三次元切削，多刃工具切削の予測技術*

広田明彦**

真鍋圭司***

Techniques for Prediction of Cutting Process with Single-point or Multi-edged Cutting Tools /

Akihiko HIROTA and Keiji MANABE

Key words: conventional cutting, three-dimensional cutting, cutting process, milling, drilling, chip formation, cutting forces, energy approach, finite element method, simulation analysis

1. はじめに

切削形式を分類すれば，すくい面が単一平面からなる工具の直線の 1 切れ刃が切削速度方向に直交して置かれ，切削幅が切削厚さに比べて十分大の状態で行われる二次元切削，同様な工具が切削速度方向と傾いて置かれて切削が行われる傾斜切削，さらにバイトのように主切れ刃のみでなく前切れ刃やノーズ部といった 2 切れ刃以上が切削に関与する場合がある。後者は傾斜切削を含め狭義には三次元切削である。

またより複雑な場合には，すくい面が曲面からなり切れ刃が曲線からなるねじれ刃のフライスや，すくい角や傾斜角が切れ刃に沿って変化するドリルの切削がある。これらは複数以上の独立した切れ刃をもつ工具（多刃工具）による切削であり，広義の意味での三次元切削である。

実際に遭遇する切削加工の多くは，上述の三次元切削であるにもかかわらず理論的，解析的な研究は平面ひずみ状態として取り扱うことができる二次元切削に関するものが多くを占めてきた。もちろん，三次元切削に関しても，多

くの研究が行われてきたが，切りくず形状の幾何学，切りくずの流出方向，切削抵抗といった個々の事柄を実験に基づき議論するものが多かった。

このような状況下において，種々の材料に対して数多く公表されている二次元切削データを積極的に利用して，三次元切削の切りくず生成状態と切削抵抗の予測が試みられ始めたのはここ約 20 年の間であり，コンピュータの利用無くしてこの成功は考えられない。またコンピュータの記憶容量，演算速度の飛躍的な向上により，有限要素法による三次元切削のシミュレーション解析が試みられ，理論的な面からより詳細な検討が行われるようになってきた。本稿では多刃工具による切削を含め三次元切削に関する予測手法について述べる。

2. バイトによる三次元切削

図 1 は垂直すくい角 α_s ，平行すくい角 α_b でノーズ部をもつバイトが，すくい面への投影切削面積が Q である部分を削ってゆく場合に，せん断面切削模型を適用して切りくず生成状態を表現したものである。切れ刃のノーズ部に対応して楕円筒面，主切れ刃に対応して台形状の平面からなるせん断面があり，ここでせん断変形を受けた切りくずはすくい面内で主切れ刃に立てた垂線とある角度 η_c （切りくず流出角という）をなす方向に一体となって流出する。切削速度 V と切りくず流出速度 V_c を含む面内で考えた切削厚さは切れ刃位置によって変化するが，各面内のすくい角 α_e （有効すくい角という）とせん断角 ϕ_e （有効せん断角という）が同一の二次元切削的な変形が行われているとみなすことができる。

したがって実際の変形は三次元塑性流れであるが，全体

* 原稿受付 平成 6 年 3 月 8 日
** 正 会 員 成蹊大学工学部（武蔵野市吉祥寺北町 3-3-1）

*** 正 会 員 神戸大学工学部（神戸市灘区六甲台町 1）

広田明彦

1973 年東京工業大学大学院博士課程（生産機械工学専攻）修了，工学博士。三次元切削，フライス切削，ドリル切削の切削機構の塑性学的解析，チップブレイカに関する研究等に従事

真鍋圭司

1986 年神戸大学大学院修士課程（生産機械工学専攻）修了，工学博士。切削過程のシミュレーションの研究に従事

図1 バイトによる切削での切削模型

の切削機構を切れ刃位置によって切削厚さが異なる二次元切削の集積ととらえ，切削速度 V と切りくず流出速度 V_c を含む面内での状態を二次元切削のそれと同一と仮定して，二次元切削の力学的データを用いることによって切りくず生成状態，切削抵抗3分力を求めることができる。この手法はエネルギー解法と呼ばれている^{1)~3)}。

同図の切削模型での全切削仕事率は，切りくず流出角のみの関数として与えられる（後述の切削模型では，必ずしも1変数のみの関数で与えられるとは限らない）。そこで全切削仕事率を最小とする方向に切りくずが流出すると考えて，解となる切削状態を定めている。切りくず生成状態と切削抵抗に関する予測結果と実測結果は良好な一致を示した。その後，三次元切削の温度分布の計算，工具摩耗の進展状況の予測の際にもこの切削模型は利用され多くの成果が得られている¹⁾。

