陰解法弾塑性有限要素法による切削機構の解析 (第2報)*

—チップブレーカの作用による切りくず生成のシミュレーション—

黄 宗 南** 真 鍋 圭 司*** 上 田 完 次***

Implicit-type Elastic-Plastic FEM Analysis of Cutting Mechanism (2nd Report)
— Simulation of Chip Formation Process Using Chip Breaker —

Zongnan HUANG, Keiji MANABE and Kanji UEDA

Chip formation process using chip breaker is analyzed by implicit-type elastic-plastic FEM (Finite Element Method). By simulating the transition process of carbon steel (S 45 C) cutting, it is found that the cutting process varies when the chip contacts with the workpiece. That is, the chip thickness near the rake face increases, and the cutting force on the rake face decreases, while total cutting force increases. The cutting simulation results including chip shape and the total cutting force are compared with in-situ scanning electron microscope observation of cutting process, and they are in good agreement. The chip formation process is also simulated with changing chip breaker distance. In this simulation, it has been calculated that as the chip breaker distance increases, the chip curl radius increases, and an amount of the increase in the total cutting force decreases.

Key words: cutting simulation, chip breaker, chip curling, implicit-type elastic-plastic FEM

1. 緒 言

切削加工の自動化と無人化に伴い、生産現場における切りくず処理の問題が注目を浴びている。切りくず処理に関しては、実用的な研究が多く報告されており、例えばチップブレーカによる切りくず処理性の向上はその代表例である^{1)~3)}。チップブレーカの開発において、妥当な工具の形状を見出すためには、一般的に多数の実験を必要とする。このような手順を改善するために、切りくずカール生成機構の解明、さらにはブレーカによる切りくず形状や切削力などを予測できる手法の開発が重要となる。

近年、計算機の高性能化に伴い、切削に関する研究においても有限要素法 (FEM) などを用いてシミュレーションが可能となってきた。切りくず処理の問題に関するシミュレーションも行われており、例えば、チップブレーカの作用の解析⁴⁾⁵⁾が報告されているが、定常モデルに基づいているため、ブレーカ作用による切りくず形態や切削力の過渡的变化を把握することは困難である。

本報では、前報⁶⁾で開発した陰解法弾塑性 FEM による非定常解析によって、切りくずが強制的にカールされる過程のシミュレーションを行う。その一例として障害型チップブレーカを用いる場合の切りくず生成過程のシミュレーションを行い、計算結果を実験結果と比較することによって、その妥当性を検討する。そして、ブレーカの寸法を変化させてシミュレーションを行い、切りくず生成過程や工具に作用する切削力の変化を解析し、検討を行う。

2. 解 析 方 法

前報では、陰解法弾塑性 FEM により、切削の開始状態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手法を開発し、それによって、切りくずカール生成過程が解析可能である

ことを示した⁶⁾。今回は、チップブレーカを有する工具の場合の切りくずの生成過程を解析する。

図 1 にシミュレーションの初期モデルを示す。被削材は 4 点 4 角形アイソパラメトリック要素によって分割されており、図中の AB および BC には、固定境界条件を与える。また、工具は剛体とし、チップブレーカを持つ。工具部分の詳細を図 2 に示す。

次に、シミュレーションを行う際の切りくずに与える境界条件について述べる。切りくずは、工具すくい面上を流出した後、ブレーカ面と接触するが、そのとき、その節点にはブレーカの表面の法線方向に拘束条件を与える。また、工具上節点の節点力の法線成分が引張りに転ずると拘束を解除し、自由とする。この方法は基本的にすくい面上の節点の処理と同様である。また、ブレーカと接触している節点がブレーカ面を越えた場合、その節点に対しては、強制的に拘束を解除する。

さらに流出した切りくずは工具から離脱し、カールして被削材の未切削部分に接触する場合が多い。被削材の未切削部分と接触した節点については、未切削部分法線方向に拘束を与える。

