アモルファス金属のマイクロ切削における 切りくず生成に伴う層状すべり機構の解析*

上 田 完 次** 真 鍋 圭 司** 香 田 裕 一 郎***

Analysis of Lamellar Slip Mechanism in Microcutting of Amorphous Metal

Kanji UEDA, Keiji MANABE and Yuichiro KOHDA

This paper deals with microcutting mechanism of an amorphous metal. Amorphous metal is isotropic and homogeneous, so that it is considered to be a simulation material in order to elucidate essential mechanism of cutting. In cutting of amorphous metal, characteristic chips which exhibit typical lamellar slip structure are formed. The purpose of this paper is to elucidate the mechanism of lamellar slip structure formation from theoretical and experimental points of view. The process of lamellar slip formation in Fe-base amorphous metal cutting is simulated by applying the rigid-plastic FEM (Finite Element Method) with considering adiabatic deformation and local temperature increase. The experiment of chip formation process is done by means of in-situ SEM (Scanning Electron Microscope) observation. In the FEM analysis, local slip is generated periodically, and lamellar slip structure is formed. The simulated chip morphology including lamellar slip angle and spacing of lamellar slip and the calculated average value of specific cutting force are in good agreement with the experimental results.

Key words: amorphous metal, microcutting, rigid-plastic FEM, chip formation process, lamellar slip structure, adiabatic deformation, SEM observation

1. 緒 言

アモルファス金属は不規則な原子配列を持つ非晶質金属であり、結晶金属のような異方性を呈さず、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の材料欠陥を有しない。すなわち、等方、均質、無欠陥の材料であり、切削機構の本質を解明するために、あるいは力学的シミュレーションを行うために興味深い材料であるといえる。

また一方、アモルファス金属は、優れた磁氣的、電氣的、機械的性質などを有した新素材の1つとして注目を浴びているが、その機能を十分に発揮せしめるためには適切な加工を施さなければならず、その加工機構の解明という観点からの研究も望まれている。

すでに、著者の1人によって、アモルファス金属のマイクロ切削機構について研究¹⁾がなされており、

カードモデルに似た典型的な層状すべり構造を持った切りくずが生成されるという興味深い結果が示されている。層状すべり構造の生成機構は、切りくず生成機構の解明において重要な問題の1つであるが、まだ十分には解明されていない。

そこで本研究では、切削機構、特に層状すべり構造を持つ切りくず生成機構の解明を目的とする。被削材としては、鉄系アモルファス金属を用い、そのマイクロ切削過程を、計算機シミュレーションと切削実験によって解析を行う。

シミュレーションでは、アモルファス金属の局所すべり生成機構を、断熱変形の考え方を導入し、局部的温度上昇による材料の熱軟化を考慮してモデル化する。そして、剛塑性FEM(有限要素法)を用い、層状すべり構造をもつ切りくずの生成機構について解析する。シミュレーション結果は、SEM(走査型電子顕微鏡)内切削における直接観察による解析結果と比較し、検討する。

* 原稿受付 平成3年8月19日

** 正 会 員 神戸大学工学部(神戸市灘区六甲台町1)

*** 学生会員 神戸大学工学部

2. 剛塑性 FEM による層状すべり生成機構のシミュレーションモデル

2.1 圧縮性剛塑性 FEM の概要

本研究では、剛塑性 FEM を用い、アモルファス金属のマイクロ切削過程のシミュレーションを行う。

剛塑性 FEM は、等方均質な完全塑性体の解析法の 1 つであり、弾性変形を無視しているものの、応力を速度形で取り扱わないため、大変形問題に適したシミュレーション手法である。本研究で用いた解析法は、圧縮性材料の降伏条件を用い、圧縮性を 0 に近い値として剛完全塑性体の近似を行う手法²⁾である。以下、その概要について述べる。

圧縮性材料の降伏条件として、Mises の降伏条件を修正し、次式で相当応力 $\bar{\sigma}$ を定義する。

$$\bar{\sigma}^2 = \frac{3}{2} \sigma'_{ij} \sigma'_{ij} + g \left(\frac{\sigma_{kk}}{3} \right)^2 \quad (1)$$

ここで、 σ'_{ij} は偏差応力である。なお、本論文中のテンソル表示による添字は、総和規約に従うものとする。 g は圧縮性を表す正の定数であり、 g が小さい程 Mises の降伏条件に近づく。

式 (1) を塑性ポテンシャルとすることにより、応力 σ_{ij} と塑性ひずみ速度 $\dot{\epsilon}_{ij}$ の関係が次のように与えられる。

$$\sigma_{ij} = \frac{\bar{\sigma}}{\dot{\bar{\epsilon}}} \left\{ \frac{2}{3} \dot{\epsilon}_{ij} + \delta_{ij} \left(\frac{1}{g} - \frac{2}{9} \right) \dot{\epsilon}_{kk} \right\} \quad (2)$$

