



高速研削における砥粒切削状態の解析的予測*

大 淵 慶 史** 帯 川 利 之***

Analytical Prediction of Cutting Processes with Grains in High Speed Grinding

Yoshifumi OHBUCHI and Toshiyuki OBIKAWA

Statistical distribution of the effective rake angle of abrasive grains is obtained by applying kinematically admissible velocity fields to a huge number of three-dimensional micro-cutting processes with abrasive grains which randomly differ in the normal rake angle, inclination angle and cutting edge angles. Based on this distribution, which has a peak around the effective rake angle of -5 degree, thermo-elastic-plastic FEM analyses of orthogonal cutting processes are conducted for rake angle -60 to 30 degrees. Other cutting conditions are also widely changed to investigate the influence of cutting speed, rake angle, undeformed chip thickness and tool material on grinding characteristics. Simulated results show a critical undeformed chip thickness under which chip forms with great difficulty. The critical value decreases as cutting speed or rake angle increases. This may result in better grinding performances and ground surface integrity in high or ultra-high speed grinding.

Key words : FEM analysis, high speed grinding, chip formation map

1. 結 言

研削は砥粒切れ刃による微小切削の集合であり、より良い研削状態を実現するためには、個々の砥粒による切削現象を解明することが重要である。しかし砥粒切れ刃は平均的に大きな負の垂直すくい角を持ち、常用切削条件では切りくず生成が困難であるため、切削機構や切削理論をそのままでは研削の切りくず生成過程に適用できないとされている。そこで大きな負のすくい角での高速切削実験により研削機構を解明する試みが少なからず行われ^{1)~5)}、切削抵抗の測定、摩擦角やせん断角の算出、仕上げ面や切りくずの観察などにより、通常の切削との違いが調べられてきた。しかしこれらの研究は特定の条件下における両者の違いを示しただけであり、その結果より常用研削から例えば超高速研削に及ぶ研削の全体像を構成し、把握するのは容易でない。

一方、金属材料の研削手法として昨今、高速あるいは超高速研削が注目されている^{6)~10)}。実験的にはその有用性を支持する結果が多く報告されるようになり、実用化も進められている^{7)~10)}、その理論的背景はいまだ明確ではない。そのため砥粒による金属除去現象の精度良い予測が望まれており、それを可能にするため、既報では、大きな負のすくい角による切りくず生成シミュレーションを実現し、砥粒加工に詳細な解析技術を適用するための端緒を開いた¹¹⁾。

本論文では、開発したシミュレーション技術を用いて常用研削から超高速研削に及ぶ研削の全体像を構成するため、まず、ランダムな形状の砥粒による微小切削を想定し、エネルギー的に実現可能な3次元可容速度場から有効すくい角の分布を統計的に求める。続いて、大きな負の有効すくい角における切りくず生成状態を、常用切削速度領域から超高速研削領域まで広範な条件で解析的に求めることにより、研削特性に与える切削速度、切取り厚さの影響を明らかにする。またすくい角や工具材

種の影響も調べることにより、砥粒による切りくず除去過程の全体像を確立するとともに、予測的解析手法の有用性を示す。

2. 研削シミュレーション

研削においては、形状の異なる多数の砥粒によって3次元の微小切削が行われ、その機構は極めて複雑である。そのため砥粒形状を単純化することにより研削機構の解明が進められてきた。砥粒の平均的な形状は頂角 $120\sim 150^\circ$ の円すいで近似されることから、 $-60\sim -75^\circ$ 程度のすくい角をもつ二次元切削に砥粒切削過程を置き換える場合が多く、その結果、砥粒切削過程は通常の切削と切りくずの生成条件が非常に異なるとみなされている。しかし一般に切れ刃の傾斜角を考慮すると、垂直すくい角が負であっても有効すくい角が正になる条件は少なくない。例えばドリルのチゼル付近の切れ刃は大きな負の垂直すくい角を持つが、切りくず流出方向を考えると有効すくい角は正となるといわれている。そこで以下では砥粒形状を、一つの画一的な円すいではなく、法線の方向がランダムに分布する三角形で囲まれた多面体で近似し、砥粒切削過程における動的可容速度場から切りくず流出方向をエネルギー的に定め、各三角形すくい面の有効すくい角の分布を求める。次に確率密度の高い一定の範囲のすくい角に対して既報の二次元切削有限要素シミュレーションを適用し、砥粒による切りくず生成の詳細な検討を行う。