以上のような、境界条件変更後は計算が発散することが多いため、その場合、Newton-Raphson 法の反復計算により計算した変位増分の修正量に 1 以下の正の係数を乗じて過修正を緩

Fig. 1 Initial simulation model

Fig. 2 Obstruction-type chip breaker

* 原稿受付 平成 8 年 11 月 5 日

** 学生会員 神戸大学大学院 (神戸市灘区六甲台町 1)

*** 正 会 員 神戸大学工学部

Fig. 3 Flowchart for chip formation process

和し、収束解を得る。その係数の値は、全節点力の釣合いが最も良好なように定める。

図3に計算のフローチャートを示す。まず、材料定数、切削条件および初期モデルを作成するために必要なデータを入力する。次に、シミュレーションの初期モデル、すなわち、図1に示すような未切削状態の被削材および工具からなるモデルを作成し、被削材を有限要素によって分割し、境界条件を与える。

そして、工具前進の境界条件の下で、被削材の各節点の変位増分を陰解法弾塑性FEMによって求め、変形後の各節点の新たな座標およびそのときの各要素内の応力、ひずみ、工具に作用する力などの物理的な量を算出する。

次に、工具刃先前方の被削材の節点が、工具刃先と近づくことによって分離する条件を満たすかどうかを判定する。その節点が分離すると、節点番号に影響するため、節点に番号の更新を行う。また、切りくずと工具すくい面、切りくずとブレーカ面、切りくずと被削材面の接触・離脱の判断を行い、接触あるいは離脱とする節点に対して境界条件を変更する。以上の手順を指定の工具前進のステップ数まで繰り返す。

3. シミュレーション結果

次に、シミュレーション結果を示す。ここでは、被削材として炭素鋼S45Cを想定し、その材料特性、および切りくず-工具、切りくず-被削材間の摩擦特性については、表1に示すものを用い、極低速切削を対象とした。

また工具の寸法は、図2において、すくい角 α を 25° 、ブレーカの幅 L 、高さ H 、くさび角度 θ をそれぞれ0.44 mm、

Table 1 Material and frictional properties

Workpiece	Carbon steel S 45 C (0.45% carbon steel) Young's modulus 206 GPa Poisson's ratio 0.3 Flow stress $\bar{\sigma} = 1180(\bar{\epsilon}^p + 0.002)^{0.18}$ MPa
Frictional condition	Chip/Rake face ⁷⁾ $\frac{\tau_p}{\tau_c} = 1 - \exp\left(-\frac{k\sigma_1}{\tau_c}\right)$, $k=1.6$ Chip/Chip breaker face $\mu=0.3$ Chip/Workpiece $\mu=0.1$

0.15 mm、 40° とした。また切込みを0.10 mmに設定した。

3.1 切りくず形状

図4に、工具の前進に伴う切りくず生成過程のシミュレーション結果の一例を示す。図中 D は、切削距離を切込みで割った値であり、相対切削距離を表す。また計算結果に、降伏状態にある要素を黒く示す。

図から分かるようにチップブレーカの作用が妥当にシミュレーションされている。図4(a)では、すくい面から流出した切りくずの上部がチップブレーカ面と接触している。そして、(b)の段階では切りくずはチップブレーカによって強制的にカールされ、(c)では、ほぼ円形のカールの形成が明瞭に認められる。

(d)の段階に至ると、工具から流出した切りくずが被削材未切削部分に接触する様子を示している。(e)において、被削材と接触した切りくずは、楕円のような形状が形成されることが分かる。その後、(f)に示すように、切りくずは被削材面上を回転しながら、被削材と接触あるいは離脱し、それによって、渦巻形の切りくずが形成されている。

また、切りくずが図(d)において被削材と接触した後、切りくずの工具刃先に近い部分の厚さは厚くなって行くことが分かる。

図4中の黒い要素は降伏状態を示すが、切りくずが被削材と接触する前後の降伏域の分布は異なることが分かる。すなわち、切りくずが被削材と接触する前、塑性域はせん断域に集中するが、切りくずが被削材と接触した後、切りくずのチップブレーカの近傍は再降伏し、新たな塑性域が形成されている。

