三次元切削機構の剛塑性有限要素法による解析（第2報）*

——平フライス切削過程のシミュレーション——

上田 完次** 真鍋 圭司** 野崎 省二***

Rigid-Plastic FEM Analysis of Three-Dimensional Cutting Mechanism (2nd Report)
— Simulation of Plain Milling Process —

Kanji UEDA, Keiji MANABE and Syoji NOZAKI

Three-dimensional rigid-plastic FEM (Finite Element Method) simulation of plain milling process is performed. The down-cut process in plain milling cutting is simulated by analyzing three-dimensional plastic deformation field due to the cutter rotation from the beginning of the cutting until the formation of the chip. The chip formation process of a carbon steel with showing spiral shaped curl is three-dimensionally simulated. The variations of the chip formation process including chip shape and cutting forces with cutting conditions such as tool helix angle and feed rate are calculated. It is obtained that the chip shape varies with simulation conditions of tool helix angle and feed rate, and the chip curl pitch increases as the tool helix angle increases. The cutting forces increase as the feed rate increases, and thrust component of cutting force becomes large as the tool helix angle increases. This simulation method is considered to be effective to simulate the actual three-dimensional cutting process.

Key words: three-dimensional simulation, rigid-plastic FEM, chip curling process, plain milling cutting

1. 緒 言

現実の生産現場における切削加工は一般的には、三次元の工具形状、工具運動を伴う三次元切削である。実際に切削を行うことなく、切削状態を予測しようとする切削理論に関する研究はさまざまな成果を上げているが、それらのほとんどが二次元モデルにより解析されてきた。さらに塑性変形過程の三次元解析が可能となれば、現実の切削加工過程をも予測するという切削理論本来の目的を達成することができる。

近年、計算機を援用し、有限要素法（FEM）などを用いて塑性大変形を記述する支配方程式を切削過程の境界条件の下で数値的に解析し、シミュレーションを行う技術が発達しており、「計算切削工学」¹⁾と称されるべき新しい学問分野が形成されつつある。最近では、シミュレーションを三次元で行う計算機環境も整いつつあり、三次元切削のシミュレーションも行われるようになってきた。例えば、定常切削モデルによる解析²⁾、食いつき時の解析³⁾、筆者らが前報で報告した傾斜切削の解析⁴⁾などが、三次元 FEM によって行われ、本格的な三次元切削シミュレーションの可能性が示された。

本報では、さらに現実に近い切削加工過程をシミュレーションし、有益な情報を得ることができるシミュレータを開発することを目的とし、その一例として平フライス切削過程を三次元剛塑性 FEM によってシミュレーションした結果について報告する。平フライス下向き切削における切りくず生成過程を対象とし、工具ねじれ角、被削材の送り速度が、切りくず形状やカールの状況、切削力に及ぼす影響をシミュレーションする。

2. 平フライス過程の三次元シミュレーション方法

2.1 シミュレーションモデル

三次元的な平フライス切削過程はエネルギー解析法などに

よって解析されている⁵⁾が、切りくず形状まで含めた解析はまだ十分に行われていない。本研究では、剛塑性 FEM によって、切削開始時から切りくず生成までの三次元塑性変形場の過渡過程を連続的に解析することによってシミュレーションを行う。

図 1 に、シミュレーションの初期モデルを示す。本モデルは平フライス切削下向き切削過程を対象とし、被削材は 8 節点六面体要素によって三次元的に要素分割されている。被削材モデルは、工具が平フライス切削に特徴的なトロコイド曲線の軌跡を描くものと仮定し、工具刃先が通過する方向を考慮して要素分割を行う。図 1 左上に送り 0 の場合を例として工具運動の概念図を付記しているが、工具は、直線切れ刃、平面のすくい面を持つ工具を、点線で示す回転面からすくい角、ねじれ角だけ傾斜させる。また、工具回転角 θ は、工具が被削材と接触した初期位置からの角度で定義した。

