せん断形切りくず生成の有限要素法 シミュレーション*

帯川利之** 田口克行*** 笹原弘之** 白樫高洋** 白井英治†

Finite Element Analysis on Discontinuous Chip Formation

Toshiyuki OBIKAWA, Katsuyuki TAGUCHI, Hiroyuki SASAHARA,
Takahiro SHIRAKASHI and Eiichi USUI

A finite element modelling is proposed for simulating the discontinuous chip formation of 60% Cu-40% Zn brass. In the modelling geometrical nonlinearity and the reduction of constraint of incompressibility in the large deformation of finite elements are taken into account. The initiation and growth of ductile cracks from cutting edge to chip free surface during chip segmentation are directly introduced into the finite element model using an appropriate fracture criterion, which is determined in terms of strain, strain rate and hydrostatic pressure. Chip segments, which are periodically formed in the simulation, are in good agreement with those experimentally obtained both in configuration and deformed grid. Variation of velocity, stress, strain, strain rate calculated during a chip segmentation make clear the mechanism of discontinuous chip formation. Normal and frictional stresses on the rake face calculated are found to be almost uniform over the tool-chip contact length.

Key words finite element analysis, metal cutting, discontinuous chip formation

1. ま え が き

新素材の切削加工においては、流れ形の切りくずを生ずる場合は少なく、複合材料であれば界面の破壊、チタン合金やニッケル基超合金などでは延性き裂を伴った鋸歯状切りくずの生成、延性に乏しい材料であれば延性・ぜい性き裂の発生によるせん断形やき裂形の切りくず生成といった不連続的な変形が含まれる。このような加工状態を経た部品では、素材の特性が加工によって予期せぬ劣化を招き、所要の性能を満たさない場合が生ずる。それ故、新素材の開発が加速度的に進展する現状では、加工面のインテグリティを定量的に予測する手法の確立が大変重要となってきた。しかし、加工面のインテグリティを切削加工の解析から直接的に評価する研究は、流れ形の切りくず生成の場合について始まったところであり¹⁾²⁾、不連続形切りくず生成の場合には、切りくず生成の解析自体、ほとんど手が付けられていない。この現状を打開するためには、解析的手法を適用して不連続形切りくずの生成過程を定量的に求めることか先決である。

切りくずの自由面から刃先に向かってき裂が成長する鋸歯状切りくず生成については、さきに開発した有限要素法を用いてチタン合金切削の解析を行い、十分な成果を得た³⁾。本論文では不連続形の切りくず生成過程の汎用的な解析手法の確立を図るため、刃先からき裂が成長するせん断形の切りくず生成について有限要素法解析を行う。

2. 有限要素法解析

2.1 解析モデル

図1に本解析で使用した切削モデルを示す。ABCDEFが被削材の四六黄銅であり、4節点四角形のアイソパラメトリック要素で構成している。上部の平行四辺形ABCFは切りくずとして除去される部分であり、その傾きはせん断形切りくずで実測される破断面の傾き角⁴⁾を考慮して決めた。これにより有限要素モデルにき裂を円滑に導入することかできるか、後述のようにき裂の成長方向をこの傾きに拘束するわけではない。

図1の初期状態から左端と下端を固定して刃先を水平に移動させ、平面ひずみ状態で二次元切削を開始する。工具はすくい角15°の超硬工具P20、切削速度は0.217mm/sの極低速、切削厚さは0.25mm、切削幅は単位幅1mmとした。極低速切削であるから、被削材

* 原稿受付 平成4年9月7日

** 正会員 東京工業大学工学部(東京都目黒区大岡山 2-12-1)

*** 学生会員 東京工業大学大学院(現在、鶴岡芝、大田原市下石上 1385)

† 正会員 東京電機大学工学部(東京都千代田区神田錦町2-2)

Fig. 1 Finite element mesh

Fig. 2 Stress-strain curve of 60% Cu-40% Zn brass

Table 1 Material properties

Work(60%Cu-40%Zn brass): shear modulus, 36.3GPa;
bulk modulus, 108.9GPa

の流動応力として図2の静的塑性曲線⁵⁾を使用し、温度とひずみ速度の影響を無視した。

工具すくい面の摩擦条件には、非線形応力特性式⁸⁾

$$\frac{\tau}{\tau_e} = 1 - \exp\left(-C \frac{\sigma}{\tau_e}\right) \quad (1)$$

を使用した。ここで σ_t と τ_t はそれぞれすくい面の垂直応力と摩擦応力、 τ_e は着目点における切りくずの降伏せん断応力、 C は定数であり、本研究の工具と被削材の組合せに対しては $C=1.0$ とした⁹⁾。表1に本解析で使用した他の材料定数を示す。