図5に、図4において、 $D=36$ の段階における切りくず形状のシミュレーション結果を、実験結果と対応させて示す。切削実験は走査型電子顕微鏡直接観察手法⁸⁾であり、表2に実験条件を示す。

図から分かるように、シミュレーションで得られた切りくずの形状は、全体として実験とよく対応している。また、切りくずが被削材と接触した後、切りくずの工具刃先に近い部分が厚くなることは実験でも同様に確認され、本シミュレーションの妥当性が認められる。

次に、チップブレーカの作用による切りくず形状の変化を調べるために、本研究ではチップブレーカがない場合の解析および実験も行った。図6にその結果を示す。切削条件は図4と同じである。同図によると、シミュレーション結果は実験結果とよく対応していることが分かる。そして、図5と図6を比較すると、チップブレーカを有する場合、切りくずは強制的にカールされ、カール半径は小さくなったことが分かる。

図7(a),(b)に、図4(c)と(f)の段階の切りくずの相当応力分布を示す。図7(a)によると、最大相当応力はせん断域に分布している。また、同図を図4(c)の塑性域と対応させて見ると、せん断域を通過した切りくずは除荷していることが分か

Fig. 4 A typical simulation result of chip formation process with chip breaker tool
 $\alpha = 25^\circ$, $L = 0.44$ mm, $H = 0.15$ mm, $\theta = 40^\circ$, $d = 0.10$ mm

(a) Simulated result (b) Experimental result

Fig. 5 Comparison of simulated chip shape with experiment with chip breaker tool
 $\alpha = 25^\circ$, $L = 0.44$ mm, $H = 0.15$ mm, $\theta = 40^\circ$, $d = 0.10$ mm, $D = 36$

る。従って、チップブレーカにより切りくずカール半径は小さくなるが、そのカールもせん断域における塑性変形によって形成されることが考えられる。

図7(b)を図4(f)の塑性域と対応させて見ると、切りくずが被削材に接触した後、ブレーカの近傍に再降伏した切りくず

Table 2 Experimental condition

Tool	High speed tool steel SKH 4 Rake angle $\alpha = 25^\circ$, Clearance angle $\beta = 5^\circ$ Chip breaker distance $L = 0.44$ mm Chip breaker height $H = 0.15$ mm Chip breaker wedge angle $\theta = 44^\circ$
Cutting condition	Depth of cut 0.05-0.10 mm Width of cut 0.70-1.20 mm Cutting speed 1.00 mm/min

(a) Simulated result (b) Experimental result

Fig. 6 Comparison of simulated chip shape with experiment without chip breaker
 $\alpha = 25^\circ$, $d = 0.10$ mm, $D = 16$

Fig. 7 Equivalent stress distribution (MPa)
 $\alpha = 25^\circ$, $L = 0.44$ mm, $H = 0.15$ mm, $\theta = 40^\circ$, $d = 0.10$ mm

Fig. 8 Transition behavior of specific cutting forces with relative cutting distance
 $\alpha = 25^\circ$, $L = 0.44$ mm, $H = 0.15$ mm, $\theta = 40^\circ$, $d = 0.10$ mm

の相当応力はせん断域より大きくなり、また、その最大値は切りくずの内側にあることが分かる。

3.2 切削力

図8に、図4のシミュレーションで計算された切削力の過渡的变化を、実験結果と対応させて示す。切削力は、切込み×切削幅で除することによって、単位切削断面積当たりの力となっている。添字 H, V はそれぞれ主分力方向と背分力方向を表す。計算結果では、切削開始時に各切削力は急激に上昇し、工具が相対切削距離約4を前進してから、主分力方向は約1.94 GPa、背分力は約0.3 GPaの値でほぼ定常状態になっている。

Fig. 9 Variation of chip formation with chip breaker distance L
 $\alpha=25^\circ$, $H=0.15$ mm, $\theta=40^\circ$, $d=0.10$ mm

