銅単結晶の微小2次元切削機構に関する研究*

岩田 一 明** 谷 口 仁 啓*** 真 鍋 圭 司†
奥 田 孝 一†† 愛 原 惇 士郎††† 杉 村 延 広†

A Study on Orthogonal Micro Machining of Single Crystal Copper

Kazuaki Iwata, Yoshihiro Taniguchi, Keiji Manabe, Koichi Okuda,
Junshiro Aihara and Nobuhiro Sugimura

This paper deals with a direct observation of orthogonal micro machining process of single crystal copper with use of a scanning electron microscope (SEM). An orthogonal machining equipment is newly developed and equipped in the SEM, and orthogonal micro machining experiments in the SEM are carried out by applying single crystal diamond tools for various depths of cut from 5.0 μm down to 0.1 μm . The relative direction between the cutting direction and the crystallographic orientation is changed in the experiments. Effects of the cutting direction against crystallographic orientations and the depth of cut are discussed from the viewpoints of chip formation process, cutting forces and surface finish.

Key words: orthogonal micro machining, single crystal, cutting mechanics, chip formation process, cutting forces, surface finish

1. 緒 言

近年、生産加工の分野では切込みがサブミクロンレベルの超精密切削加工技術の確立が重要な課題と認識され、各種被削材に対する超精密切削加工に関する研究、開発が盛んに行われている。切込みがサブミクロンの微小切削では、被削材の結晶粒の大きさが切込みより相対的に大きくなるため、切削時における個々の結晶粒の挙動が切削機構に大きく影響する。このため、超精密切削加工技術を確立するには、単結晶材料の微小切削機構の解明が重要となる。

従来より、単結晶材料あるいは粗大結晶材料の切削機構に関する研究はいくつか行われてきており^{1)~5)}、結晶の異方性が切りくず生成過程、切削力などに与える影響について検討されてきている。しかし、切込みが1 μm 以下の微小切込みにおける単結晶材料の切削

機構に関する研究はほとんど行われていない。

そこで、本研究では、銅単結晶材料の走査型電子顕微鏡 (SEM) 内微小極低速2次元切削実験を行い、切込みがミクロンオーダーおよびサブミクロンオーダーの場合について、結晶方位が切りくず生成過程、仕上げ面性状ならびに切削力に与える影響を検討する。

2. 実験装置ならびに実験方法

2. 1 SEM内微小2次元切削装置

切込みが1 μm 以下の微小2次元切削過程をSEM内で直接観察するために開発した切削装置の概要を図1に示す。本切削装置は、同図(a)に示すように、SEM試料室に取り付けられ、2次元切削過程を側面から直接観察するとともに、切削力の測定を行う。切削装置本体の主要部を同図(b)に示す。工具および被削材は⑥の工具台および⑧の試料台に取り付ける。切込みは、①のくさび(粗動用)および②のピエゾアクチュエータ(微動用)を用いて設定する。切削送り、③のピエゾアクチュエータ(低速用)または外部に取り付けたモータ(高速用)により、試料台を送ることで実行する。切削力は、工具台下部に取り付けた水晶圧電型3分力測定装置により測定する。

切削送り運動の真直度については、切削送りと与えた場合の工具台-試料台間の切込み方向の変位を電気

* 原稿受付 平成2年12月13日。1989年度精密工学会秋季大会学術講演会(平成元年11月6日)にて発表

** 正会員 大阪大学工学部(吹田市山田丘2)

*** シャープ(株)(天理市樺本町2613-1)

† 正会員 神戸大学工学部(神戸市灘区六甲台町)

†† 正会員 神戸工業高等専門学校(神戸市西区学園東町8-3)

††† 正会員 明石工業高等専門学校(明石市魚住町西岡)

1. Sliding wedge for setting depth of cut (rough)
2. Piezo-electric actuator for setting depth of cut (high resolution)
3. Piezo-electric actuator for cutting feed (low speed)
4. Piezo-electric force transducer
5. Slider
6. Tool stage
7. Tool
8. Work stage
9. Workpiece

(b) Main part

Fig. 1 Micro machining equipment built in SEM

マイクロメータで測定した結果、 $20\mu\text{m}$ の往復運動に対して、真直度は $0.02\mu\text{m}$ 以下、再現性は $0.03\mu\text{m}$ 以下となっており、 $1\mu\text{m}$ 以下の切込みに対して十分な精度を保っていると判断できる。

