



砥粒切削過程の有限要素シミュレーション*

— 負のすくい角における切削状態の解析 —

大淵慶史 ** 帯川利之 ***

FEM Simulation of Abrasive Grain Machining Processes
- Cutting States with Negative Rake Faces -

Yoshifumi OHBUCHI and Toshiyuki OBIKAWA

A thermo-elastic-plastic finite element modeling of orthogonal cutting with a negative rake single-grit has been developed to understand the mechanics and thermal aspects of chip formation, which is the fundamental metal removal process of grinding. A stagnant chip material ahead of the tool tip, which is peculiar to the machining with a large negative rake, is introduced into the modeling to act like a built-up edge. This modeling coupled with temperature and strain-rate dependent flow stress characteristics of a work material SK-5 produces the serrated chips, which are usually observed experimentally under the cutting conditions of grinding region. There appear high and low temperature zones in turn according to severe and mild shear in the primary shear zone respectively. Simulations with and without a stagnant region show the importance of its role in the chip formation with a large negative rake. The shape of chip is affected by cutting speed and depth of cut; as Peclet number of deformation zone decreases with decreasing cutting speed or the depth of cut, serrated and long chips become difficult to form.

Key words : grinding, single grit cutting, FEM analysis, chip formation

1. 緒 言

研削における基本過程は砥粒による切削である。従って微視的な砥粒切削過程を理解することにより巨視的な研削過程が明らかになると考えるのは極めて自然であり、これを指向した研究が長年にわたって行われてきた^{1)~9)}。多くの研究では、基本的な砥粒切削モデルとして大きな負のすくい角による準二次元切削が行われ、通常の切削との相違から幾つかの砥粒切削機構が提案された^{1)~7)}。しかしそれらの砥粒切削機構は、比較対象の切削機構と比べはるかに定性的であり、また実際の加工への適用性も乏しいものであった。一方、実砥粒による単粒切削実験も行われた⁸⁾⁹⁾。実砥粒による切りくず生成状態は三次元的で複雑であり砥粒形状の影響をおおきく受ける⁹⁾。また盛上がりや上滑りなど切りくず生成以外の要素が支配的となる場合も多く複数の変形モードが混在するため、砥粒切削機構を切削抵抗や加工面の観察などの測定のみから推測することは困難であった。

砥粒切削機構の解明が十分に進展しない状況に対して、金属切削では、計算機シミュレーションによる予測が可能になってきた¹⁰⁾¹¹⁾。砥粒加工に対しても同様のシミュレーション技術が適用できれば、研削における切りくず生成過程の定量的な解析や種々の研削条件における砥粒切削状態の予測が可能になると考えられる¹²⁾。現在、超高速研削などの新技術の開発とその適用領域の開拓が盛んに行われており、従来の常識では推し量ることのできない現象がしばしば現れる。砥粒切削状態の定量的なシミュレーションは、これらの現象の解明にも役立つものと思われる。そこで本報では、これまで困難であると考えられていた砥粒切削過程の解析法を確立すること

を目的として、有限要素法によるモデル化と砥粒切削シミュレーションを行った。

2. 大きな負のすくい角による切削過程のモデル化

2.1 滞留層

砥粒切削過程のように大きな負のすくい角による切削では、図1に示すような三角形の滞留層がすくい面前方に発生する。喜田らは円すいおよび四角すい工具を使用した実験において滞留層を詳細に観察し、以下の点を明らかにした^{5)~7)}。

- 1) 滞留層はすくい角が大きな負の値になると必ず生成され、その値が大きくなるほど滞留層は大きくなる。
- 2) 分岐点と呼ばれる滞留層の頂点(図1のA点)より上方の材料は切りくずとして除去されるが、下方の材料は除去されず、すくい面に沿って下方または側方に流動する。
- 3) 滞留層は構成刃先のように切れ刃として作用するが、構成刃先のような発生、成長、脱落を繰り返さず、すくい面前方に滞留したままである。

切削における力の平衡より、すくい角が小さくなるほど、合成切削力 R の方向とせん断面とのなす角 ω は大きくなる。砥

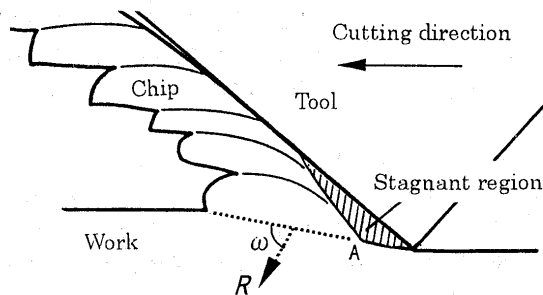


Fig.1 Schematic of typical chip formation with a stagnant region. The shear plane and resultant cutting force meet with an angle ω