このエネルギー解法は，単粒研削の切りくず生成過程に対しても展開されている。三角形や台形のすくい面を持つ

切れ刃によって，完全な切りくずが生成される場合と，それ以外に不完全切りくず，半生成切りくず壁，盛上がり壁が生成される場合の切削模型が提案され，これによる予測結果と実測結果との比較を通して，切削抵抗の予測は可能であることが示された^{4)~7)}。実際の研削では，多数の砥粒切れ刃が同時に切削に関与するのでより複雑な取扱いが必要となるが，切削機構を塑性学的に取り扱うことによって仕上面生成に関する新知見を与えた。

一方，傾斜切削の切れ刃に垂直な面内での変形を二次元切削と同等な平面ひずみ変形として取り扱い，切りくずの流出方向を Stabler 則で決定し切削抵抗の予測を試みたもの⁸⁾，Stabler 則が切れ刃の微小部分で成立するとして，切りくず流出方向と切削抵抗に及ぼすノーズ半径の影響を検討したものもある⁹⁾。これらを含めて，バイトによる三次元切削の二次元化の取扱いに関する他の手法が，展開，記述されている書物¹⁰⁾がある。

3. 多刃工具による切削

すくい面が三次元的な曲面からなるねじれ刃平フライスによる切削では，図2に示すように切削厚さが切削速度方向ばかりでなく切削幅方向にも連続的に変化する。しかしバイトの垂直すくい角，平行すくい角に相当する角 α_n ， i は切れ刃上のすべての点で一定値をとる。そこですくい面の接平面内で切れ刃に垂直な方向から一定の角 η_c の方向に切りくずが流出すると仮定すると，1切れ刃の全体の切削機構は切削厚さが切れ刃位置によって変化する傾斜切削の集積と近似することができる。種々のすくい角，ねじれ角を持つ工具の回転角による切削抵抗の変化が検討され，ねじれ角が 25° 程度の範囲では，エネルギー解法によ

図2 ねじれ刃平フライス切削における切れ刃の運動軌跡と切れ刃微小部分での傾斜切削近似

(a)：円すいらせん形切りくず，(b)：長ピッチ形切りくず，
(c)，(d)：切りくずが横向きカールする場合の切りくず流出速度の関係，(e)：(c)に対応する場合のせん断面切削模型

図3 ドリル主切れ刃による切りくず生成状態

る計算値と実測値との良好な一致が得られている¹¹⁾。

また切れ刃の微小部分で傾斜切削模型を想定して，二次元切削の比切削抵抗の実験値を用いエンドミルの切削抵抗を計算しているものもある¹²⁾。

ドリル切削では，切削厚さは切れ刃に沿ってほぼ一様であるが，切削速度，垂直すくい角，切れ刃傾斜角が変化するため，図3に示すように切りくずは，切れ刃各点で切りくず流出方向，せん断角が異なる状態で生成され，またねじれ溝等の拘束を受けることによって円すいらせん形，遷移折断形，長ピッチ形と種々の形状をとる。したがって，ねじれ刃平フライス切削の場合のように，主切れ刃に沿う全体の切削機構を単に切れ刃微小部分の傾斜切削の集積ととらえることはできない。

切りくず形状は上向きカール，横向きカールおよび切りくず流出角によって決定される。そこで図3に示されているように，切りくずの横向きカールと切れ刃に沿う流出角の変化を考慮し，切りくずが剛体として流出できる条件を導入した切削模型が開発され，エネルギー解法がドリル切削の場合に拡張された¹³⁾。また長ピッチ形の切りくずの生成状態の実現性が検討され，わずかな切削状態の変化によって円すいらせん形から長ピッチ形の切りくずに容易に移行することが示された¹⁴⁾。

以上の主切れ刃に関するものに対して，チゼル部の切りくず生成状態と切削抵抗を解析的に取り扱った論文は非常

図4 主切れ刃とチゼル刃で生成されたらせん形切りくずと，計算で得られたチゼル刃上の異なる半径位置での変形状態

に少ない。旧来の高速度工具鋼のドリルのチゼル部は，スラストの大部分を受け持つから，この部分に作用する切削抵抗の大きさの評価が可能になれば切削条件の設定に有効である。一つの試みとしてチゼル部のすくい面幅が一様となるようにシンニングされたドリルの切削が取り扱われた。ここでは切りくずとすくい面の接触状態を考慮して，傾斜切削での切れ刃傾斜角に相当する角（相当傾斜角）が導入されている。この角の導入によって，ドリル中心部で生成される切りくずは滞留することなく流出でき，チゼル部でも図4に示されているようにらせん形切りくずが生成されることが解析的にも示された¹⁵⁾¹⁶⁾。