そして、相対切削距離 D が約 25（切りくずと被削材との接触が始まる点）の部分で急増し、その後、切削力は、工具前進とともに上昇することが分かる。

実験では、切削力は相対切削距離の増加と共に大きくなり続ける傾向が見られ、計算結果のような定常過程がなかった。切削力においては、計算結果と実験結果の相違があるが、全体から見ると、傾向としてシミュレーション結果と実験結果はよく対応すると言える。

以上のように、本研究で開発したシミュレーションの手法は、実験結果をよく説明するものとなり、本手法が妥当であると考えられる。次に、ブレーカの寸法を変化させる場合の切りくず形状や切削力の変化をシミュレーションし、検討を行う。

4. ブレーカ幅 L を変化させた場合の計算結果

上述したチップブレーカに対して、幅 L のみを長く変化させた場合の切りくず生成過程のシミュレーションを行う。すなわち、幅 L の寸法を、それぞれ 0.50, 0.55, 0.60 mm の 3 通りとし、ブレーカの高さ H とくさび角度 θ (0.15 mm, 40°) を一定とした。また、すくい角および切込みは前述したシミュレーションと同様に 25° , 0.10 mm と設定した。

図 9 の (a), (b), (c) に各場合のシミュレーション結果を示す。各図に、切りくずが被削材と接触する前の状態をステージ i とし、切りくずが被削材と接触した後の相対距離が $D=151$ の段階をステージ ii として示す。また、図中に塑性状態の要素を同様に黒く示す。

ステージ i の切りくずが被削材と接触する前の状態では、ブレーカ幅 L の増大に従って、切りくずカールの半径は大きくなることが分かる。また、ブレーカ幅 L の寸法にかかわらず、降伏域はせん断域に集中している。この傾向は、図 4 のシミュレーション結果と同様であり、ブレーカの作用により、切りくずカールの半径はせん断域で形成されたことを再認識した。

次に、ステージ ii で表される、切りくずが被削材に接触し

た後の段階では、ブレーカの付近に切りくずの再降伏が行われている。その再降伏域はブレーカ幅 L の大きいほうがブレーカの上方に生じる傾向がある。また、切りくずが被削材と接触した後の切りくず厚さの増大はブレーカ幅 L の減少に従って大きくなることが認められた。

次に、工具面上の切削抵抗の計算結果を図 10 に示す。グラフ中、 F は工具全体に作用する切削力である。また、 F の内、すくい面とブレーカ面上に作用する力をそれぞれ P, B とする。添字 H, V はそれぞれ主分力方向と背分力方向を表す。

図 10 (a) は幅 $L=0.50$ mm の場合の計算結果であり、相対切削距離 D が約 40 の段階で、切りくずと被削材との接触が始まる。そのとき、図 (a-1) 中の F_H, F_V は増大傾向を示し、その後、また増大し続けることが分かる。

同図 (a-2) では、 F の成分である P と B の変化を示す。図から分かるように、切りくずが被削材と接触したときすくい面上の P_H は急激に減少する。また、その後、 P_H, P_V は緩やかに減少して行く傾向がある。一方、この過程にブレーカ面上の B_H, B_V が急激に増加し、その後増大し続け、さらに相対切削距離 D が約 118 を越えると、 B_H は P_H より大きくなることが分かる。従って、図 (a-1) に示される合力 F_H, F_V の増大傾向は、ブレーカ部の力 B_H, B_V に影響されたことが分かる。

以上のような F, P, B の変化は傾向として幅 $L=0.44$ mm の場合（図 4）のシミュレーションと同様である。

図 10 (b) にブレーカ幅 $L=0.55$ mm の場合の計算結果を示す。切りくずが被削材と接触した（ D 約 50 の段階）始めの段階では、 F_H, F_V, B_H, B_V の増大の傾向が見られるが、その次の増大は (a) の $L=0.50$ mm の場合のように激しくなく、徐々に進んでいくことが分かる。また、その過程においては、すくい面上の P_H は切りくずが被削材と接触した時点で急に減少するが、その後、(a) の場合とは異なり、ほぼ一定値を示す。

