



## アモルファス金属のマイクロ切削に関する研究\*

—Fe系超急冷合金の切りくず生成機構—

上田 完次\*\* 須田 敦彦\*\*\* 杉田 忠彰\*\*

Microcutting of Amorphous Metals

—Chip Formation Mechanism of Rapidly Quenched Fe-base Alloys—

Kanji UEDA, Atsuhiko SUDA and Tadaaki SUGITA

Microcutting mechanism of amorphous metals is elucidated by means of in-situ SEM observation of chip formation process. Orthogonal microcutting tests are conducted on rapidly quenched Fe-base amorphous alloys, using diamond tools with selected rake angles. The depth of cut is employed in the range of 0.5 to 15  $\mu\text{m}$ . The amorphous metals produce so-called card model type chip exhibiting lamellar slip structure, which has been formed due to periodical occurrence of homogeneous plastic deformation in the primary deformation zone and following catastrophic shear along the localized band. The lamellar slip spacing is found to be proportional to the depth of cut. The size effect on the specific cutting force is not obvious. It is also found that the shear stress along the shear zone is almost independent of the depth of cut, the normal stress, the shear strain and the strain rate. These characteristic features being different from conventional crystalline metals are discussed in terms of inherent deformation properties to the amorphous metals.

**Key words:** cutting of amorphous metal, microcutting mechanism, chip formation, lamellar slip structure, catastrophic shear

## 1. 緒 言

アモルファス金属は周知のように、通常の結晶金属とは異なって乱れた原子配列からなり、長周期規則性を有しない。しかし、同じく非晶質であっても無機ガラスや不定形ポリマーなどと異なり、金属結合特有の性質が保存されているため、磁氣的、電氣的、化学的、熱的、さらに、機械的性質などで興味深い特性を多く持っている。例えば、高飽和磁束密度、低鉄損、高電気抵抗、高耐食性、恒熱膨張率、高強度、高硬度などが知られており、各分野で多岐にわたる研究が進められている。

しかしながら、加工の観点からの研究は極めて少なく、これまで報告もほとんどなされていない。いかなる新材料も実用、応用に供し、また、その機能を十分に発揮せしめるには、適切な加工を施さなければなら

ないのは言うまでもなく、加工表面の評価<sup>1)</sup>などとともに加工機構の解明が要求されている。加えて、アモルファス金属は異方性を示さず、従って、特定のすべり系を持たず、さらに転位や粒界、双晶、積層欠陥といった従来の意味での材料欠陥を有しない“等方均質の理想材料”であるため、加工の本質を追及する観点からも興味深い素材と言える。

このような観点から、本研究者らはアモルファス金属のダイヤモンド単刃工具によるマイクロ切削を取り上げ、その切削機構を明らかにして来た。既に、 $\text{Pd}_{80}\text{Si}_{20}$  アモルファス合金を用いて予備的な検討を行っており、その切りくずがいわゆる Pisspanen のカードモデルに類似した形態であることを示した<sup>2)</sup>。引き続き、本論文では軟磁性材料である Fe 系アモルファス合金の切りくず生成過程を SEM（走査型電子顕微鏡）で直接観察することにより、従来の結晶金属とは異なった切削機構上の幾つかの特徴を見出したので、それについて報告する。なお、本報告では現象論的な検討にとどめ、詳細な考察は次報で行う予定である。

\* 原稿受付 昭和 62 年 1 月 27 日、昭和 57 年度精機学会秋季大会学術講演会（昭和 57 年 10 月 20 日）にて発表

\*\* 正 会 員 金沢大学工学部（金沢市小立野 2-40-20）

\*\*\* 正 会 員 金沢大学工学部（現、日立マクセル（株）；京都府乙訓郡大山崎町小泉 1）

**Table 1** Material properties of amorphous alloys

Alloy at%	Density g/cm <sup>3</sup>	Young's Modulus GPa	Hardness HV GPa	Crystal. Temp. K
Fe <sub>81</sub> B <sub>13.5</sub> Si <sub>3.5</sub> C <sub>2</sub>	7.32	162	10.3	753
Fe <sub>40</sub> Ni <sub>38</sub> Mo <sub>4</sub> B <sub>18</sub>	8.02	162	10.5	683