* 原稿受付 平成11年12月27日

** 正会員 熊本大学工学部(熊本市黒髪2-39-1)

*** 正会員 東京工業大学工学部(東京都目黒区大岡山2-12-1)

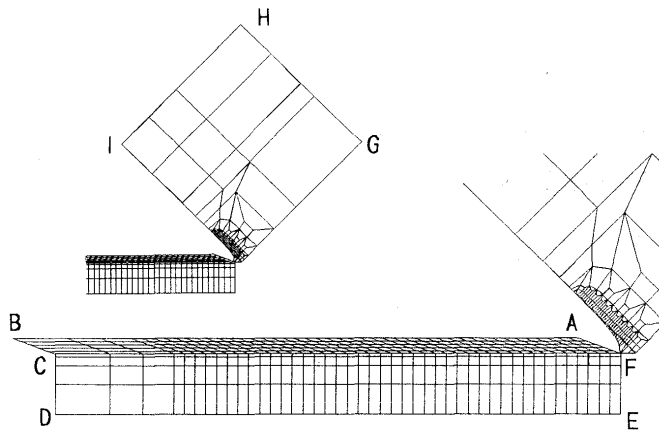


Fig. 2 Finite element mesh

粒での切削のようにすくい角が大きな負の値となれば、その値は直角に近づく。この場合には、せん断面せん断応力が切りくず生成に必要な値に達するとき、せん断面の垂直応力は非常に大きな値となる。特に刃先付近での局所的な垂直応力は、極めて大きな値になるものと予想される。またすくい面と被削材表面のなす角が小さいため、切りくずを生成するための狭いくさび領域全体が大きな圧縮力下に置かれ、その中でもくさび先端の刃先付近では強い拘束力を受けることになる。このような状況下では、くさび領域を貫通するせん断面を形成するのは困難であり、刃先付近のくさび先端領域が死材、すなわち上記の三角形の滞留層を形成する方がエネルギー的に有利である。

喜田らの実験では、すい状の工具が使われたため、滞留層の頂点は工具の頂点より浅くなり、滞留層の頂点より下方の材料は工具の側面へ流動して盛り上がる。これに対して二次元形状の工具を用いた実験³⁾では側方の拘束が大きいため、図1に示すように滞留層は大きく安定しており、頂点の位置は工具先端とほぼ同じ深さ(切込み深さ)になった。本解析では、後者の二次元切削に対応させた滞留層のモデル化を行った。

2.2 すくい面形状の修正および摩擦特性

前述のように、大きな負のすくい角では刃先に滞留層が発生し、切りくずは滞留層前面(図3工具曲線部、以下滞留層すくい面と呼ぶ)に沿って流れるため、実質的なすくい角は大幅に増加する。そこで本シミュレーションでは、滞留層の生成過程は無視し、切削条件に依存した一定の大きさの滞留層が最初から工具の一部として存在するものと仮定した。また滞留層の頂点の高さは砥粒刃先と同じであり、その水平方向の位置は、滞留層の大きさが切削厚さにはほぼ比例するという実験データに基づいて、砥粒の先端より一定距離(切り取り厚さ $\times \tan(-\alpha)$ 、ただし α はすくい角)だけ前方にあるものと仮定した。一方、滞留層すくい面に沿うすくい角の変化は瞬間停止写真を参照して、滞留層の頂点では 0° とし、図3のように刃先から滞留層すくい面に沿って離れるに従い指数関数的に滑らかに減少させた。ただし滞留層は砥粒と異なり被削材の物性値を持つ。

滞留層すくい面での摩擦応力は、すくい面に接する切りくずの局所的なせん断流動応力の50%とした。一方、滞留層が無く砥粒と切りくずとが直接接触するすくい面では白樫らの提案した摩擦特性式¹³⁾を使用し、その特性係数を0.4とした¹⁴⁾。

