講演会講演論文集, (1982) 404.
- 17) Y. Enomoto and D. Tabor: The Frictional Anisotropy of Diamond, Proc. Roy. Soc. Lond., A, 373, (1981) 405.
- 18) F. B. Bowden and C. A. Brookes: Frictional Anisotropy in Nonmetallic Crystal, Proc. Roy. Soc. Lond., A, 295 (1966) 244.
- 19) M. Casey and J. Wilks: The Friction of Diamond Sliding on Polished Cube Faces of Diamond, J Phys. D: Appl. Phys., 6 (1973) 1772.
- 20) E. M. Wilks and J. Wilks: The Resistance of Diamond to Abrasion, J. Phys. D, Appl. Phys., 5 (1972) 1902.
- 21) ダイヤモンド工業協会編: ダイヤモンド工具マニュアル, (株)工業調査会, (1979) 1902.
- 22) 合成ダイヤモンド単結晶スミクリスタル, 住友電工カタログ, (1993) 6.
- 23) 特集「超精密切削技術」精密工学会誌, 52, 12 (1986) 1995~2031.
- 24) 次世代の超精密加工技術編集委員会: 次世代の超精密加工技術, 上巻, 下巻, 産業技術サービスセンター, (1993).
- 25) 小林 昭彦: 超精密生産技術体系, 第2巻, 実用技術, フジテクノシステム, (1994).
- 26) Gordon Davies: Diamond, King's College, London, Adam Hilger Ltd, Bristol.
- 27) L. E. Field: The Properties of Diamond, Academic Press, London.
- 28) 稻敷直次: 金属引抜-加工と繊維組織-, 近代編集社, (1985).
- 29) 稻敷直次: 引抜き加工-基礎から先端技術まで-, (社)日本塑性加工学会編, 塑性加工技術シリーズ6, (1997), コロナ社.
- 30) 鈴木弘福: 塑性加工 (改訂版), 養華房, (1993) 177.
- 31) JIS Z 2244-1992, ビッカース硬さ試験方法, 5.
- 32) 公開特許公報(A) 平3-43106: ダイヤモンド結晶方位の表示方法および結晶方位の読み取り具
- 33) JIS B 4132-1983, ダイヤモンド線引ダイス.
- 34) JIS Z 2244-1992, ビッカース硬さ試験方法, 5.
- 35) 上神, 精密工学会誌, 63, 9 (1997) 1251.
- 36) 上神, 精密工学会誌へ投稿中.