なお主切れ刃側も含めて切れ刃上の微小部分で二次元切削のデータを利用して切削抵抗を求めるもの¹⁷⁾，また逃げ面をベベル研削し，主切れ刃側では切りくずの流出方向を仮定して傾斜切削模型を用い，チゼル部に関してはすべり線場解に基づく模型も利用して切削抵抗の予測を試みたもの¹⁸⁾が公表されている。しかしながら，これら国外の論文では切削抵抗の評価が主眼であり，変形状態を含めた予測はほとんどなされていない。

4. 有限要素法による三次元切削の解析

4.1 FEM 解析の概要

金属切削機構を理論的に解析するには，弾塑性有限変形問題，熱伝導問題などの基礎支配方程式を，工具による材料除去過程の境界条件および初期条件の下で解くことが必要である。しかし，このような問題の解析解を得ることは一般的にはほとんど不可能である。このためコンピュータを利用する有限要素法（以下，FEMと略記する）などによる数値解析法，シミュレーション手法が有力な解析手法となる。そして近年のコンピュータのめざましい発達に伴い，三次元切削の解析も可能となってきた。本格的な三次

元切削のシミュレーション例が報告されたのは，1990年代に入ってからのことである。

塑性変形解析のためのFEMには大別して，弾塑性FEM，剛塑性FEMがある。

弾塑性FEMでは，通常 Updated-Lagrange 法に基づいた定式により，応力増分（あるいは応力速度）を求め，それらを変形履歴に従って積分していくことによって応力場を解析する陽解法的手法が一般的に用いられている．その定式により，工具の前進に伴う有限変形過程をシミュレートし，弾塑性変形過程を忠実に解析する手法である．弾性変形を無視できない問題や，残留応力を含む問題の解析に適した解析法である。

一方，剛塑性FEMは，弾性ひずみを無視し，塑性ひずみ速度成分と偏差応力の関係式（Lévy-Mises 方程式）を用い，各ステップにおいて塑性ひずみ速度場および応力場を直接決定する解析法である．材料の弾性変形を無視できる場合，大変形過程の効率のよい解析が可能である。

4.2 切削過程の解析手法

切削過程，特に切りくずの生成過程をFEMによって解析する手法は，臼井¹⁾によれば以下の二つに分類される。

(1) 反復収束法

これは定常状態の解を効率よく求めることのできる手法である．一般に，切りくず形状は未知であるが，切りくず形状をあらかじめ与え，反復計算によって定常解を求める手法である。

(2) 前進収束法

これは切削初期から定常状態に至るまでの過程を連続的に解析し，定常状態の解を求めようとするものである．前進収束法という名称の「収束」とは，定常状態への収束を意味しているものと思われるが，本手法は過渡的切削過程を直接解析できるため，非定常切削過程に対しても適用できる。

二次元切削過程に関しては，これらの解析手法を用いて多くの解析がなされてきた．FEMのプログラムは，要素剛性マトリクスなどの各マトリクスを二次元用から三次元用に拡大するだけで二次元プログラムを三次元プログラムに変更できる汎用性を備えており，上述の原理はそのまま三次元シミュレーションに応用することができる。

4.3 三次元切削のシミュレーション例

反復収束法を適用して，弾塑性FEMによる三次元解析に用いられた初期モデルの例を図5に示す．高マンガン鋼（18%Mn-5%Cr）の超合金（P20）による三次元切削における定常状態の切りくずの変形場および温度分布が解析され，さらに工具すくい面上の摩耗状態の予測が試みられている¹⁹⁾²⁰⁾。

次に，前進収束法による食付き過程の弾塑性FEM解析例²¹⁾を図6に示す．解析対象は弾完全塑性体であり，ひ

図5 反復収束法による初期モデル¹⁹⁾

L: 切削距離

工具：(0, 0, 6, 6, 0, 0, 0)，切込み：0.3 mm，切削幅：1.0 mm，乾式切削

図6 前進収束法による解析例²¹⁾

(a) L=200μm

(b) L=400μm

(c) L=870μm

(d) SEM 内実験結果，L=870μm

すくい角：0°，傾斜角：20°，切込み：350 μm，切削幅：700 μm

図7 剛塑性FEMによる解析例

ずみ速度と温度の効果は無視されている。同図の有限要素の変形は，切れ刃の食付きから切りくずの生成までの過渡過程をよく表現している。切削抵抗や被削材内部，工具すくい面上の応力状態などが解析され，シミュレーション結果は プラスティシオンを被削材とした実験結果とよく対応している。

また剛塑性 FEM を用い，前進収束法による傾斜切削過程のシミュレーション^{22)~24)} 結果の一例を図 7 に示す。被削材は炭素鋼 S 45 C，極低速切削条件の場合である。工具前進に伴う三次元的な切りくずの生成過程がシミュレートされており，走査型電子顕微鏡内での切削実験で得られた切りくず形状とよく対応している。