2.3 滞留層下側の扱い

滞留層の頂点において被削材は切りくずになる部分と、仕上げ面になる部分に分離される。後述の瞬間停止写真では二

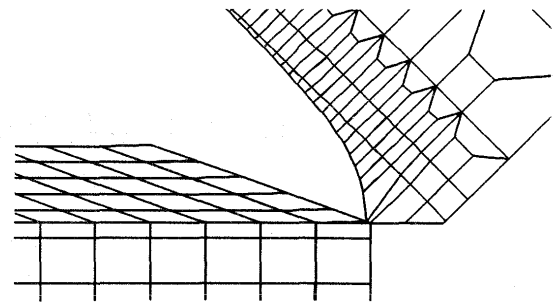


Fig. 3 Finite element mesh around tool tip with a stagnant region

次元切削実験の場合でも滞留層の頂点は切込み深さよりわずかに上に位置することが確認される(図5)。弾性変形を無視すると、非圧縮性の条件より、仕上げ面上の点は、砥粒刃先と同じ高さから、いったん滞留層の頂点の高さまで上昇した後、滞留層から圧縮力を受け、砥粒刃先の高さまで下降したことになる。工具が固定され、被削材が水平に移動する場合を考えると、上記の材料の軌跡と砥粒刃先高さの水平線で囲まれる面積に相当する量だけ、仕上げ面に塑性流動が生ずる。したがって仕上げ面の塑性流動が大きい砥粒切削過程では、切りくずが分離した後の仕上げ面と滞留層の下面との間に作用する応力を考慮する必要がある。本解析では両者の間の垂直応力と摩擦応力を想定し、摩擦応力は滞留層すくい面上と同様に、仕上げ面の局所的せん断流動応力の50%とした。一方、垂直応力は材料分離時の応力状態が維持されるものと仮定した。

3. 有限要素法解析

3.1 有限要素分割

図2に本解析で使用した切削モデルを示す。ABCDEFが被削材であり、4節点のアイソパラメトリック要素で構成されている。上部の平行四辺形要素で構成されている部分が切りくずとして除去される部分であり、傾きは切りくず生成時のせん断方向を考慮して決定した。工具側の有限要素は非定常温度解析のためであり、工具は剛体として被削材の変形のみを扱う。図2の初期状態から左端と下端を固定して刃先を水平方向に移動させ、平面ひずみ状態で二次元切削を行う。工具すくい角は -45° である。図3は刃先付近の拡大図である。刃先に2.2節でモデル化した滞留層があらかじめ設定されている。

弾塑性解析では、切りくず生成過程に対応したupdated Lagrange法による大変形問題の定式化を行った¹⁰⁾。非定常温度解析では塑性仕事と摩擦仕事による発熱を熱源とし、空間的にはガラーキン法、時間的にはクランクニコルソン差分を用いて支配方程式の離散化を行った。境界条件としては、図2のGHIとBCDEを室温 20°C の温度境界、工具-切りくず、工具-滞留層、滞留層-切りくず、滞留層-仕上げ面のそれぞれの界面を伝熱境界、これらの境界を除いた被削材表面、切りくず表面および工具表面を断熱境界とした。

なお、負のすくい角の切削シミュレーションにおいては、切りくず要素の回転とせん断が要素形状を著しくゆがめる。特に凸四辺形を保てなくなれば計算が続行できなくなる。そこで計算の進行とともに凸四辺形を保てなくなった要素とその隣接要素に対してリメッシュを行った。

3.2 節点分離

刃先における節点分離条件は応力やひずみとは無関係に幾何学的条件のみで決定した。通常の正のすくい角の切削シミュレーションではすくい面の前方で節点を分離し、それまで節

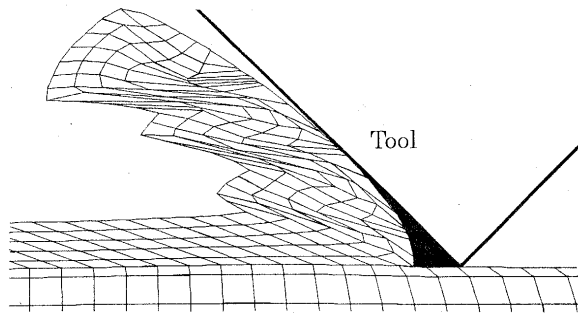


Fig.4 Chip formation simulated. Cutting conditions: work, carbon steel(SK-5); tool, diamond (rake angle, -45°); cutting speed, 20m/s; undeformed chip thickness, 0.05mm