計算の境界条件としては図 1 中 BCGF を固定し、工具すくい面上節点には 1 ステップ回転後の工具すくい面上にその節点が存在するという条件を与える。初期状態においては工具は被

Fig. 1 Initial simulation model

* 原稿受付 平成7年4月10日

** 正 会 員 神戸大学工学部（神戸市灘区六甲台町）

*** 正 会 員 松下電工(株)（門真市大字門真）

Table 1 Simulation conditions

Cutting conditions	
Tool diameter 100 mm, Radial rake angle 4°	
Number of the teeth 5, Tool rotation speed 500 rpm	
Tool helix angle 15°, 30°	
Depth of cut 20 mm, Width of cut 2.3 mm	
Feed rate 500, 1 000, 1 500 mm/min	
Work material	
S 45 C $\sigma = 1180(\bar{\epsilon} + 0.002)^{0.18}$ MPa	

削材と1点で接触する。

2.2 工具-被削材の接触問題の処理手法

図1で示された初期モデルから工具回転の境界条件を与えシミュレーションを行う。その際、計算の初期には上述のように工具と節点は1点で接触しているが、工具の前進に伴って接触する節点に変化する。

工具刃先部分による材料分離の処理は、幾何学的処理法⁶⁾，すなわち工具刃先がある程度到達した節点に対し節点分離処理を行う。本要素分割では工具切れ刃は節点1点ずつと接近するため、材料分離の判定を節点1つ1つについて行う処理を導入し、プログラムに汎用性を持たせた。

また、工具すくい面上の節点については、工具すくい面上を移動するのか、工具から離脱するのかの判定を行う。具体的には、その節点力の工具面法線方向成分が圧縮の場合、工具すくい面上の境界条件を与え、引張りの場合はその節点は工具から離脱したと判定し、境界条件を工具面上から自由面に変更した。この処理を行うことにより、切削進行に伴って切りくずが工具すくい面から離脱し、そして切りくずがカールする様子がシミュレーションされる⁷⁾。

シミュレーションのフローチャートは前報⁴⁾と基本的に同様であるが、初期モデルとして図1のモデルを用いたこと、工具を曲線運動させたこと、工具刃先における節点分離処理に汎用性を持たせたことが今回のシミュレーションの特徴である。

3. シミュレーション条件

シミュレーション条件を表1に示す。本シミュレーションでは、平フライス下向き切削における切りくず生成過程を、工具ねじれ角 i 、被削材送り量 f を変化させて、切りくず形状、切削力に及ぼす影響を考察した。今回、工具ねじれ角 i は15, 30°の2種類とし、それぞれのねじれ角において送り量 f を500, 1 000, 1 500 mm/minの3通り、すなわち合計6通りの条件でシミュレーションを行った。

今回のシミュレーションにおける初期モデルの要素分割は、図1において x 方向(DA方向)2, 工具回転角方向(AE方向)24, AB方向4, そのうち未切削部分は2であり、要素数192, 節点数376である。また、1ステップ当たりの工具回転角を0.1°程度以下としてシミュレーションを行った。

また、被削材としては炭素鋼S45Cを想定し、相当応力 σ -相当塑性ひずみ $\bar{\epsilon}$ 関係は表1に示す加工硬化のみを考慮したものをを用いた。次に、工具-被削材間の摩擦状態であるが、ここでは摩擦を考えず、摩擦0の場合をシミュレートした。この仮定により、切りくずカール半径や切削力は、摩擦の存在する実際の切削と比較して小さく計算される傾向がある。

なお、シミュレーションは日本サンマイクロシステムズ社製SPARCstation 10, そして計算結果の三次元グラフィック表示はPHIGSにて行った。

Fig. 2 A typical three-dimensional view of simulated chip formation process in plain milling ($i=30^\circ$, $f=1\,000$ mm/min)