## 2. 被削材および実験方法

### 2.1 被削材

被削材としては、超急冷凝固法で作成されたリボン状の Fe<sub>81</sub>B<sub>13.5</sub>Si<sub>3.5</sub>C<sub>2</sub> (METGLAS 2605 SC) および Fe<sub>40</sub>Ni<sub>38</sub>Mo<sub>4</sub>B<sub>18</sub> (METGLAS 2826 MB) の 2 種類のアモルファス合金を用いた。被削材の主な特性を表 1 に示す。両合金は優れた磁性材料として知られており、特に前者は磁束密度が高く鉄損も低いので、トランスの鉄心などで実用化されているものである。

### 2.2 SEM 直接観察法および実験条件

切りくず生成の微視的機構を明らかにするために、本研究では SEM による直接観察を各種被削材について行って来ている<sup>3)4)</sup>。この方法は 2 次元マイクロ切削試験装置を SEM 試料室に装着して、切削過程を 2 次電子像で直接観察するものであり、切込み  $t=0.2\sim 500\ \mu\text{m}$ 、切削幅  $b=0.01\sim 2\ \text{mm}$ 、切削速度  $V=0.02\sim 50\ \text{mm/min}$  の設定条件で、切りくず生成過程を 30~10 000 倍で観察できる。

本実験で採用した切削条件の範囲は、 $t=0.5\sim 15\ \mu\text{m}$ 、 $V=0.02\sim 50\ \text{mm/min}$ 、 $b=25\sim 50\ \mu\text{m}$  である。工具は天然ダイヤモンド単結晶（すくい角  $\alpha=10^\circ\sim 15^\circ$ 、刃先丸み  $\rho=0.05\ \mu\text{m}$  以下）を使用した。切削様式はリボン状試料の厚さ方向を切削幅、長手方向を切削方向とする 2 次元切削とし、 $1.3\times 10^{-3}\ \text{Pa}$  の真空雰囲気中で行った。また、SEM 直接観察と同時に切削抵抗の 2 分力を抵抗線ひずみゲージで測定した。

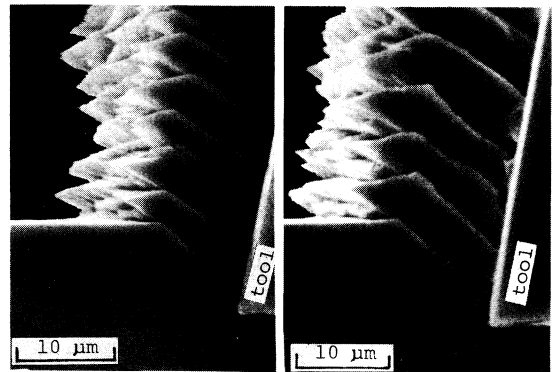
## 3. 実験結果および考察

### 3.1 切りくず形態およびせん断角の特徴

図 1 (a) および (b) は、それぞれ Fe<sub>81</sub>B<sub>13.5</sub>Si<sub>3.5</sub>C<sub>2</sub> および Fe<sub>40</sub>Ni<sub>38</sub>Mo<sub>4</sub>B<sub>18</sub> アモルファス合金の切りくず生成挙動の SEM 直接観察の代表例を示す。切りくずは巨視的には連続しているものの、微視的には主せん断域で刃先から自由面へかけて直線的な層状のすべり構造が明らかに認められる。また、図 2 は低倍率観察例であるが、切りくずの長い範囲にわたり層状すべり構造の規則性がよいことがわかる。このようないわゆる Pissspanen のカードモデルに極めて類似した層状すべり構造は、本研究で採用した全切削条件範囲で観察された。なお、Fe<sub>81</sub>B<sub>13.5</sub>Si<sub>3.5</sub>C<sub>2</sub>、Fe<sub>40</sub>Ni<sub>38</sub>Mo<sub>4</sub>B<sub>18</sub>