2.2 解析法

切削では要素がせん断域において大きなひずみと大きな回転を受ける。このような大変形問題を弾塑性有限要素法で解析するため、updated Lagrange 法による増分計算の定式化では以下の点を考慮した。

まず変形後の形状に対して常に力の平衡を満足させるため、有限要素の形状変化に起因する2つの幾何学的非線形¹⁾、すなわち要素内応力に関する幾何剛性と応力の境界条件に関する荷重補正を導入した。幾何剛性の導入には真応力の Jaumann 変化率を真の応力変化率として用いた。

有限要素では塑性の非圧縮条件から導かれる拘束条件が変形の自由度に対して相対的に大きい⁹⁾。そこで自由度と非圧縮条件の比が実在の連続体と同じになるように、Nagtegaal-Rice⁹⁾の汎関数を用いて体積ひずみについての実質的な reduced integration⁹⁾を行い、節点速度とひずみ速度の関係を修正した。これにより非圧縮の拘束条件を低減し、有限要素の塑性変形を実在の連続体の変形に近づけた。

具体的な定式化については既報⁹⁾で詳述したので省略し、節点速度 v_N と節点力変化率 $\dot{F}_N$ の関係を略記

すれば次式となる。

$$\{\dot{F}_N\} = ([K] + [K_G] + [K_F]) \{v_N\} \quad (2)$$

ここで $[K]$ は微小変形問題の剛性マトリクスにおいて、ひずみ速度-節点速度関係を修正して非圧縮条件を緩和したもの、 $[K_G]$ は幾何剛性マトリクス、 $[K_F]$ は荷重補正マトリクスである。最終的に解くべき方程式は、式(2)にすくい面の境界条件、すなわち非線形摩擦特性の接線摩擦係数 $\mu = \dot{\tau}_t / \dot{\sigma}_t$ を導入することにより得られる⁹⁾。

2.3 節点分離条件

非定常なせん断形切りくず生成の解析では、2種類の節点分離を行う。ひとつは、刃先で切りくずを生成し、仕上面を創り出す過程のものである。この場合には次の幾何学的条件を節点の分離条件とした。

(1) 節点が刃先から 0.005mm 以内に到達している。

(2) 前回分離した切りくず表面の節点が工具面上にある。

もうひとつの分離条件は、刃先から切りくず自由面へ延性き裂が成長してせん断形切りくずを生ずる過程のものである。その場合の破壊条件としては

$$\begin{aligned} \varepsilon^p &> \varepsilon_c \\ \varepsilon_c &= \varepsilon_0 - \alpha \frac{p}{\sigma} - \beta \frac{\dot{\varepsilon}^p}{V} \end{aligned} \quad (3)$$

を使用した。 ε^p 、 ε_c はそれぞれ相当塑性ひずみと破壊ひずみ、 p は引張りを正とする静水圧、 σ は相当応力、 $\dot{\varepsilon}^p$ は相当塑性ひずみ速度(s^{-1})、 V は切削速度(mm/s)である。また ε_0 、 α 、 β は定数であり、 $\varepsilon_0=1.57$ 、 $\alpha=0.4$ 、 $\beta=0.01$ とした。式(3)は基本的にひずみ基準の破壊条件であり、チタン合金の鋸歯状切りくず生成の解析⁹⁾と同様に静水圧が引張り状態であるほど、そして相対的に塑性変形の著しいところほど破壊しやすいとして破壊ひずみを補正している。

き裂の成長を解析するには、破壊条件の他にき裂の成長方向を指定する必要がある。せん断形切りくず生成におけるき裂の先端では圧縮応力下のせん断変形が主であるから、図1のモデルでは反時計回りの最大せん断応力 τ_m の方向にき裂が成長するとした。図3は、破壊条件を満たした刃先直前の節点 I からき裂が発生し、3回にわたる節点分離を行って点 R まで成長した場合であり、要素が変形しないものとして図示した。解析で予測された破線 IPQR の実際のき裂に対して、有限要素モデルにおいては最適近似の仮想き裂として太線 IJKLMN を導入している。実際き裂の予測と仮想き裂の導入の詳細については既報⁹⁾に譲り、き裂面における境界条件のみを記せば、以下になる。

I) 実際のき裂面に垂直な応力が引張りの場合

- (1) 節点力を開放し、拘束のない自由節点とする。
 II) 実際のき裂面に垂直な応力が圧縮の場合
 (1) 実際のき裂面に垂直な速度は仮想き裂の上下面で同じであって、接線速度のみが異なる。
 (2) 実際のき裂面には摩擦力が作用しない。
 (3) き裂先端を中心とする実際のき裂に垂直な節点力成分のモーメントが釣り合っている。