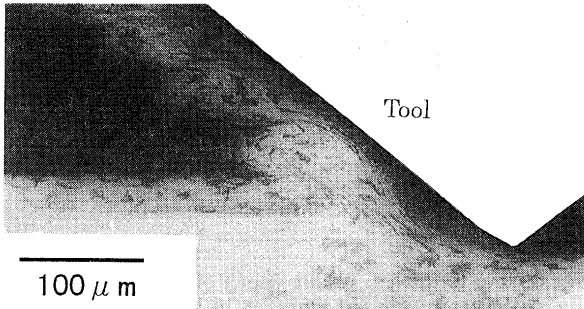


Fig.5 Photomicrograph of a partially formed chip with a stagnant region. Cutting conditions are the same as in Fig.4 except that work is carbon steel (S45C).

点を結合するために必要であった力を、分離によって新たに生じた切りくず節点がすくい面に到達するまでに徐々に解放するという手法を採用した。しかしすくい角が大きな負である場合には、新たに生じた切りくず節点がすくい面から非常に短い距離にあっても、すくい面に到達するのが困難となった。そこで節点が滞留層すくい面に到達した時点で無条件に節点を分離することにした。滞留層すくい面に到達した節点はいったんそこに固定され、すくい面から圧縮力を受けるようになった後、節点に摩擦境界条件が与えられた。また、分離した仕上げ面側の節点は節点を結合するために必要であった力を直ぐには解放せず、砥粒刃先から一定距離に到達してから滞留層下面を通過し終えるまでに徐々に解放した。

3.3 材料特性

被削材には高炭素鋼SK-5を想定した。高温高ひずみ速度の単軸圧縮実験から求められたSK-5の変形応力特性を以下に示す¹⁵⁾。

$$\bar{\sigma} = 380 \exp(-p(\theta - \theta_0)) \left(\frac{\dot{\varepsilon}_p}{1000} \right)^{0.00394} \left\{ \int dW + 0.10 \right\}^{0.145}$$

$$dW = \bar{\sigma} d\varepsilon_p - 613650 \exp\left(\frac{-15560}{\theta + 273}\right) W dt$$

$$p = 3.110 \times 10^{-4}, \theta_0 = 20 \quad (\theta < 420^\circ C)$$

$$p = 4.730 \times 10^{-3}, \theta_0 = 395 \quad (\theta > 420^\circ C)$$

ただし、 $\bar{\varepsilon}_p$ は相当塑性ひずみ、 θ は温度、 p と θ_0 は実験から求まる材料定数であり、応力、ひずみ速度の単位はそれぞれMPa、 s^{-1} である。

4. 結果と考察

最初にシミュレーション結果と実験結果との比較を行うため、すくい角 -45° のダイヤモンド砥粒を用いて、切削速度20m/s、切り厚さ0.05mmの条件で切削を行った。シミュレーション結果は滞留層が存在し、その上を切りくずが流れる