の両合金の切りくず生成機構には基本的な差異は認められなかったため、以下では主に前者について示すものとする。

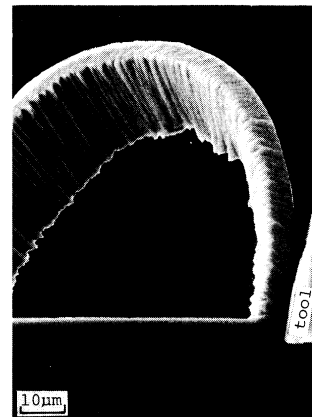
図 3 は、層状すべり方向をせん断方向とみなして、せん断角を SEM 写真から測定した結果を示す。せん断角  $\phi$  はすくい角  $\alpha$  の増大とともに増加しているのが分かる。これは通常の結晶金属でも見られる傾向である。一方、図 4 は  $\phi$  に対する切込み  $t$  の影響を調べたものである ( $\alpha=10^\circ$ 、 $V=1\ \text{mm/min}$  の例)。せん断角は実験した切込みの範囲内で約  $38^\circ$  となり、寸法効果はほとんど認められない。さらに、図 5 は層状すべり間隔  $s$  の測定例であるが、切込み  $t$  に対して、ほぼ直線的に増加しており、切りくず生成に寸法効果はほとんどなく相似則が成立していることが分かる。



(a) Fe<sub>81</sub>B<sub>13.5</sub>Si<sub>3.5</sub>C<sub>2</sub>  
 $\alpha=10^\circ$ ,  $V=1\ \text{mm/min}$ ,  
 $t=9\ \mu\text{m}$

(b) Fe<sub>40</sub>Ni<sub>38</sub>Mo<sub>4</sub>B<sub>18</sub>  
 $\alpha=10^\circ$ ,  $V=1\ \text{mm/min}$ ,  
 $t=12\ \mu\text{m}$

**Fig. 1** Typical in-situ SEM observation of lamellar slip structure during chip formation of amorphous alloys



**Fig. 2** Lower magnification SEM photograph of chip formation  
Workmaterial; Fe<sub>81</sub>B<sub>13.5</sub>Si<sub>3.5</sub>C<sub>2</sub>,  $\alpha=10^\circ$ ,  $V=1\ \text{mm/min}$ ,  
 $t=5\ \mu\text{m}$

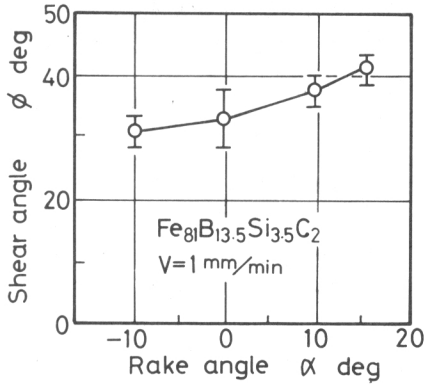


Fig. 3 Variation of shear angle  $\phi$  with rake angle of tool  $\alpha$

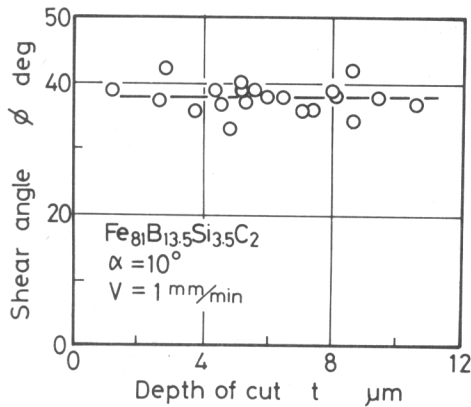


Fig. 4 Shear angle  $\phi$  versus depth of cut  $t$

このような層状すべり構造を呈する切りくずは、結晶金属では認められないアモルファス金属特有の形態といえる。通常の結晶金属では、切削中に粒界や第2析出相、介在物、不純物などの各種欠陥の働きによりき裂やボイドが発生・成長するため、たとえ巨視的に

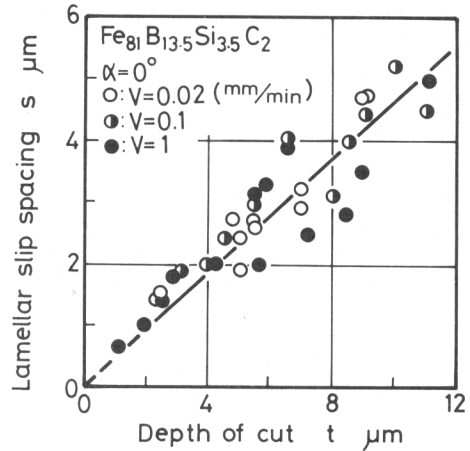


Fig. 5 Relationship between lamellar slip spacing  $s$  and depth of cut  $t$

は連続型であっても、破壊挙動が切りくず生成機構を支配することになる<sup>5)</sup>。そのため、切りくずは層状すべりとはかなり異なった形態となる。また、結晶金属では材料欠陥の存在により、切りくず生成機構が切込みによって大きく影響を受けることも知られている<sup>6)</sup>。ただし、類似の層状組織が単結晶金属を切削した時に見られる場合があるが、それは容易すべり系の活動が支配的となる特定の切削方位に限定されており<sup>7)</sup>、アモルファス金属の場合とは基本的に区別すべきものと考えられる。