これらの境界条件で解析を進めると、分離した節点は切り開いた要素境界（仮想き裂）ではなく実際のき裂 $IPQR$ に平行に動くため、要素の重なりや空洞が生ずる。しかし、後述の結果のように要素の重なりと空洞の発生はわずかであり、これらは適当にバランスして非圧縮性が大きく崩れることはない。

3. 解析結果と考察

図4はせん断形切りくず生成において4つの切りくずセグメントが生ずるまでの有限要素変形の略図である。ただし、素材から完全に分離した切りくずセグメントには外応力が作用しないが、形状を比較するため、重なりが生じない適当な間隔で、すくい面に沿って移動させた。同図の最終状態については、有限要素変形

Fig. 3 Introduction of crack into finite element model

Fig. 4 Discontinuous chip formation calculated with cutting length l

Cutting conditions: orthogonal cutting; material cut, 60% Cu-40% Zn brass; tool, P20; rake angle, 15° ; cutting speed, 0.217 mm/s; undeformed chip thickness, 0.25 mm; width of cut, 1 mm (unit width); cutting fluid, dry.

から換算した直交格子の変形を図5に、相当ひずみ分布を図6に示した。2番目から4番目の切りくずセグメントに注目すると、切りくず外形だけでなく個々の有限要素の変形やひずみの分布もよく似ている。切りくずの生成間隔もほぼ同じであり、周期的な切りくず生成状態が既に実現されていることがわかる。また工具が食い付く際には、図4(b)の切削距離 $l = 0.95$ mmにおいてみられるように刃先で切りくずが滞留して、節点間隔が非常に接近する。同様の変形が各セグメントでもみられることから、せん断形の切りくず生成では食付きに相当する切削状態が繰り返し出現することが理解できる。

図7に切削力の経時変化を示す。切削力は切削の進行に伴って徐々に増加するが、刃先から延性き裂が発生すると多少複雑な変化をみせながら次第に減少し、切りくずの全破断によって激減する。

切りくず生成の概略が明らかになったので、以下では2番目の切りくずセグメントの生成過程について詳細に検討する。図8に有限要素変形、図9には図8から換算した格子線変形を示す。また対応する実験結果を図10⁽⁴⁾に示す。有限要素法では計算機能力によって使用できる要素数が実質的に限られているため、微小な要素を用いて図1を構成することができない。この理由により、実験結果にみられる刃先付近の複雑な変形を完全にシミュレートするにはいたっていない。また図3において実際のき裂 $IPQR$ と仮想き裂 $IJKLMN$ の方向の差が大きい場合、すなわち最大せん断応力の方向と有限要素境界面が一致しない場合には、き裂の成長速度が遅くなる。そのために解析結果におけるき裂の進展速度は実験結果より多少遅くなって、全破断

Fig. 5 Deformed grids at $l=5.03$ mm Fig. 6 Equivalent strain distribution at $l=5.03$ mm Fig. 7 Horizontal and vertical cutting forces F_H , F_V calculated. Cutting conditions are as same as in fig. 4. (a) $l=1.28$ mm (b) $l=1.46$ mm (c) $l=1.67$ mm (d) $l=1.86$ mm (e) $l=2.09$ mm (f) $l=2.31$ mm (g) $l=2.48$ mm (h) $l=2.59$ mm

Fig. 8 Finite element deformation during second chip segmentation

(a) $l=1.28$ mm (b) $l=1.46$ mm (c) $l=1.67$ mm (d) $l=1.86$ mm (e) $l=2.09$ mm (f) $l=2.31$ mm (g) $l=2.48$ mm (h) $l=2.59$ mm

Fig. 9 Deformed grid corresponding to fig. 8

が生ずる前に刃先付近の盛り上がりが進行する。それにもかかわらず図9と図10における切りくずセグメントの形状と格子線変形は全体としてかなりよく似ている。以上の結果より、使用した有限要素法の定式化と延性き裂の発生・成長のモデル化がせん断形切りくず生成過程に対してはほぼ妥当であったことがわかる。

図11と図12に、図8に対応した節点の速度とひずみ速度を示す。1番目の切りくずセグメントが生成され

た直後の図11 (a) では、刃先付近を除いて、工作物は切削速度で水平に移動する。図12 (a) にみるように変形が刃先付近に集中するためである。この状態がしばらく続いた後に変形域が切りくず自由面まで到達し、(c) においてせん断域が形成される。すくい面での速度が非常に遅いため、切りくずは流れず、この間に急速に盛り上がってくる。その後切りくずの速度は徐々に低下しながら、すくい面に平行となり、せん断

 Fig. 10 Deformed grid obtained experimentally⁴⁾

Cutting conditions are as same as in fig.4 except undeformed chip thickness is 0.9mm, tool is highspeed steel SKH 3 and width of cut is 3.5mm.