5. お わ り に

バイトや多刃工具による三次元切削の切削機構を二次元切削的な変形の集積ととらえ，二次元切削に相当する力学的データを利用して，切削抵抗のみならず切りくず生成状態の予測が可能なエネルギー解法について述べた。この解法で必要な実験データの収集は容易であり，また予測された情報を用いて切削温度等の解析も可能である。一方，コンピュータ性能の向上により，三次元切削過程の FEM によるシミュレーション解析も可能となってきた。材料特性，摩擦特性等のデータが完備されれば，実際に切削を行うことなく，三次元切削における切削抵抗，切りくず生成状態，工具すくい面上の応力分布やその過渡過程，さらには温度分布等が予測できるようになるであろう。これらの CAE 技術は改良が加えられつつ，今後ますます発達してゆくことは確かである。

参 考 文 献

- 1) 臼井英治：現代切削理論，共立出版，(1990)。
- 2) 臼井英治，益子正巳：三次元切削の基礎的研究（第 1 報），日本機械学会論文集，**38**，316 (1972) 3255。
- 3) 臼井英治，広田明彦，益子正巳：三次元切削の基礎的研究（第 2 報），日本機械学会論文集，**38**，316 (1972) 3264。
- 4) 臼井英治，井上 誠：砥粒切削機構の塑性学的解析（第 1 報），精密機械，**44**，8 (1978) 988。
- 5) 井上 誠，臼井英治：砥粒切削機構の塑性学的解析（第 2 報），精密機械，**45**，4 (1979) 487。
- 6) 井上 誠，古川恒久，臼井英治：砥粒切削機構の塑性学的解析（第 3 報），精密工学会誌，**53**，8 (1987) 1234。
- 7) 井上 誠，萩原親作，臼井英治：砥粒切削機構の塑性学的解析（第 4 報），精密工学会誌，**54**，2 (1988) 340。
- 8) G. C. I. Lin, P. Mathew, P. L. B. Oxley and A. R. Watson : Predicting Cutting Forces for Oblique Machining Conditions, Proc. Instn. Mech. Engrs., 196, (1982) 141。
- 9) H. T. Young, P. Mathew and P. L. B. Oxley : Allowing for Nose Radius Effects in Predicting the Chip Flow Direction and Cutting Forces in Bar Turning, Proc. Instn. Mech. Engrs., 201, (1987) 213。
- 10) P. L. B. Oxley : Mechanics of Machining, Ellis Horwood Ltd., Chichester, (1989)。
- 11) 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。
- 12) E. J. A. Armarego and N. P. Deshpande : Computerized Predictive Cutting Models for Forces in End-Milling Including Eccentricity Effects, Ann. CIRP, **38**，1, (1989) 45。
- 13) 広田明彦，笠原和夫：ドリル加工における切りくず生成状態と切削抵抗の解析的予測（第 1, 2 報），精密機械，**47**，8 (1981) 987 ; **47**，9 (1981) 1102。
- 14) 笠原和夫，広田明彦：すくい面が平面からなるドリルの切削と長ピッチ形切りくず生成機構の解析，精密工学会誌，**56**，6 (1990) 1075。
- 15) 広田明彦，田中正浩，笠原和夫：ドリル加工における切りくず生成状態と切削抵抗の解析的予測（第 3 報），精密工学会誌，**53**，8 (1987) 1246。
- 16) 広田明彦，笠原和夫，田中正浩：ドリル加工における切りくず生成状態と切削抵抗の解析的予測（第 4 報），精密工学会誌，**54**，6 (1988) 1156。
- 17) S. Wiriyacosol and E. J. A. Armarego : Thrust and Torque Prediction in Drilling from a Cutting Mechanics Approach, Ann. CIRP, **28**，1, (1979) 87。
- 18) A. R. Watson : Drilling Model for Cutting Lip and Chisel Edge and Comparison of Experimental and Predicted Results. I-IV, Int. J. Mach. Tool Des. Res., **25**，4, (1985) 347; **25**，4, (1985) 367; **25**，4, (1985) 377; **25**，4, (1985) 393。
- 19) 前川克廣，前田正史：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 1 報），精密工学会誌，**59**，11 (1993) 1827。
- 20) 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），精密工学会誌，**60**，2 (1994) 240。
- 21) 笹原弘之，帯川利之，白樫高洋：三次元切削の有限要素シミュレーション，精密工学会誌，**59**，8 (1993) 1275。
- 22) K. Ueda and K. Manabe : 3-Dimensional Rigid-Plastic FEM Simulation of Chip Formation Process, Proc. 7th Int. Prec. Eng. Seminar, Kobe, Japan, May (1993) 113。
- 23) K. Ueda and K. Manabe : Rigid-Plastic FEM Analysis of Three-Dimensional Deformation Field in Chip Formation Process, Ann. CIRP, **42**，1, (1993) 35。
- 24) 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，精密工学会誌，**59**，10 (1993) 1701。