以上のようなアモルファス金属に特徴的な切りくず生成機構を詳細に考察するために、その切削挙動をSEMで連続観察した結果を次に示す。

### 3.2 層状すべり構造の生成過程

図6は層状すべり構造生成過程の1サイクル中のSEM連続観察例を示す。試料観察面には変形状態を明らかにするために、あらかじめ切削方向にはぼ平

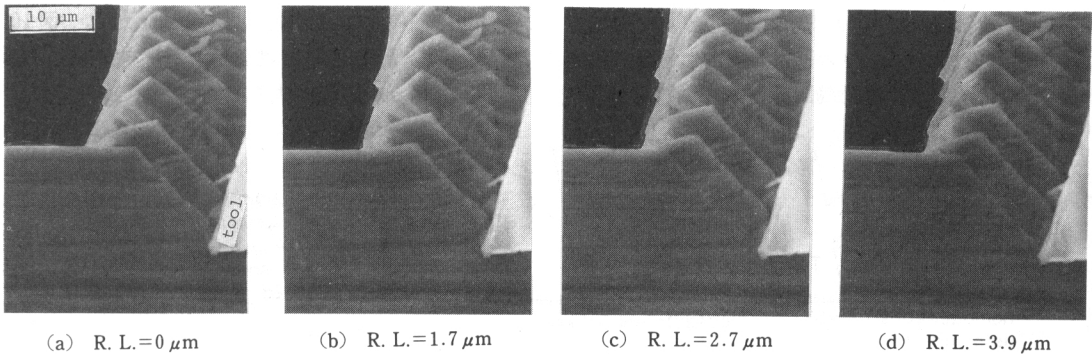


Fig. 6 Successive SEM photographs showing typical behavior of formation of lamellar slip structure during microcutting  
Workmaterial;  $\text{Fe}_{81}\text{B}_{13.5}\text{Si}_{3.5}\text{C}_2$ ,  $\alpha=15^\circ$ ,  $V=0.2 \text{ mm/min}$ ,  $t=12 \mu\text{m}$

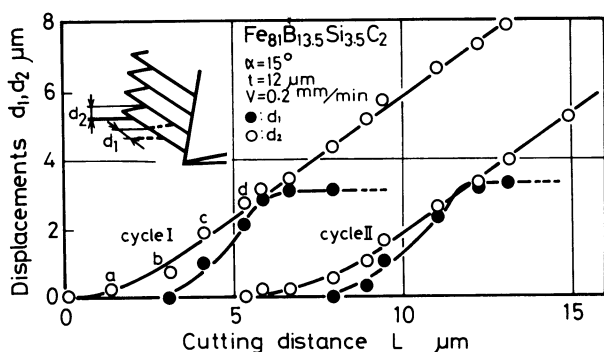


Fig. 7 Variations of displacements  $d_1$  and  $d_2$  with cutting distance  $L$  in association with lamellar slip structure formation

行にポリシング痕をつけている。同図(a)は1サイクル前の層状すべりが完了した時点であり、(b)の段階で新たに刃先が食い込み、自由面に盛上がりが生じているのが分かる。この段階から次の段階(c)までの間に、せん断域で急激なすべりが発生し、段階(d)に至って1サイクルをほぼ終了する。ポリシング痕の屈曲状態から、(a)~(b)間の変形が比較的緩やかであるのに対し、(b)~(c)間に発生するすべりは、極めて局所化された薄い領域で急激に起こっていることが知られる。この局所すべりの起こる領域の厚さは層状すべり間隔の1/100以下であり、観察倍率の制約から過大に評価しても0.05  $\mu\text{m}$ 程度以下であるとみなされる。