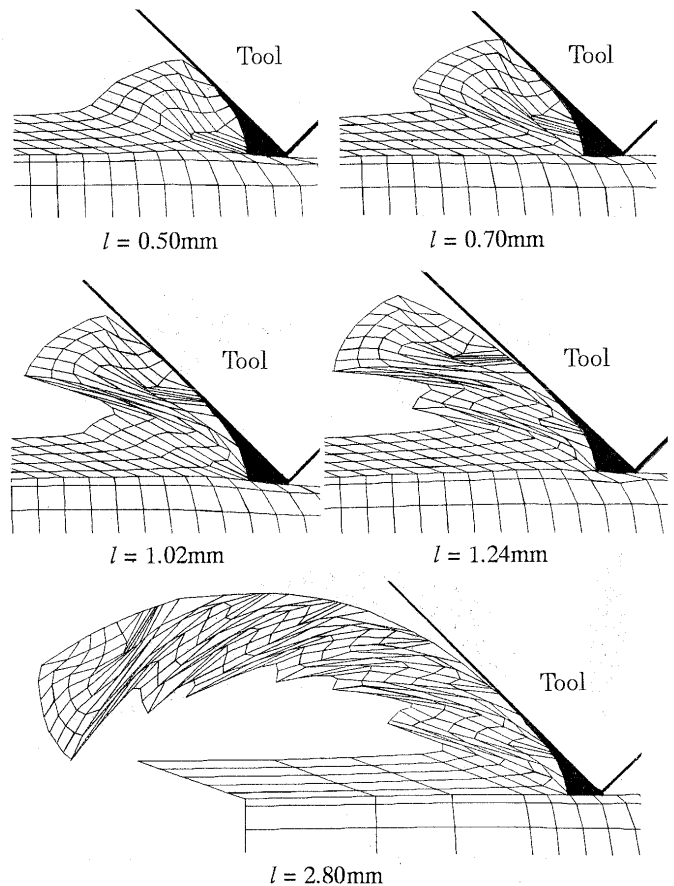


Fig.6 Chip formation with cutting length l . Cutting conditions: work, carbon steel (SK-5); tool, WA (rake angle, -45°); cutting speed, 30m/s; undeformed chip thickness, 0.1mm

場合である。また切削速度は、瞬間停止装置により切りくず生成状態を凍結できる最高速度に設定されている。次にWA砥粒ですくい角が -45° 、切削速度が30m/s、切り厚さが0.1mmの条件で、滞留層が存在する状態を基準切削状態とし、この状態でのシミュレーション結果と、滞留層の無い場合、切り厚さと切削速度を低下させた場合の結果とを比較して、大きな負のすくい角における切削状態の特徴を考察する。

4.1 実験結果との比較

図4, 5にそれぞれシミュレーションと単粒二次元切削実験における切りくず生成状態を示す。ただし切削実験での被削材は炭素鋼S45Cである。両者は、刃先の滞留層の存在、この歯型切りくずの生成、切りくず厚さやこの歯のピッチ等において、非常に類似している。また多くの材料で、すくい角が大きくなるほど、また特に高速度域で、この歯状の切りくずが生成しやすいことが報告されている¹⁶⁾¹⁷⁾。これらの結果より大きな負のすくい角に特有なこの歯状切りくず生成が提案したモデル化によって実現していることが分かる。

4.2 基準切削状態

図6に、上記の基準切削状態における切りくず生成状態の推移を示す。砥粒の進行に伴って、まず切りくずの盛上がりが生じ、切りくずが徐々に厚くなる。しかし切りくず厚さが一定の定常切削状態に収束することなく、局所的なせん断変形が発生して切りくず厚さが減少し、せん断角が増大する。その後切りくずの盛上がりと局所的なせん断変形が繰り返され、その結果、この歯状切りくずが生成されている。基準切削状態における温度分布の推移を図7に示す。切削初期における切

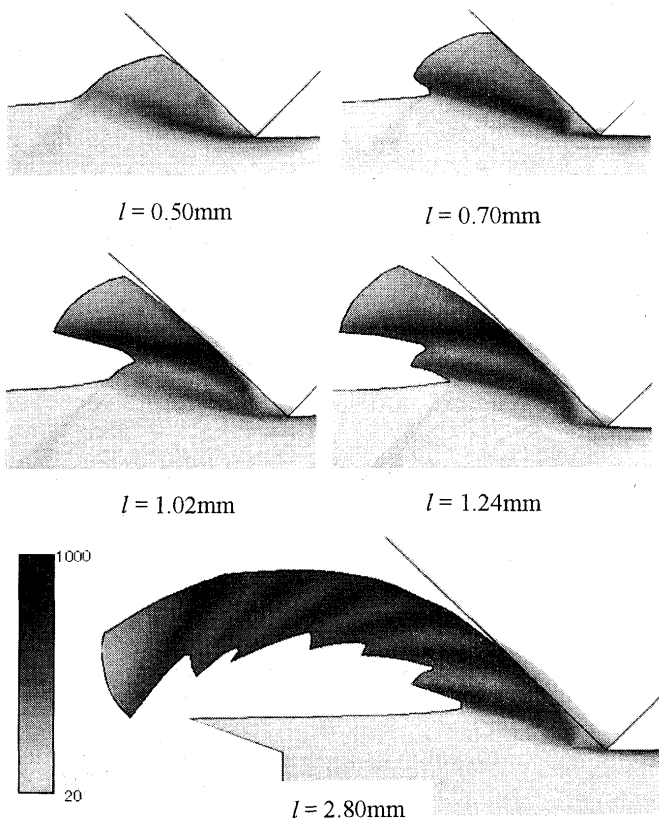


Fig.7 Temperature distribution in °C. Cutting conditions are the same as in Fig 6.