2. 2 被削材および実験条件

面心立方型(FCC)の結晶構造を持つ銅単結晶の場合、すべり系は(111)[110]系であり、4つのすべり面と各すべり面に対して3つのすべり方向が存在する。これ

Fig. 2 Slip systems of FCC metals and cutting directions

らの12のすべり系は、図2に示すように、正4面体で表現できる。この正4面体において、重心G、頂点B、稜線BCの中点Eおよび重心Gから(111)面に垂ろした垂線の足Fの4点からなる4面体GEFBを考えると、この4面体を24個組み合わせることで全体の正4面体を構成することができる。したがって、切削方向として、この4面体GEFBの頂点Gから面EFBをつらぬくすべての方向をとれば、すべり系と切削方向のすべての組合せを実験できることとなる。そこで、本研究では、切削方向を以下のようにとり、切削実験を行った。

(1) (110)面を切削側面とする場合

(110)面を切削側面とし、切削方向を[001]方向から $[00\bar{1}]$ 方向まで変化させる。すなわち、図2において、線分EDおよびDH上の点と重心Gを結ぶ直線を切削方向とする。これにより、3角形EFBの各辺上の点と重心を結ぶ方向をカバーできる。結晶方位と切削方向の関係を図3(a)に示す。以下では、この場合を(110)側面切削と呼び、切削方向と[001]方向のなす角度を α で表す。

この切削の場合、すべり系は(110)面に対して面対象となるため、変形は2次元的になると考えられる。

(2) (111)面を切削面とする場合

(111)面を切削面とし、切削方向を $[11\bar{2}]$ 方向から $[2\bar{1}\bar{1}]$ 方向まで変化させる。すなわち、図2において、線分IJ上の点と重心Gを結ぶ直線を切削方向とする。これを、3角形EFB上で表すと、線分I'K, KJ'となる。この場合の結晶方位と切削方向の関係を、図3(b)に示す。以下では、この場合を(111)面切削と呼び、切削方向と $[11\bar{2}]$ 方向のなす角度を β で表す。

(a) Side plane is (110)

(b) Machined plane is (111)

Fig. 3 Stereographic projection of crystal orientation and cutting direction

Table 1 Cutting conditions

Cutting tool	Single crystal diamond tool
Tool geometry	Straight cutting edge Rake angle = 20° Relief angle = 5°
Cutting speed	120 μ m/min
Depth of cut	0.1 - 5.0 μ m
Cutting width	500 μ m

実験用試料は、銅単結晶よりワイヤカット放電加工により切り出し、加工変質層を除去するためエメリ研磨および電解研磨を行い、 $7 \times 5 \times 0.5$ mmの矩形試料に仕上げた。また、結晶方位は、背面反射ラウエ法により同定した。

工具は、直線切れ刃を持つ単結晶ダイヤモンド工具を用いた。工具形状ならびに実験における切削条件を表1に示す。この条件にしたがって予備的な切削実験を行った結果、切込みがミクロンオーダーの場合とサブミクロンオーダーの場合で切りくず生成過程、切削抵抗などが変化することがわかったため、以下では切込みが5.0 μ mおよび0.33 μ mの場合を代表例として実験結果を示すとともに、考察を行う。

3. 実験結果および考察

3. 1 切りくず生成過程

切込みを5.0 μ m、0.33 μ mに設定した場合の切りくず生成過程の観察例を図4に示す。また、各種の切削方向に対して、切りくず生成過程の写真から求めたみ

かけのせん断角、および長谷川らの手法²⁾に基づきシュミット因子とすべり系との関係より求めたせん断角の計算値を図5に示す。

図4から明らかなように、いずれの切削条件の場合にも、層状すべり構造を伴う連続型切りくずが生成されている。

切込みが5.0 μ mの場合は、結晶方位と切削方向の関係が変化すると、切りくず形状およびせん断角とも大きく変化している。また、せん断角の測定値と計算値は、比較的よく一致している。このうち、

(110)側面切削の場合、図4(a)に示すように、いずれの切削方向に対しても一次塑性

域に顕著なすべり帯は観察されず、変形域は主せん断域近傍に限られている。主せん断域における変形状態を考えるため、切削方向に対する2つのすべり面($\bar{1}11$)および($1\bar{1}1$)の位置関係とせん断角の関係を調べた。すなわち、これら2つのすべり面のうち、切削方向に対して前上がりとなるすべり面を(110)面に投影し、この投影線と切削方向のなす角度を ψ とする。そして、 ψ とせん断角の測定値を比較すると表2のようになる。この表から明らかなように、前上がりのすべり面が切削方向に対して適当な範囲内に存在する場合、すなわち ψ が約 20° から 56° の範囲をとる場合には、せん断角はほぼ ψ に一致する。したがって、(110)側面切削においては、切削方向に対する前上がりのすべり面が適当な範囲内に存在する場合、主にこのすべり面における2つのすべり方向が、主せん断域においてほぼ等価に活動してせん断変形が行われていると考えられる。