この層状すべりの生成過程を数量的に検討するために、せん断面のすべり量  $d_1$ 、および、自由面の盛上がり量  $d_2$  を測定した。せん断すべり量  $d_1$  はポリシング痕のずれより求めた。 $d_1$  および  $d_2$  を切削距離  $L$  に対して示したのが図7である。図7は層状すべりの2サイクルの測定例を示すが、同図中のa, b, c, d点は、図6の(a), (b), (c), (d)にそれぞれ対応する。切削の進行とともに、まず自由面が盛り上がり、 $d_2$  が緩やかに増加する。そして、b~c間で局所すべりが発生し、 $d_1$  は顕著な増加を始め、切削の進行とともに急激に増加する。その後、 $d_1$  はd点近傍ではほぼ飽和値に達し、一

方  $d_2$  は切りくず流出速度に対応する勾配で直線的に増加する。また、d点の少し前の時点で、次のサイクルが始まっていることも知られる。このようなサイクルを繰り返して、層状すべり構造が形成されるものと考えられる。

以上の結果に基づき、アモルファス金属における層状すべりを伴う切りくず生成機構を模式的に示すと、図8のようになる。まず、初期段階では切れ刃の前進に伴い比較的均質な塑性変形が生じ(a)、その後局所化されたすべりが発生し(b)、その進行段階(c)を経て1サイクルを終了する。すなわち、アモルファス金属のマイクロ切削においては、刃先近傍を除けば比較的均質で緩やかな塑性変形が生じ、それに引き続いて局所的で急激なすべりが発生するという、2つの過程が繰り返し起こることによって、切りくず生成がなされるものと考えられる。

ところで、先述したように局所すべりは極めて薄い領域で発生しており、切削速度自体は小さいものの局所的なひずみ速度はかなり高いレベルに達していると考えられる。この局所すべりの生成機構の詳細については、別途報告の予定である。

### 3.3 切削抵抗およびせん断面平均応力の特徴

切りくず生成過程のSEM直接観察と同時に、切削抵抗を測定した。切削抵抗は、層状すべりの周期に対応して、平均値である静的成分の約7%程度の変動が測定された。

切削抵抗の静的成分(以下単に切削抵抗と称す)を切削断面積  $A$  に対して示した例が図9である。主分力  $F_h$ 、背分力  $F_v$  ともに、切削断面積と良い直線関係を示すのが分かる。図中の実線は最小二乗法で求めた回帰直線である。同図は  $\text{Fe}_{81}\text{B}_{13.5}\text{Si}_{3.5}\text{C}_2$  合金を  $V=1 \text{ mm/min}$ ,  $\alpha=10^\circ$  で切削した場合の例であるが、他の条件でも同様に良い直線関係を示した。また、図10に比切削抵抗  $F_c$  を求めた例を示すが、本実験の切込み範囲内でほとんど変化せず、いわゆる寸法効果は認め

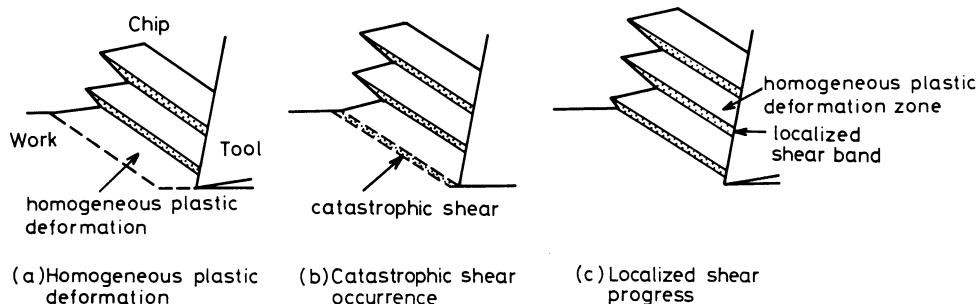


Fig. 8 Schematic illustration of mechanism of lamellar slip structure formation

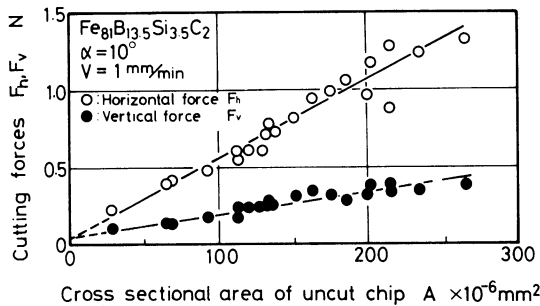


Fig. 9 Variations of cutting forces  $F_h$  and  $F_v$  with cross sectional area of uncut chip  $A$