δ_{ij} はクロネッカデルタである。ここで、相当塑性ひずみ速度 $\dot{\bar{\epsilon}}$ は、 $\sigma_{ij} \dot{\epsilon}_{ij} = \bar{\sigma} \dot{\bar{\epsilon}}$ を満たすように次のように定義する。

$$\dot{\bar{\epsilon}}^2 = \frac{2}{3} \dot{\epsilon}'_{ij} \dot{\epsilon}'_{ij} + \frac{1}{g} (\dot{\epsilon}_{kk})^2 \quad (3)$$

$\dot{\epsilon}'_{ij}$ は偏差塑性ひずみ速度である。以上のような基礎式を用い、釣合い条件を満たす解を決定するため、上界法に基づいて、次の汎関数 Φ を最小にする速度場 v_i を求める。

$$\Phi = \int_V \bar{\sigma} \dot{\bar{\epsilon}} dV - \int_{S_t} T_i v_i dS \quad (4)$$

ここで、 V は解析領域、 S_t は外力 T_i が与えられた表面である。この汎関数をマトリクスにより有限要素表示³⁾、最小化する。これは節点速度の非線形関数となるため、Newton-Raphson 法によって収束させる。

本研究では $g=0.01$ の値を採用し、非圧縮性がよく近似されていることを確認した。また、式 (1) による相当応力 $\bar{\sigma}$ は、変形抵抗の値をとるものとした。

2.2 アモルファス金属の材料特性

シミュレーションを行うには、アモルファス金属の材料特性を導入する必要がある。

アモルファス金属の塑性変形は、局所化されたすべりによって生じるが、その変形機構についてはまだ定説がない。ここでは、層状すべりの生成機構のシミュレーションを行うため、アモルファス金属の次の 2 つの特性⁴⁾に注目する。

(1) 加工硬化をほとんど示さず、完全塑性的な性質を持つ。

(2) 変形抵抗は温度上昇によって低下し、特に結晶化温度付近において著しい軟化傾向を示す。

本研究では、これらの性質が層状すべり構造生成の要因と考え、剛塑性 FEM において、変形抵抗の温度依存性を考慮して層状すべり構造生成のシミュレーションを行う。

2.3 断熱変形モデルの導入

SEM 内切削による直接観察¹⁾によると、すべりは $0.05 \mu\text{m}$ 以下の極めて薄い層の中で生じる。そのため、極低速の切削条件にもかかわらず、すべりの部分におけるひずみ速度は 10^3 s^{-1} を越える値を示し、断熱変形の生じている可能性がある。また、Leamy ら⁵⁾は、断熱変形のモデルを用いてアモルファス金属の局所すべりの生成機構を考察している。

本研究では、断熱変形の考え方を導入して層状すべり生成のシミュレーションを行う。以下に、その概要を述べる。

被削材の塑性変形による不可逆の仕事率から、発生熱 $\dot{q}$ を次式で計算する。

$$\dot{q} = n \bar{\sigma} \dot{\bar{\epsilon}} \quad (5)$$

ここで n は、断熱性の度合を表すために導入した係数であり、断熱係数と呼ぶことにする。 $n=1$ において完全な断熱性を示す。この発生熱により、温度上昇を算出する。

ひずみ速度が大きいほど変形が断熱的になると考えられる。そこで断熱係数 n は相当塑性ひずみ速度 $\dot{\bar{\epsilon}}$ の関数であると仮定し、次式を用いた。

$$n = 1 - \exp \left(-b \frac{\dot{\bar{\epsilon}}}{\dot{\bar{\epsilon}}_0} \right) \quad (6)$$

$$\dot{\bar{\epsilon}}_0 = \frac{v}{d}$$

ここで、 v は切削速度、 d は切込みである。また、 b は正の定数である。このように $\dot{\bar{\epsilon}}_0$ で無次元化しているため、断熱係数 n は、切削速度、寸法の影響を受けない。

以上の手法による局所すべりのシミュレーションのフローチャートを図 1 に示す。

Fig. 1 Flowchart for simulation of local slip formation

Table 1 Material properties of $\text{Fe}_{78}\text{B}_{13}\text{Si}_9$ amorphous metal

Density g/cm ³	Specific heat J/gK	Crystallization temperature K	Thermal conductivity W/mK
7.18	0.54	823	9