これに対して、(111)面切削の場合、図4(b)、図5(b)に示すように、 β が 0° から 20° の範囲と、 30° から 60° の範囲とで、切りくず形状およびせん断角が変化する。すなわち、 β が 20° 以下の範囲では、せん断角が小さく、切りくず厚さが厚くなっている。これに対して、 β が 30° 以上になると刃先前方の比較的広い範囲でせん断域が形成され、せん断角が小さく、切りくず厚さが薄くなる。これは、 β が 30° 以上になると、($\bar{1}11$)面が前上がりのすべり面となり、せん断変形に関与するためと考えられる。

$\alpha = 73^\circ$

(a) Side plane is (110), Depth of cut = 5.0 μm

$\alpha = 125^\circ$

$\alpha = 145^\circ$

(c) Side plane is (110)
Depth of cut = 0.33 μm

$\beta = 20^\circ$

(b) Machined plane is (111), Depth of cut = 5.0 μm

$\beta = 40^\circ$

$\beta = 20^\circ$

(d) Machined plane is (111)
Depth of cut = 0.33 μm

Fig. 4 SEM observation of chip formation process

(a) Side plane is (110)

(b) Machined plane is (111)

Fig. 5 Shear angle

切込みが $0.33\mu\text{m}$ の場合、図4(c)および(d)の切りくず生成過程および図5に示すせん断角とも、切削方向に対する結晶方位の影響をほとんど受けて、切込みが $5.0\mu\text{m}$ の場合と比較してせん断角は小さくなっている。

Table 2 Relation between angle of slip plane and shear angle

Cutting direction	α	0	20	35	55	73	90	108	125	145	160	180
Angle of slip plane	ϕ	35	15	0	90	72	55	37	20	70	56	35
Shear angle	ϕ	38	27	15	29	60	57	38	29	34	49	40

3. 2 切削抵抗

図6は、被削材の単位幅当たりの切削抵抗の測定値、ならびに切込みが $5.0\mu\text{m}$ の場合について計算した単位幅当たりの主分力を示す。

図から明らかなように、切込みが $5.0\mu\text{m}$ の(110)側面切削の場合、切削方向の変化に伴って切削抵抗、特に主分力が大きく変化している。この主分力の変化パターンと図5のせん断角の変化パターンを比較すると、せん断角が大きいと主分力が小さくなることが認められる。このことは、せん断角が大きくなると主せん断領域が狭くなり、主分力が小さくなることから説明できる。他方、(111)面切削の場合は、せん断角と主分力の間の明確な関係は認められない。これは、図4(b)の例からもわかるように、せん断域が拡大し、複雑な変形が生じているためと考えられる。

切込みが $0.33\mu\text{m}$ の場合、切削抵抗は切削方向の変化の影響をほとんど受けない。これは、切込みが小さくなるにつれて前加工時に生じた加工変質層を切削する割合が増えるためと考えられる。また、背分力の大きさは切込みが $5.0\mu\text{m}$ の場合と同等になっている。これは、切込みが小さくなるにつれて工具刃先丸みが相対的に大きくなり、実質的にはすくい角の小さな工具で切削するのと同等になるためと考えられる。

図6における主分力の計算値は、単結晶の塑性変形の解析手法²⁾を適用して求めたものである。その計算手順を以下に示す。

すなわち、せん断域におけるひずみ速度、結晶方位ならびに臨界せん断応力から、最大塑性仕事の原理および最小せん断の原理に基づいて、塑性仕事率 dW を求める。この dW が、せん断面におけるせん断仕事率となる。切削過程における仕事は、主としてせん断仕事と工具すくい面における摩擦仕事であり、通常切削の場合、その比は7:3になると言われている¹⁾。したがって、切削過程全体の仕事率 dW^* は、

(a) Side plane is (110)

(b) Machined plane is (111)

Depth of cut = $5.0\mu\text{m}$

—●— Calculated value of principal force
—○— Experimental value of principal force

---●--- Experimental value of thrust force

Depth of cut = $0.33\mu\text{m}$

—□— Experimental value of principal force

---■--- Experimental value of thrust force

Fig. 6 Cutting force per unit width of cut

$$dW^* = 10/7 \times dW \quad (1)$$

となる。この仕事率は、主分力 Ph と切削速度 v の積となるため、主分力は、

$$Ph = dW^*/v \quad (2)$$

となる。上記の計算において、せん断ひずみは実験における切削比から求めた。また、臨界せん断応力 τ に関しては、FCC金属の臨界せん断応力が多結晶体の降伏応力 σ の約1/3になることから²⁾、 $\tau = 70\text{MPa}$ とした。