りくずの盛上がり時には切りくず温度が徐々に増加し、いったん局所的せん断変形が発生するとせん断域では急激に温度が上昇する。その後切りくずの盛上がりで局所的なせん断変形が繰り返されると、それに対応した低温域と高温域が交互に現れる。切削速度が速いので、切りくず内の熱伝導は切りくず速度に対して相対的に遅くなり、切削距離2.8mmの最終状態においても温度分布のしま模様が見られる。

本論文では、この歯状切りくずを生じさせるために、き裂の発生・成長のための破壊条件を導入していない。したがってこの歯状切りくずの生成要因はRechtのモデルによるcatastrophic thermoplastic shear¹⁸⁾と類似の機構であると考えられ、その条件が切りくずの盛上がり時に満たされたものと思われる。ただしRechtの数学モデルは切りくず流れのない単純化された状態を対象にしているから、実切削での現象はもっと複雑である。一方滞留層の存在により砥粒先端部の温度上昇は小さく、また切削時間が短いため砥粒内部への熱の移動もわずかである。

4.3 滞留層の影響

図8に砥粒先端に滞留層を付加しない場合の結果を示す。切削条件は基準切削状態と同じである。この場合には切削初期から切りくずの盛上がり持続し、その結果、切りくずはほとんど流れない。切りくずの盛上がりにより、せん断角の減少、切りくず厚さの増大、せん断面長さの増大が生じると、切削力が増大することになり力学的なバランスをとるため工具一切りくず接触長さが増大する。切りくずの流れがほとんどないので、切りくず先端の回転によって工具と切りくずが接触し、工具一切りくず接触長さを増大させる。一方、滞留層のある基準切削状態ではせん断角が約10°に低下すると切りくずが流れ出すとともに局所的なせん断変形が出現した。

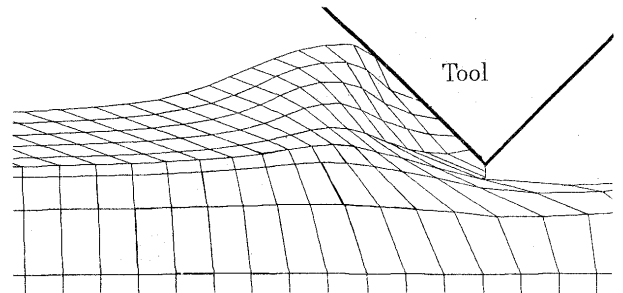


Fig.8 Cutting without a stagnant region. Cutting conditions are the same as in Fig 6.

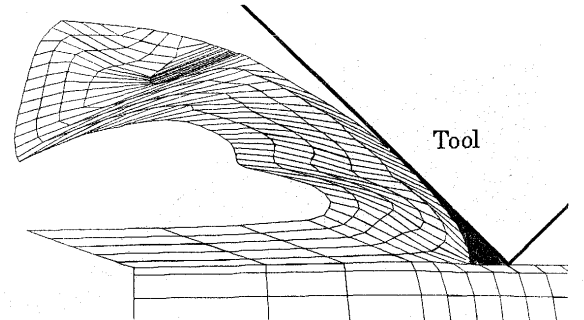


Fig.9 Chip formation under depth of cut 0.005mm. Other conditions are the same as in Fig 6.

これらの結果を比較すると、与えられた切削条件の下においては、刃先付近に滞留した切りくずが孤立化し、構成刃先のように作用する状態がエネルギー的に実現しやすく、より安定な切削状態であることが明らかである。またすくい角が大きな負であることにより、刃先付近には高静水圧が作用するので、付着した滞留層は通常の切削条件で生ずる構成刃先より安定に存在すると考えられる。刃先に付着した滞留層が厚くなれば、実質的なすくい角が増大し、切りくずの流れが容易になる。しかしすくい角の増加が及ぼす切りくず流れへの直接的な影響はそれほど大きくない。このことは、局所的なせん断変形が発生せず、流れ形の切りくずが生成すると仮定すれば、容易に理解できる。この場合、せん断角は局所的なせん断変形が発生する10°より低下する。図6のこの歯状切りくずをみると、工具により擦過された面とその反対側の盛上がり時の表面はおおよそ直角をなしており、これらの二つの面が徐々に平行になり、流れ形の切りくずが生成されるまでには、せん断角がさらに低下し、切りくずが相当に厚くなる必要がある。したがって局所的なせん断変形が良好な切りくず流れに大きく寄与していることは明らかである。