まず、各ステップにおいて、式(5)、式(6)を用いて温度上昇を計算し、各要素の温度を定める。計算の初期段階では、温度は室温とする。次に、その温度における材料の変形抵抗を算出する。1ステップの計算では、変形抵抗を一定とし、剛塑性FEMによって変形場を計算する。変形場を更新し、次のステップに移る。以上の処理を最終ステップまで繰り返す。

2.4 変形抵抗の温度依存性の定式化

本研究で使用する被削材は、鉄系アモルファス合金 $\text{Fe}_{78}\text{B}_{13}\text{Si}_9$ (METGLAS 2605 S-2) である。被削材の主な特性を表1に示す。

前述した手法によって解析を行うには、変形抵抗を温度の関数として定式化しなければならない。アモルファス金属は、一般に非常に薄く、高温下での変形抵抗の測定は困難である。そこで温度を変化させたマイクロビッカース硬さ試験を行い、変形抵抗を概算することとした。図2に試験結果を示す。

図2からわかるように、アモルファス金属は温度上

Fig. 2 Vickers hardness of used amorphous metal at several temperatures

昇とともに、直線的に軟化しており、絶対温度が約573 Kを越えると軟化の勾配が大きくなっている。しかし、800 K付近で再び硬化の傾向を示している。アモルファス金属の硬さは温度上昇とともに低下し、結晶化温度付近で硬化することが知られており⁴⁾、傾向としては一致している。

変形抵抗はビッカース硬さ値の約40%⁴⁾と仮定し、次のように、2本の直線近似を行った。

$$\left. \begin{aligned} (A) \quad \sigma &= -2.480 T + 3606.94 \quad (273 \sim 573 \text{ K}) \\ (B) \quad \sigma &= -12.374 T + 9272.41 \quad (573 \sim 723 \text{ K}) \end{aligned} \right\} (7) \quad (\text{MPa})$$

ここで、 T は絶対温度である。

3. 実験およびシミュレーション条件

切削実験方法は既報¹⁾と基本的に同様であり、SEM内に組み込まれたマイクロ切削装置により、切りくず生成過程を直接観察することによって行う。

本研究では、切削の開始から工具を前進させ、局所すべりが発生し、層状すべり構造を持つ切りくずが生成されるまでを対象とする。本実験で採用した切削条件の範囲は、切込み2~5 μm 、切削速度は極低速~2 $\mu\text{m/s}$ 、切削幅約20 μm である。工具は単結晶ダイヤモンド工具であり、すくい角0°、逃げ角5°である。なお、既報¹⁾と同様に、このような切削条件のすべてにおいて、層状構造を持つ切りくずが生成されることが観察され、切削速度、寸法の依存性がないことが確認された。

切削のシミュレーションも同様に、切削開始から工具を前進させ、局所すべりが発生し、層状すべり構造を持つ切りくずが生成されるまでの過程を対象とする。工具は、刃先における要素を再分割しながら前進

(a) $D = 0$

(b) $D = 0.23$

(c) $D = 0.94$

(d) $D = 1.62$

a) Experimental results

b) Simulation results

$$D = (\text{Cutting distance}) / (\text{Depth of cut})$$

Fig. 3 An example of chip formation process of amorphous metal

Fig. 4 Typical distributions of equivalent strain rate $\dot{\epsilon}$ (1/s) Fig. 5 Typical distributions of temperature T (K)

させる⁶⁾。

シミュレーション条件は、前述の切削条件の中で、切込み $5\text{ }\mu\text{m}$ 、切削速度は $0.5\text{ }\mu\text{m/s}$ の場合とした。

工具-被削材間の摩擦係数は 0.2 とし、摩擦応力がせん断降伏応力を超えると、せん断降伏応力を計算の繰返しの中で、式(4)第2項の外力として与えた。また、極低速切削を対象としているため、工具-被削材間の摩擦による熱発生は無視した。

次に、式(6)中の定数 b を定める。定数 b が大きいほど断熱的となるが、試行計算の結果、約 $b=0.5$ 以上においてはほぼ同様の結果が得られたため、ここでは $b=0.5$ とした。

4. 結果および考察

4.1 切りくず形態

図3に、アモルファス金属の切りくず生成過程の様子の例を、実験結果とシミュレーション結果を対比させて示す。図中 D は切削距離を切込みで除した値であり、図中上から下へと切削が進行する。実験では、

切削の進行と共に、周期的な局所すべりが生じ、層状すべり構造を持った切りくずが生成されている。シミュレーションでは、変形が集中した部分の要素が大きく変形し、層状すべり構造を持った切りくずの生成過程がよくシミュレートされている。実験では、非常に薄い部分ですべりが生ずるのに対して、計算では、少なくとも要素1つ分の領域ですべりが表現されるため、切込みに対して約 0.2 の領域がすべり領域となっている。このため、すべりの生じるタイミングが実験よりも遅くなっていると考えられる。