Fig. 7 Observation of finished surface

以上の手法で求めた主分力方向の切削抵抗は、実験値と定性的にはよく一致している。

3. 3 仕上げ面性状

図7に、切込み $5.0\mu\text{m}$ および $0.33\mu\text{m}$ の場合に得られた仕上げ面の微分干渉顕微鏡写真を示す。同図(a)に示すように、切込みが $5.0\mu\text{m}$ の場合、仕上げ面上に切削方向に直行して周期的な段差が認められる。この周期は、切りくずの層状すべり構造の周期にほぼ対応していると考えられる。図4の切りくずの写真より層状すべり間隔とせん断角を測定し、単一せん断面理論に基づき、層状すべりが仕上げ面上でどのような間隔で生じるかを計算した。(110)側面切削の場合について、計算結果と仕上げ面の写真から測定した段差の周期を比較すると、 $\alpha=73^\circ$ 、 108° 、 125° 、 160° に対して、計算値が約1.0、0.5、0.8、 $0.7\mu\text{m}$ 、測定値が約0.9、0.5、0.6、 $0.7\mu\text{m}$ となり、ほぼ一致している。

また、図7(b)に示すように、(111)面切削で β が 20° 以下の場合には、仕上げ面上に比較的大きな凹凸が認められ、仕上げ面粗さも良くないと判断できる。また、斜め方向のすべり線が観察される。これは、切削方向に対して前上がりとなるすべり面が存在しないため、多数のすべり系が関与した複雑な変形を行っているためと考えられる。

切込みが $0.33\mu\text{m}$ の場合を見ると、切削方向に関係なく切削仕上げ面の性状は良好で、また、周期的な凹凸もほとんど観察されない。

4. 結 言

本研究では、銅単結晶材料の微小2次元切削実験を行い、切込みならびに結晶方位が切りくず生成機構、切削力ならびに仕上げ面性状に与える影響について検討した。本論文では、切込みが $5.0\mu\text{m}$ および $0.33\mu\text{m}$ の実験結果のみを示したが、これ以外の予備的な実験を含め、得られた結果をまとめると以下のようになる。

- (1) 切込みが $5.0\mu\text{m}$ 程度、すなわちミクロンオーダーの場合、切削機構は結晶方位により大きく影響される。特に、切削方向に対して前上がりとなるすべり面が、切削機構に大きく関与する。
- (2) 切込みがミクロンオーダーの場合、結晶方位がせん断角および切削力に与える影響は、従来提案されている解析手法により、定性的に予測可能である。
- (3) 切込みが $0.33\mu\text{m}$ 程度、すなわちサブミクロンオーダーの場合、結晶方位は切削機構にほとんど影響をおよぼさない。切込み $5.0\mu\text{m}$ の場合と比較した場合、せん断角は小さく、背分力/主分力の比は大きく、仕上げ面性状は良好になる。
- (4) (3)の原因として、前加工時の加工変質層の影響、ならびに切込みに対する工具刃先丸みの比が大きくなることがあげられる。

参 考 文 献

- 1) S. Ramalingam and J. T. Black: On the Metal Physical Considerations in the Machining of Metals, Trans. ASME, 94, Feb. (1972) 1215.
- 2) 長谷川嘉雄, 花崎伸作, 安富雅典: Fe-3.5%Si粗大結晶の切削機構, 日本金属学会誌, 39, 8 (1975) 809.
- 3) 長谷川嘉雄, 花崎伸作, 安富雅典, 木下賢二: 銅粗大結晶の切削機構, 日本金属学会誌, 40, 9 (1976) 881.
- 4) K. Iwata and K. Ueda: The Significance of Dynamic Crack Behaviour in Chip Formation, Ann. of the CIRP, 25/1/, (1976) 65.
- 5) 佐藤元太郎, 加藤良雄, 土屋和博, 青木正一: アルミニウム単結晶の切削機構に及ぼす結晶方位依存性, 日本機械学会論文集(C編), 41, 414 (1981) 201.
- 6) 大久保忠恒: すべり変形する立方金属の拘束条件下の塑性変形, 塑性と加工, 9, 93 (1968) 681.
- 7) 臼井英治: 切削・研削加工学, 上, 切削加工, 共立出版, (1981) 22.
- 8) G. I. Taylor: Plastic Strain in Metals, J. Inst. Metals, 62, (1938) 307.