4.4 切取り厚さ低減の影響

図9には切取り厚さを0.005mmにした場合の切りくず生成状態を示す。他の条件は基準切削状態と同じである。切削厚さが小さい場合でも切りくずは良好に生成されている。切取り厚さが0.1mmの場合と比較すると、切取り厚さに対する相対的な局所的せん断変形の間隔が延びて、切りくず厚さの変動が小さくなり、切りくずの形状は比較的滑らかなリボン状となる。得られた切りくずは、内部のひずみが流れ方向に対して不均質になる点で、流れ形とは異なる。

上記のリボン状切りくずの場合でも局所的なせん断変形が良好な切りくず生成に大きく寄与していると考えられる。しかし切削厚さが小さいので、せん断域での塑性変形により発生した熱は相対的に早く拡散する。Rechtのcatastrophic thermoplastic shearは変形が断熱的であるほど生じやすく、その反対に熱拡散が速い状態では生じにくい。したがって切

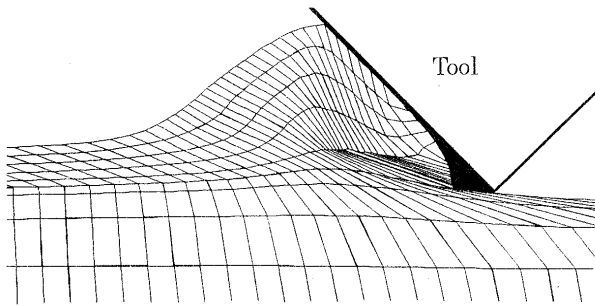


Fig.10 Cutting under depth of cut 0.001mm. Other conditions are the same as in Fig 6.

削厚さが0.1mmの場合に次々と発生した局所的なせん断変形は、切削厚さが0.005mmに低下すると発生条件を満たしにくくなる。これにより相対的に局所的せん断変形の発生間隔が広がったものと考えられる。切取り厚さがさらに小さくなれば局所的なせん断変形が発生せず、その結果切りくずが良好に生成されなくなる。図10は切削厚さが0.001mmの場合であり、刃先に構成刃先のように付着した滞留層があるにもかかわらず図8と同様に盛上がりは持続しており、切削が困難な状態となっている。

4.5 切削速度低減の影響

図11には、基準切削状態から切取り厚さと切削速度の二つをそれぞれ0.01mmと3m/sに低下させた場合の結果を示す。これまで切削速度を研削領域に設定していたが、ここでは切削領域に対応している。対象とする領域の寸法と速度の低下はいずれもその領域のペクレ数を下げるから、切取り厚さを低下させた場合と同様に切削速度を低下させた場合も熱は相対的に速く拡散する。したがって局所的なせん断変形は発生し難くなる。上述のように切削厚さを0.005mmに低下させると局所的せん断変形の相対的な発生間隔は拡大するから、同程度の切取り厚さの低下に加えて速度も大幅に低下させれば良好な切りくず生成が生じ得ないことが予想される。同図の結果では切りくずが盛り上がるだけでほとんど流れがみられず、図10および低切込み低速切削の顕微鏡写真(図12)と非常によく似た結果となった。

以上の結果より、大きな負のすくい角での切削に特有なこの歯状切りくず、より一般的には局所せん断形の切りくずの生成過程を有限要素法によりモデル化できることが分かった。また切削の諸条件が変われば、せん断域からの相対的な熱の拡散速度に応じて、切りくずの生成状態は変化する。こうした現象も提案したモデルにより実現することができた。

5. 結 論

弾塑性変形解析と非定常温度解析を用い、大きな負のすくい角での単粒二次元切削の有限要素モデリングを行った結果、以下のことが明らかになった。

- (1) 大きな負のすくい角での切削においては安定した滞留層が生成される。そこで滞留層を含む有限要素工具モデルを構成することにより、砥粒切削過程に対応する切りくず生成状態を解析的に実現できることが分かった。
- (2) 炭素鋼SK-5の温度・ひずみ・ひずみ速度依存形の材料特性を用いたところ、特別な破壊条件を導入することなく局所的なせん断変形が発生し、実験結果とよく一致するの歯状切りくずがシミュレーションによって得られた。
- (3) 切りくず形状は切削速度や切取り厚さの影響を受けることが解析的に明らかになった。また切りくず生成が困