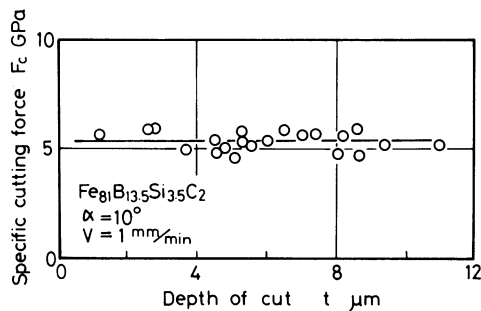


Fig. 10 Specific cutting force  $F_c$  versus depth of cut  $t$

られない。従来結晶金属の場合には、切込みが小さくなると応力集中源としての材料欠陥の存在確率が減少するため、比切削抵抗が大きくなるとされている。これに対して、アモルファス金属ではそのような材料欠陥がほとんど存在しないために、寸法効果が顕著とならなかったものと思われる。ただし、切込みが本実験範囲よりさらに微小化すると寸法効果が現れることも考えられる。

次に、せん断面がほぼ平面とみなされることから、せん断面平均せん断応力  $\tau_s$ （以下単にせん断応力と称す）とせん断面平均垂直応力  $\sigma_s$ （以下単に垂直応力と称す）を求めたのが、図 11 である。垂直応力は、すくい角  $\alpha$  の増加とともに減少するが、せん断応力はほとんど変化せず一定である。言い換えれば、せん断応力に対する垂直応力の影響が認められず、結晶金属とは異なる傾向である。Davis ら<sup>9)</sup>の報告によれば、アモルファス合金では変形抵抗に対するいわゆる静水圧効果が顕著でないが、本実験結果をよく説明すると言える。

また、せん断応力はせん断ひずみに対しても変化しないことが知られた(図示は省略)。例えば、 $\text{Fe}_{81}\text{B}_{13.5}\text{Si}_{35}\text{C}_2$  合金の  $V=1\text{ mm/min}$  の場合、すくい角を  $10^\circ$  から  $-10^\circ$  へと減少させると、平均せん断ひずみは 1.82 から 2.53 へと増加したのに対し、せん断応力は

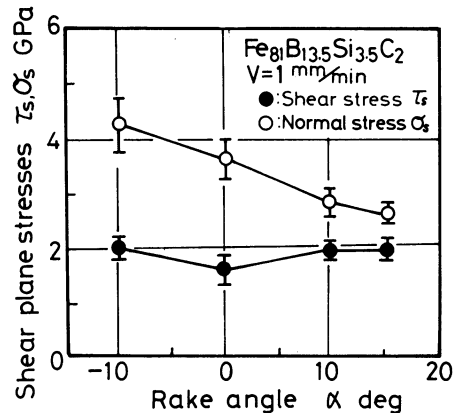


Fig. 11 Variations of shear plane stresses  $\tau_s$  and  $\sigma_s$  with rake angle of tool  $\alpha$

1.92 GPa から 2.03 GPa へと増加しただけである。Pampillo ら<sup>9)</sup>の測定によれば、アモルファス金属では圧縮応力下での変形抵抗はほとんど加工硬化を示さず、むしろ弾完全塑性的挙動を示すことから、この現象は理解できることである。

さらに、せん断応力の速度依存性を切削速度を 2500 倍 ( $0.02\text{ mm/min}$  から  $50\text{ mm/min}$ ) に変化させて調べたが、ほとんど認められなかった。これは本実験の切削速度の絶対値が小さいためとも考えられるが、3.2 項で示したように局所的なひずみ速度はかなり高いレベルに達すると推察され、本実験の切削速度範囲でもひずみ速度は  $1/\text{s}$  から  $10^4/\text{s}$  のオーダーへ 4 けた変化するようになる。それでもせん断応力にひずみ速度依存性が認められなかったことになり、注目される点といえる。アモルファス金属では、結晶金属のような高いひずみ速度が高い流動応力をもたらすという速度効果を示さず、むしろ逆のひずみ速度依存性を示すという指摘<sup>10)</sup>もあり、本実験においてせん断応力に速度依存性が現れなかったことも定性的には理解できる。