図 10 (c) はブレーカ幅 $L=0.60$ mm 場合の計算結果である。切りくずが被削材と接触するのは相対切削距離 D が約 65

F: The total force on the tool ($F=P+B$), P: The force on the rake face, B: The force on the chip breaker face,
H: Horizontal direction, V: Vertical direction

Fig. 10 Variation of the forces F , P and B with chip breaker distance L
 $\alpha=25^\circ$, $H=0.15$ mm, $\theta=40^\circ$, $d=0.10$ mm

の段階である。F, P, B の変化については、傾向としてケース (b) と同様であるが、ケース (c) のほうが切削力の増加は緩やかであることが分かる。

以上に、本研究で開発したシミュレーション手法により、ブレイカ幅 L を変化させた場合の計算結果を示した。また、ブレイカのくさび角度 θ を変化させた場合のシミュレーションも行ったが、 θ が小さくなると、切りくずの流出は滑らかになり、また、被削材と接触した後の切削抵抗の変化は上述したブレイカ幅 L が大きく変化する場合の結果と同様の傾向が認められた。

このように、本研究で開発した手法は、チップブレイカの寸法を自由に設定した場合の切りくず形状や切削力なども実験を行わずに計算できるため、切りくず処理やチップブレイカの設計に有用性があると考えられる。

5. 結 言

陰解法弾塑性 FEM により、チップブレイカを有する工具の場合の切りくず生成過程の解析方法を開発し、シミュレーションを行った。本研究の成果を以下に述べる。

- (1) 工具から流出した切りくずが被削材と接触する前段階では、塑性域は切削せん断域のみに存在することが計算された。
- (2) 切りくずが被削材と接触した後、工具刃先に近い部分の切りくずの厚さは厚くなる。そのとき、すくい面上の主分力は著しく減少し、ブレイカ面上の切削力や工具全体の切削力は増大する。さらに、ブレイカの近傍に切りくずの再降伏が行われ、切りくず内側の相当応力は大きい。
- (3) シミュレーションによる切りくず形状や工具全体の切削力は走査型電子顕微鏡内の切削実験の結果とよい対応が

認められた。

- (4) ブレイカ幅 L を変化させてシミュレーションを行った。 L が大きくなると、切りくずカールの半径は大きくなる。また、切りくずが被削材と接触した後、工具刃先に近い部分の切りくず厚さの増加は小さくなり、ブレイカ面上や工具全体に作用する切削力の増大は緩やかになる計算結果が得られた。

最後に、本研究の実験において、工具および実験装置の部品を提供された住友電工(株)の池ヶ谷明彦氏、村上大介氏に感謝します。

参 考 文 献

- 1) 中山一雄：チップブレイカの研究，日本機械学会論文集，**27**，178 (1961) 833.
- 2) 長谷川嘉雄，花崎伸仲，藤原順介，和田任弘：チップブレイカに関する研究——広域型チップブレイカの乾式切削における切削性能，精密工学会誌，**54**，10 (1988) 1975.
- 3) I. S. Jawahir: On the Controllability of Chip Breaking Cycles and Modes of Chip Breaking in Metal Machining, Ann. CIRP, **39**, (1990) 47.
- 4) 帯川利之，笹原弘之，臼井英治：チップブレイカ作用の有限要素法解析，精密工学会誌，**58**，12 (1992) 2051.
- 5) 帯川利之，篠塚 淳，白樫高洋：溝型すくい面工具の切削特性の解析的予測，精密工学会誌，**61**，9 (1995) 1295.
- 6) 真鍋圭司，黄 宗南，上田完次：陰解法弾塑性有限要素法による切削機構の解析——radial return 法による定式化と切りくずカール解析，精密工学会誌，**62**，8 (1996) 1151.
- 7) 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.
- 8) 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.