

北海道大学工学部 ○高木 修 栗原賢二 柴田隆行 高橋義美 牧野英司 池田正幸

要旨

ダイヤモンドバイトを用いて銅単結晶の超精密切削実験を行い、背面反射ラウエ法および透過型電子顕微鏡により切削面の加工変質層を評価した。その結果、すべり面をすべり方向に切削した場合には、ひずみが小さく、切削面はほぼ単結晶の状態を保っていた。その他の場合では、切削面では結晶の回転が起こり、その深さは約 $3\mu\text{m}$ であった。

1. はじめに

近年、分子動力学法をはじめとする計算機シミュレーションにより超精密切削機構を解明しようとする研究が行われている。しかし、実際に切削面を結晶学的に評価した研究はほとんど行われていない。そこで本研究では銅単結晶の超精密切削を行い、背面反射ラウエ法および透過型電子顕微鏡により加工変質層を評価し、切削面の結晶方位および切削方向の影響を検討した。

2. 実験装置および方法

切削実験には超精密旋盤（日立精工製DPL-100）を使用した。工具は単結晶ダイヤモンドR刃バイト（すくい角 0° 、逃げ角 5° 、ノーズ半径 2mm ）を使用した。銅単結晶は、純度 99.9999% の高純度銅を用いてブリッジマン法により作製した。背面反射ラウエ法により結晶方位を測定し、所定の方位に切断して切削試料（直径 10mm 、厚さ 1mm ）とした。切削条件は、切込み量 300nm 、工具送り量 $10\mu\text{m}/\text{rev}$ 、スピンドル回転数 1000rpm （切削速度 $2.57\sim 3.72\text{m/s}$ ）とした。切削面および切削方向は、図1に示すように (110) 面では $[\bar{1}10]$ 方向とそれに垂直な $[001]$ 方向、 (111) 面では $[\bar{1}10]$ 方向とそれに垂直な $[11\bar{2}]$ 方向とした。以後、それぞれを試料(A)、(B)、(C)、(D)とする。

3. 実験結果および考察

図2は試料(A)の切削面の微分干渉顕微鏡写真とあらさ曲線である。切削面には、送り量に対応した約 $10\mu\text{m}$ 間隔の送りマークが見られる。表面には大きな凹凸は見られず、表面あらさは約 $16\text{nmR}_{\text{max}}$ である。また、他の試料(B)~(D)においても切削面性状はほぼ同様であり、切削面の結晶方位および切削方向の影響は認められなかった。

図3は切削面を背面反射ラウエ法により評価した結果である。図中の矢印は切削方向を表している。試料(A)では、 $\{221\}$ 、 $\{120\}$ 、 $\{551\}$ 面に対応した回折斑点が切削方向に長くなっている。これは切削面に平行でかつ切削方向に垂直な方向を軸にして、それぞれの面が回転していることを意味している。試料(B)でも $\{221\}$ 、 $\{120\}$ 、 $\{551\}$ 面に対応した回折斑点が切削方向に長くなっており、試料(A)と同様に結晶が回転していることがわかった。写真から試料(A)、(B)ともに回転角はいずれも約 6° と求められた。すべり面である (111) 面をすべり方向 $[\bar{1}10]$ 方向に切削した試料(C)では、いずれのスポットも円形であり、ひずみが非常に小さく、結晶の回転もほとんど起こっていないことがわかった。一方、切削方向をすべり方向に垂直な $[\bar{1}12]$ 方向とした試料(D)では、写真から $\{133\}$ 、 $\{211\}$ 面の回

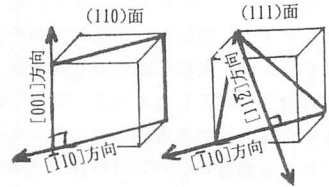


図1 切削面および切削方向

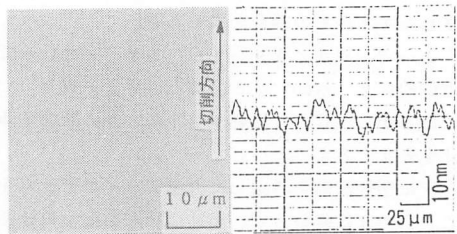


図2 切削面性状

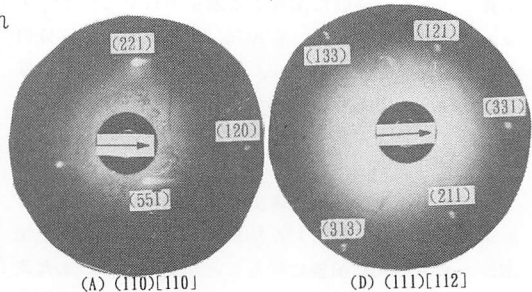


図3 切削面のX線写真

折斑点が切削方向に長くなっていることがわかる。これより、切削方向に垂直な方向を軸にいずれの面も約 2° 回転していることがわかった。

試料(A)、(B)、(D)について、切削面を $0.2\sim 0.3\mu\text{m}$ ずつエッチングし背面反射ラウエ法により評価すると、いずれも深さ $3\mu\text{m}$ 程度で、回折斑点が円形となった。このことから、すべり面をすべり方向に切削する場合以外は、切削面表層約 $3\mu\text{m}$ で結晶の回転が起こっていることがわかった。