Fig. 11 Nodal velocity calculated during second chip segmentation

 Fig. 12 Distribution of equivalent strain rate(s^{-1}) calculated during second chip segmentation

角が低下する．続いて (e) において延性き裂が刃先から発生すると，き裂上の切りくずは実質的に剛体として動く．その結果，(f)，(g) のように高ひずみ速度域はき裂先端とともに切りくず自由面側に移動して，変形がき裂の進展していないせん断面に集中する．その一方で，刃先がき裂の下面に再度食い付くので，刃先付近に高ひずみ速度の領域が出現する．

図13は静水圧分布である．延性き裂の成長によって最初は引張りの静水圧領域が拡大する．しかし，ある程度き裂が成長すると，き裂面には圧縮力が作用する

ようになり，その結果引張りの静水圧領域が縮小することがわかる．

図14は工具面応力分布の推移である．一番目の切りくずセグメントが生成された直後の (a) では接触長さが非常に短いので，極めて高い垂直応力が作用する．その後，接触長さの増大に伴って垂直応力は徐々に低下するが，摩擦応力は式 (1) の特性上，ほとんど変化がみられない．またせん断形切りくず生成では，実質的に接触長さが拘束された状態にあるため，応力の分布はほとんど平坦である．延性き裂が発生すると，

Fig. 13 Distribution of hydrostatic pressure(MPa) calculated during second chip segmentation

Fig. 14 Variation of stresses on rake face calculated during second chip segmentation

(f) に示すように刃先には応力の作用しない領域が現れ、切りくず接触域において刃先側の応力が多少低下する。さらに切削が進むと刃先が再び被削材に食い付くので、(g) では刃先に新たな応力が作用する。このため、図 7 では、延性き裂発生後の切削力減少期に、切削力が再上昇し、その後切りくずが破断しても切削力が 0 まで低下しない。

以上のようにせん断形切りくず生成は既報³⁾の鋸歯状切りくず生成と同様に有限要素法によって十分にシミュレートできることがわかった。このような解析手法の確立によって、加工面のインテグリティなどの特性評価が解析的に進める段階に到達したと考えることができる。

4. 結 論

- (1) 幾何学的非線形と非圧縮条件の緩和を考慮した弾塑性有限要素法大変形解析と延性破壊条件の導入により、延性き裂の発生、成長を伴うせん断形切りくず生成過程をシミュレートし、実際とよく

一致する切削状態が実現できることを示した。

- (2) せん断形切りくず生成におけるひずみ、ひずみ速度、静水圧、すくい面応力の分布とそれらの経時変化を詳細に示すことができた。

引 用 文 献

- 1) J. S. Strenkowski and J. T. Carroll, III: A Finite Element Model of Orthogonal Metal Cutting, Trans. ASME, J. Eng. Ind., 107, (1985) 349.
- 2) 白樫高洋, 和田武司, 笹原弘之, 帯川利之: 切削仕上面特性の解析的予測, 1992 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (1992) 145.
- 3) 帯川利之, 臼井英治: チタン合金 (Ti-6Al-4V) の鋸歯状切りくず生成の FEM シミュレーション (第 1 報), 精密工学会誌, 58, 6 (1992) 1072.
- 4) 臼井英治, 菊地千之, 北川武揚: せん断形切りくず生成機構の塑性学的解析 (第 2 報), 精密機械, 33, 2 (1966) 77.
- 5) 臼井英治, 牧野亮哉: 低速流れ形切削における応力, ひずみ分布, 精密機械, 33, 4 (1967) 245.
- 6) 白樫高洋, 臼井英治: 工具すくい面の摩擦特性, 精密機械, 39, 9 (1973) 966.
- 7) 山田嘉昭: 塑性・粘弾性, 培風館 (1980) 172.
- 8) J. C. Nagtegaal, D. M. Parks and J. R. Rice: On Numerically Accurate Finite Element Solutions in the Fully Plastic Range, Comp. Meth. Appl. Mech. Eng., 4, (1974) 153.
- 9) O. C. Zienkiewicz and R. L. Taylor: The Finite Element Method (4th ed.), vol. 1, McGraw-Hill, London (1989) 290-372.