局所すべりと切削方向のなす角 ϕ は、実験では約 38° 、シミュレーションでは約 43° となっている。

また、層状すべり間隔を切込みで除した値 t は、実験では約 0.36 、シミュレーションでは約 0.38 となっている。 ϕ 、 t ともにシミュレーションの方がやや大きいものの、妥当な結果といえる。

4.2 相当塑性ひずみ速度分布および温度分布

次に、計算の結果得られた相当塑性ひずみ速度の過渡的变化の様子を図4に示す。(a)では、ひずみ速度

がせん断域に集中し、第1番目の局所すべりが生じているのが分かる。工具が前進し、(b)の段階になると、局所すべりは切りくずとして工具に沿って、上方に移動している。続いて工具が新しい領域に食い込み、(c)の段階になると、前の局所すべり域におけるすべりは停止し、新たな局所すべり域が形成されている。

次に、図4の(a),(b)に対応する温度分布を図5に示す。せん断域において温度が上昇しているのが分かる。温度が上昇すると材料が軟化するため、さらにその部分に変形が集中するという過程で局所すべりが形成されることが考えられる。(b)では、温度分布も相当塑性ひずみ速度分布と同様に、工具に沿って上方に移動しているのが分かる。図4からわかるように、すべりの終わった部分はひずみ速度の小さい剛体域となり、剛塑性FEMでは計算に関与しなくなる。そして、次のすべりの発生の段階に移行すると考えられる。

4.3 比切削抵抗

主分力方向の比切削抵抗の平均値は、実験値は約3.4 GPa、計算値は約3.1 GPaとなり、両者はよく対応していると言え、式(7)による変形抵抗の概算が妥当であったことがわかる。

しかし、局所すべりの生成に対応して比切削抵抗は、平均値である静的成分に対し、実験では約数%、計算では約十数%変動しており、変動幅には大きな差が認められた。これは、シミュレーションでは実験と比較して広い領域内ですべりが生ずるために、層状すべりが生成される際に変形抵抗が熱軟化によって低下し、すべりに対応し比切削抵抗が低下すると考えられるが、実験では、すべりは極めて薄い層の中で生ずるため、力の変動を十分に測定できなかったものと思われる。

5. 結 論

アモルファス金属のマイクロ切削における層状すべり構造を持つ切りくずの生成機構をSEM内切削実験および剛塑性FEMによって解析を行った。

ひずみ速度の高い部分においては変形が断熱的にな

ると考え、断熱変形を仮定し、局部的温度上昇による材料の熱軟化を考慮することによって、層状すべり構造生成のシミュレーションを行った。

切削実験では、工具の前進と共に、局所すべりが周期的に発生し、典型的な層状すべり構造を持つ切りくずが生成された。シミュレーションにおいても切削の進行に伴って周期性のある局所すべりが生成し、局所すべりと切削方向のなす角および層状すべり間隔は、実験値とよい対応が認められた。

また、比切削抵抗の平均値は、実験結果とシミュレーション結果は、比較的良好な対応が見られた。

以上のことから、切りくずの層状すべり構造生成過程は、断熱変形により説明できることが明らかとなった。

謝 辞

本研究の遂行にあたり、シミュレーションを手伝っていただいた神戸大学工学部、岡本昌和君に感謝の意を表します。また、アモルファス金属を提供していただいた三井石油化学工業株式会社、広重嘉捷氏、ならびにアモルファス金属の硬さ試験を行っていただいた株式会社神戸製鋼所、斉藤誠氏に感謝の意を表します。

最後に、本研究の一部は、平成2年度文部省科学研究費補助金(奨励研究A 02750087)によって行われたことを記し、謝辞にかえます。

参 考 文 献

- 1) 上田完次, 須田敦彦, 杉田忠彰: アモルファス金属のマイクロ切削に関する研究, 精密工学会誌, **53**, 11 (1987) 1785.
- 2) K. Mori, K. Osakada and T. Oda: Simulation of Plane-Strain Rolling by Rigid-Plastic Finite Element Method, Int. J. Mech. Sci., **24**, 9, (1982) 519.
- 3) 富田佳宏: 数値弾塑性力学, 養賢堂, (1990) 76.
- 4) 増本 健編著: アモルファス金属の基礎, オーム社, (1982).
- 5) H. J. Leamy, H. S. Chen and T. T. Wang: Plastic Flow and Fracture of Metallic Glass, Met. Trans., **3**, (1972) 699.
- 6) 真鍋圭司, 岩田一明, 杉村延広: 剛塑性有限要素法による単結晶材料の切りくず生成過程の解析, 精密工学会誌, **56**, 9 (1990) 1729.