図4は、切削面表層の電子線回折像であり入射電子線の方向は切削面に垂直となっている。試料(A)の電子線回折像には、回折斑点 α のように切削面である(110)面に垂直に入射したときの回折図形（以後(110)面の回折図形と呼ぶ）以外に、回折斑点 β のように(130)面の回折図形が認められる。面指数の特定はできないが、おそらく(130)面が切削面に平行でかつ切削方向に垂直な方向を軸に回転し切削面に現れているものと思われる。試料(B)では回折斑点 α のように(110)面の回折図形が認められるが、個々の回折斑点の強度は弱くなっている。これに対し切削面とは異なる(310)面の回折図形（回折斑点 β 、 δ ）がはっきりと認められる。これより(130)または(310)面が切削方向と垂直な方向を軸に回転し、さらに切削面内でも回転していると思われる。つまり、ねじれを伴った回転により切削面に現れていると考えられる。さらに強度的には弱いですが先に述べた(110)面の回折図形に対し、切削面内で約 25° 回転した位置に別の(110)面の回折図形（回折斑点 γ ）も認められる。このことから、切削面である(110)面自身もその面内で回転している。すべり面(111)面をすべり方向 $[\bar{1}10]$ 方向に切削した試料(C)では、回折斑点 α のように(111)面の回折図形がおもに観察され、表層の結晶はほとんど回転していないといえる。一方、すべり方向に垂直な $[11\bar{2}]$ 方向に切削した試料(D)では、切削面である(111)面の回折図形は弱くなっており、切削面とは異なる(211)、(100)、(110)面の回折図形が現れている。このように試料(D)では、結晶が回転し切削面には多数の面が現れていることがわかる。

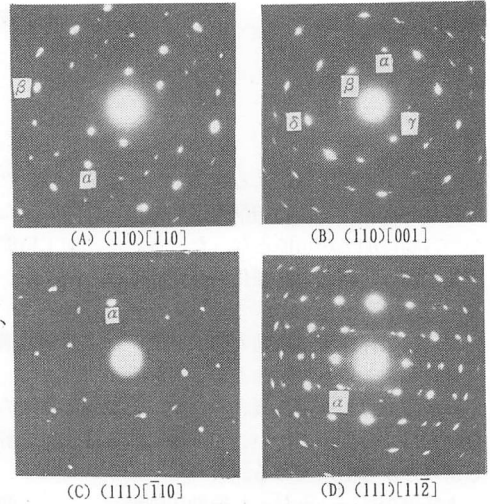


図4 切削面の電子線回折像

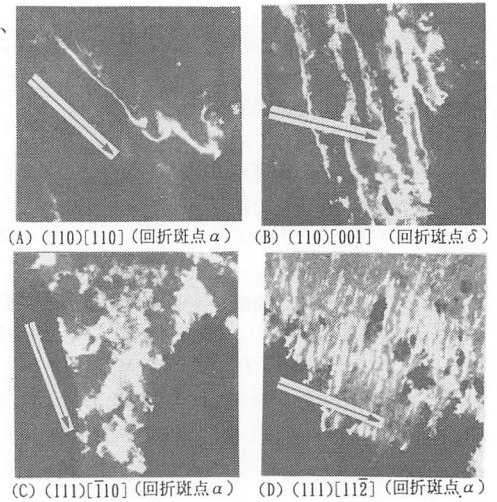


図5 各回折斑点に対応した暗視野像 $3\mu\text{m}$

図5は図4の各回折斑点に対応した暗視野像であり、白く光っている部分は同じ方位の結晶粒である。また、図中の矢印は切削方向を表している。試料(A)では、切削方向に垂直な方向では結晶方位が異なっているが、切削方向、すなわちすべり方向に細長い単結晶粒になっている。試料(B)では、切削方向では結晶方位が異なっており、むしろそれと垂直なすべり方向に近い方向に細長い単結晶粒になっている。すべり面をすべり方向に切削した試料(C)では、一様に白く光っており切削面はほぼ単結晶の状態を保っているといえる。試料(D)では、個々の結晶粒は非常に小さくなっているが、切削方向に垂直な方向であるすべり方向に細長い単結晶粒が見られる。このようにすべり面をすべり方向に切削する場合以外は、切削面での結晶はすべり方向に沿った領域で単結晶の状態を保っており、変形がすべり方向に沿って起こっていることがわかる。

4.まとめ

- (1) すべり面をすべり方向に切削した場合は、切削面のひずみは小さく、結晶の回転を伴わないすべりが起こっている。
- (2) すべり面をすべり方向に切削した場合以外では、結晶の回転が起こり、その深さは約 $3\mu\text{m}$ である。