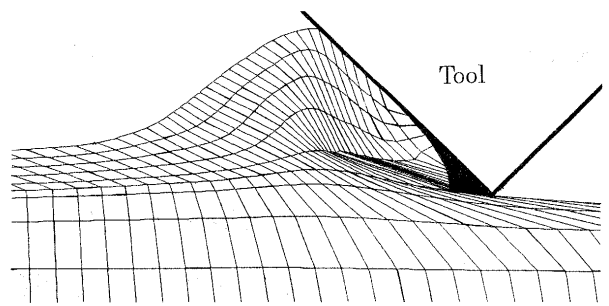


Fig.11 Cutting under low speed. Cutting conditions: cutting speed, 3m/s; undeformed chip thickness, 0.01mm

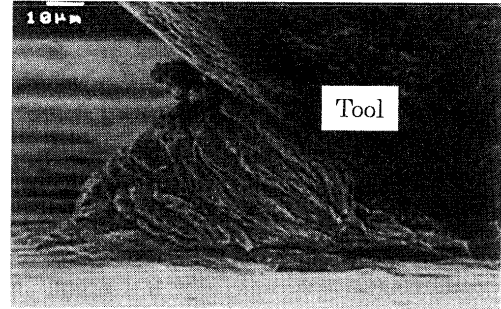


Fig.12 Photomicrograph of very low speed cutting in SEM. Cutting conditions: work, carbon steel (S45C); tool, CBN (rake angle, -45°); cutting speed, $5\mu\text{m/s}$; undeformed chip thickness, 0.005mm

難となる切削条件の範囲が存在することが分かった。

参 考 文 献

- 1) R.Komanduri: Some Aspects of Machining with Negative Rake Tools Simulating Grinding, Int.J.Mach.Tool Des.Res., 11, 12 (1971) 223.
- 2) S.Malkin: Negative Rake Cutting to Simulate Chip Formation in Grinding, Ann. CIRP, 28, 1 (1979) 209.
- 3) Y.Ohuchi and T.Matsuo: Force and Chip Formation in Single-Grit Orthogonal Cutting with Shaped CBN and Diamond Grains, Ann. CIRP, 40, 1 (1991) 327.
- 4) 大淵慶史, 松尾哲夫, 岡村達生: 超砥粒による単粒二次元切削(第1報), 精密工学会誌, 59, 7 (1993) 1175.
- 5) 喜田義宏, 井戸守, 泰茂城: 被削材除去過程における切りくずの観察, 精密機械, 42, 2 (1976) 135.
- 6) 喜田義宏, 井戸守, 泰茂城: 切りくずの生成機構, 精密機械, 43, 8 (1977) 944.
- 7) 喜田義宏, 井戸守, 辻秀: 切りくず生成機構に及ぼす切削速度の影響, 精密機械, 45, 5 (1979) 607.
- 8) 白井英治, 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.
- 9) T.Matsuo, S.Toyoura, E.Oshima and Y.Ohuchi: Effect of Grain Shape on Cutting Force on Superabrasive Single-Grit Tests, Ann. CIRP, 38, 1 (1989) 323.
- 10) 帯川利之, 白井英治: 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, 精密工学会誌, 58, 6 (1992) 1072.
- 11) T.D.Marusich and M.Ortiz: Modelling and Simulation of High-Speed Machining, Int. J. Numerical Methods in Eng., 38 (1995) 3675.
- 12) 大淵慶史ほか: 砥粒切削過程の有限要素法シミュレーション, 1994年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集(1994) 85.
- 13) 白樫高洋, 白井英治: 工具すくい面の摩擦特性, 精密機械, 39, 9 (1973) 966.
- 14) 松尾哲夫ほか: 超砥粒の摩擦特性, 潤滑, 31, 10 (1986) 691.
- 15) 白樫高洋, 吉野雅彦, 帯川利之, 堀江琢: 研削加工層の残留応力に及ぼす流動応力特性の影響, 日本機工学会論文集(C編), 60, 577 (1994) 2946.
- 16) 上田昇, 松尾哲夫: 鋸歯型切りくずの生成機構に関する研究(第1報), 精密機械, 44, 9 (1978) 1085.
- 17) 上田昇, 松尾哲夫, 安部知一郎: 鋸歯型切りくずの生成機構に関する研究(第2報), 精密機械, 45, 5 (1979) 585.
- 18) R.F.Recht: Catastrophic Thermoplastic Shear, J. Appl. Mech., Trans. ASME, 31 (1964) 189.