4. シミュレーション結果

4.1 切りくず生成過程

図2に、計算によって得られた切りくず生成の過渡的過程を示す。図は、工具ねじれ角 i が30°, 被削材送り速度 f が1 000 mm/minの場合である。図2から分かるように、工具回転角 θ が増加し、切削が進行するとともに切りくずが三次元的に生成してゆく過程がよく理解できる。また、切りくずはカールし、らせん状に流出してゆく過程がシミュレーションされており、興味深い。

切りくず生成は図中、(i), (ii), (iii), (iv)の順に進行するが、(i)の段階では、被削材の一部が分離され、切りくず生成の初期状態であることがわかる。次に、(ii)の工具回転角が11.1°の段階では切りくずはほぼ1回転したカールが認められ、工具ねじれ角の影響のため図中 x 軸の負の方向へ流出している。さらに切削が進行し、(iii)の段階では切りくずはさらに回転しており、またカール半径は工具刃先の方角に行くに従ってやや減少の傾向が分かる。(iv)の段階では、切りくずは明りょ

Fig. 3 Simulated chip geometry in Fig. 2 observed from various direction ($i=30^\circ$, $f=1\,000\text{ mm/min}$)

うならせん状形状を示しており、 x 軸の負の方向に流出している。また、切削の進行に伴う切りくずカール半径減少の傾向が認められるが、それは本シミュレーションの対象が下向き切削であり、工具の回転に従って実質的な切取り厚さが減少することと対応していると考えられる。

図3に、図2の各変形段階における切りくず形状をそれぞれ yz , zx , xy 平面に投影した場合について示す。また、変形部分を3倍に拡大したものを図中の円内に示す。図から、三次元的な切りくず生成の過渡過程が、これら3方向の角度から把握できる。

図3(a)の yz 平面投影図では、切りくずカールによる円形的な形状を次第に生成して行く過程や切りくずカール半径が工具の回転に伴って減少する様子が確認される。また同図から切りくずは y 軸のやや正の方向へ流出して行く傾向が認められる。

一方、同図(b)の zx 平面に投影した図からは、 x 軸の負の方向へあるピッチを持ったらせん状の切りくずの生成過程が分かる。また切りくずは z 軸のやや正の方向へ流出する傾向があることが分かる。また、切りくずカール半径は、切削の進行に伴って減少する傾向を示し、切りくず形状は円すい的な形状を有しているのが分かる。

図3(c)の xy 平面投影においても、切りくずは x 軸の負の方向、 y 軸のやや正の方向に流出しているのが確認できる。

計算機シミュレーションにおいては、このように様々な方向から切りくず生成過程を可視化することが可能であり、切りくず生成過程の様々な情報を得ることができる。

4.2 切削条件による切りくず形状の変化

今回行った6通りのシミュレーション条件について、工具回転角 θ が 35.6° の段階における切りくず形状を、 zx 平面に投影した場合を図4に示す。図から、切削条件により切りくず形状が変化することが分かる。

工具ねじれ角 i が 15° の場合と 30° の場合を比較すると、同じ送り速度の場合、 i が 30° の方がらせん状に流出した切りくずの各円のピッチが大きくなっており、図中 x 軸の負の方向に大きく流出していることが分かる。例えば、送り速度 f が 1500 mm/min の場合、 i が 15° の場合はそのピッチは約 3 mm 程度であるが、 i が 30° の場合は約 6 mm 程度となっている。一方、同じ工具ねじれ角の場合 f の変化による切りくず形状の変化はあまり顕著ではないが、 f が大きくなるに従って、切りくず厚さが大きくなる傾向が認められた。

4.3 切削力

次に、本シミュレーションにより得られた切削力を今回行った6通りのシミュレーション条件によって整理し、図5に示す。図は、工具回転角 θ の増加に伴う切削3分力の過渡的变化を示している。ただし、計算では連続型切りくずが生成しているにもかかわらず、工具刃先部分における節点の分離の処理に対応して、切削力の値は、最大値の数十%の変動が認められたため、変動部分は平均値により示した。