以上のように、アモルファス金属のマイクロ切削に伴う切削抵抗およびせん断応力の特徴は、その特有の変形特性から定性的には説明できるものである。しかしながら、これらの結果は本実験条件の範囲内でいえることであり、また、アモルファス金属の変形機構自体にも不明な点が多いため、一般的な結論に至るには今後より詳細な検討が必要である。

#### 4. 結 論

Fe 系超急冷アモルファス合金のマイクロ切削過程を SEM で直接観察することにより、その切りくず生成機構を考察した結果、従来の結晶金属とは異なる特

徴が見い出された。それをまとめると、本実験条件の範囲で次のようなことが言える。

- (1) アモルファス金属の切りくず形態は連続型ではあるが、主せん断域でカードモデルに類似した周期的な層状すべり構造を呈しており、その層状すべり間隔は切込みにほぼ比例する。
- (2) 層状すべり構造は、比較的均質で緩やかな塑性変形とそれに続いて局所化された急激なすべりが繰り返し発生するために形成される。この局所すべり領域の厚さは  $0.05\ \mu\text{m}$  以下と推定され、極めて薄い。
- (3) 切削抵抗は層状すべりの周期に対応して7%程度変動する。また、主分力、背分力ともに切削断面積に対して直線性がよく、比切削抵抗の寸法依存性はほとんど認められない。
- (4) せん断面平均せん断応力は、切込みによる寸法効果が認められず、垂直応力効果も顕著でない。また、せん断面平均せん断応力に対するせん断ひずみおよびひずみ速度の影響もほとんどない。

以上の切削機構上の特徴はアモルファス金属に特有の変形特性から定性的には説明される。今後は仕上面評価を含めた詳細な検討をより広範囲の切削条件で行いたい。また、層状すべりの生成条件についても考察

を進めており、別途報告する予定である。

## 参 考 文 献

- 1) 杉田忠彰, 上田完次, 遠藤勝義, 佐々木 章: アモルファス金属の加工表面のキャラクタリゼーション, 昭和60年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集 (1985) 751.
- 2) K. Ueda and T. Sugita: Chip Formation of Amorphous  $\text{Pd}_{80}\text{Si}_{20}$  Alloy, Bull. JSPE, **17**, 1, (1983) 43.
- 3) 岩田一明, 上田完次, 柴坂敏郎: 走査型電子顕微鏡内微小切削による切削機構の解析 (第1報), 精密機械, **43**, 3 (1977) 311.
- 4) 上田完次, 杉田忠彰: マイクロ切削過程のSEMによる直接観察, 鉄と鋼, **72**, 1 (1986) 153.
- 5) K. Iwata and K. Ueda: The Significance of Dynamic Crack Behaviour in Chip Formation, Ann. CIRP, **25**, 1, (1976) 65.
- 6) 杉田忠彰, 上田完次, 稲村豊四郎: 基礎切削加工学, 共立出版 (1984) 153.
- 7) K. Ueda and K. Iwata: Chip Formation Mechanism in Single Crystal Cutting of  $\beta$ -Brass, Ann. CIRP, **29**, 1, (1980) 41.
- 8) L. A. Davis and S. Kavesh: Deformation and Fracture of an Amorphous Metallic Alloy at High Pressure, J. Mat. Sci., **10**, (1975) 453.
- 9) C. A. Pampillo and H. S. Chen: Comprehensive Plastic Deformation of a Bulk Metallic Glass, Mat. Sci. Engg., **13**, (1974) 181.
- 10) T. Masumoto and R. Maddin: The Deformation of a Amorphous Palladium - 20 at.% Silicon, Acta Met., **19**, (1971) 725.

## ●——精密工学会刊行図書のご案内

### 会誌「精密機械」および欧文誌“Bull. JSPE”総目次

1. 構 成 「精密機械総目次」第31巻第1号～第49巻第12号 (昭和40年1月～昭和58年12月)  
B5判, 本文382ページ  
“Index to Bulletin of the Japan Society of Precision Engineering” Vol. 1. No. 1-Vol. 17, No. 4 (Oct. 1963-Dec. 1983)  
B5判, 本文158ページ  
共に内容別・著者別分類からなっています。
2. 定 価 「精密機械総目次」 会員2000円, 非会員4000円  
“Index to Bull. JSPE” 会員1000円, 非会員2000円  
セット価格 会員2500円, 非会員5000円  
(両方をセットとする場合)