図5から分かるように、全体的に切削初期に切削力の各方向成分は最大値を取り、工具回転の進行に伴って減少の傾向が認められる。また、工具送り速度 f が 500 から 1500 mm/min に増加するに従い切削力の値は大きくなっており、それらの傾向に関しては妥当な結果であると言える。

工具ねじれ角 i が 15° の場合、それぞれの送り速度に対して切削初期において、 F_y と F_z はほぼ同様の値を取り、工具回転

Fig. 4 Variation of simulated chip geometry in several cutting conditions ($\theta = 35.6^\circ$)

に伴って F_z は F_y と比較してより急速に減少する傾向が認められる。また、 F_x は F_y や F_z に比べて切削力の値は小さく、緩やかに減少の傾向が認められる。例えば、 f が 1500 mm/min の場合、 F_y , F_z は切削初期に約 600 N の値を取るが、工具回転角 θ が 20° の段階では F_y は約 400 N , F_z は約 220 N の値を取った後、0へと減少しており、また F_z が F_y より急速に減少の傾向があることが分かる。

工具ねじれ角 i が 30° の場合も同様に、切削初期に F_y , F_z はほぼ同等の値を取った後、 θ の増加とともに F_z は急速に減少する傾向が見られる。しかしこの場合、 i が 15° の場合と比較して F_x の値が大きくなっている。たとえば、 f が 1500 mm/min の場合に注目すると、 F_x は切削初期に、 i が 15° の場合約 220 N , i が 30° の場合約 500 N の値を示しているが、このことは工具ねじれ角の影響により切削力の x 方向成分が

Fig. 5 Variation of simulated cutting forces in several cutting conditions

大きくなったと考えられ、定性的には妥当な結果と言える。

以上のように本報では、実際の境界条件でシミュレーションを行った。本解析では切りくずと被削材や、切りくず同士の接触を考慮していないが、それらを考慮することによって現実に近いシミュレーションが可能となると考えられる。

5. 結 言

本格的な三次元切削のシミュレーションを行うことを目的とし、剛塑性 FEM を用い、平フライス下向き削りにおける切りくず生成過程の三次元シミュレーションを行った。本研究で得られた成果を以下にまとめる。

- (1) 剛塑性 FEM によって、切削初期から切りくずの生成までの過渡過程を連続的に解析することにより、平フライス切削下向き削りの三次元シミュレーションを行うプログラムを開発した。
- (2) 切削の進行に伴う工具回転によって切りくずがらせん状のカールを示しながら生成すること、また、切りくずのカール半径は切削の進行に伴って小さくなることがシミュレーションされた。さらには、工具ねじれ角が大きくなるに従ってカールのピッチが大きくなることが計算された。

- (3) 切削力に関しては切削初期に最大値をとり、その後減少傾向が見られること、また工具ねじれ角が大きくなるに従って工具回転軸方向成分が大きくなるという結果を得た。

参 考 文 献

- 1) 上田完次：計算切削工学，シンポジウム「切削加工の基礎と新しい展開」，精密工学会，(1994) 29.
- 2) 前川克廣，前田正史，北川武揚：三次元連続型切りくず生成過程のシミュレーション解析（第2報）——工具コーナ半径が高マンガン鋼の切削機構に及ぼす影響，精密工学会誌，60, 2 (1994) 240.
- 3) 笹原弘之，常川利之，白樫高洋：三次元切削の有限要素法シミュレーション——工具食付き過程の大変形の解析，精密工学会誌，59, 8 (1993) 1275.
- 4) 真鍋圭司，上田完次，富山慎二：三次元切削機構の剛塑性有限要素法による解析——傾斜切削における切りくず生成機構，精密工学会誌，59, 10 (1993) 1701.
- 5) 広田明彦，臼井英治：平フライス切削における切削抵抗の解析的予測，精密機械，44, 4 (1978) 508.
- 6) 臼井英治：現代切削理論，共立出版，(1990) 65.
- 7) 真鍋圭司，上田完次：剛塑性有限要素法による切りくずカール生成機構の解析，1993年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集，(1993) 309.