2.1 エネルギー法

上述の多面体において、1枚あるいは2枚の三角形すくい面により3次元切削が行われると仮定し、すくい面が2枚の場合には、切りくずが砥粒の両側に流れ、各すくい面で切りくずが独立に生成されるものとする。このとき実現可能な動的可容速度場として、臼井らが提案した、以下の4つのモデルを採用し(ただしモデルIIIはエネルギー的に実現しないので省略する)³⁾、二次元切削データを併用したエネルギー解法により、エネルギーが最小となるモデルとその切りくず流出方向ならびに有効すくい角を求めた。

- ・ モデルI: 完全な切りくずが生ずる場合

* 原稿受付 平成12年9月18日

** 正会員 熊本大学工学部(熊本市黒髪2-39-1)

*** 正会員 東京工業大学理工学研究所(東京都目黒区大岡山2-12-1)

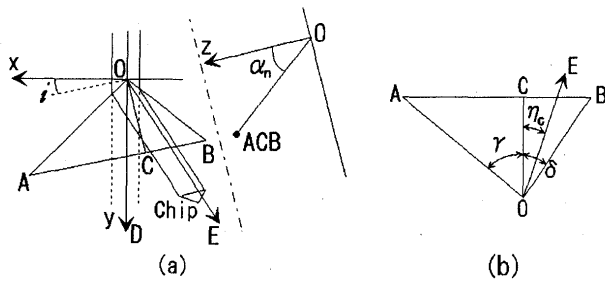


Fig.1 Definition of angles in cutting with abrasive grain

- ・モデルII：不完全切りくずが生ずる場合
- ・モデルIV：半生成切りくず壁が生ずる場合
- ・モデルV：盛上がり壁が生ずる場合

三角形すくい面に関する角度を図1に示す。通常の切削工具の定義とは異なるが、臼井らにならって垂直すくい角 α_n 、有効すくい角 α_e 、傾斜角 i 、切りくず流出角 η_c 、ならびに切れ刃角 γ, δ を定義する³⁾。すくい面を三角形AOB、砥粒頂点Oを含み加工面に平行な面をx-y平面とし、切削方向にy軸をとる(図1(a))。ここで、すくい面とz軸がなす角度が垂直すくい角 α_n (図では負角)であり、すくい面のz軸回りの回転角が傾斜角 i 、切りくず流出方向を含む面DOE内での $\angle DOE - \pi/2$ が有効すくい角 α_e となる。また、すくい面法線方向から見た図1(b)において、 $\angle AOC$ と $\angle BOC$ が切れ刃角 γ, δ 、 $\angle COE$ が流出角 η_c である。

砥石作業面における実際的な砥粒形状分布については、解析に利用できる定量的な結果がないので、ここでは、ランダムな方位に固定されたランダムな形状の砥粒を想定し、垂直すくい角 α_n は $-5 \sim -85^\circ$ 、傾斜角 i は $0 \sim 89^\circ$ 、二つの切れ刃角 γ, δ は $5 \sim 85^\circ$ の範囲で一様分布すると仮定した。約1000万通りの角度の組合せに対して計算を行い、このうち $\gamma + \delta < 60^\circ$ となる非現実的な形状のデータは除外した。なお、計算には臼井らの二次元切削による実験データ(せん断角、摩擦角およびせん断せん断応力とすくい角との関係)を用いたが、臼井らの示した摩擦角 β とせん断角 ϕ_e の実験式を大きな負のすくい角に拡張すると幾何学的に非現実的な解を生じるため、次式のよう修正し、使用した。ただし角度はラジアン表示である。

$$\begin{cases} \beta = 0.398 + 0.642\alpha_e + 0.610 \exp(-\alpha_e - 1.571) \\ \phi_e = 0.330 + 0.210\alpha_e + 0.175 \exp(2.50\alpha_e - 3.927) \end{cases}$$

2.2 有限要素法

大きな負のすくい角による切削の有限要素シミュレーションについては既報で詳述した¹¹⁾。ここではシミュレーション結果を理解する上で必要な事項について概略を述べる。図2は砥粒による切削の初期状態であり、4節点のアイソパラメトリック要素で被削材ABCDEFと工具FGHIが構成されている。この状態から被削材の左端と下端を固定して剛体の工具を水平方向に移動させ、平面ひずみ状態で2次元切削を行う。また温度解析については被削材と工具の支配方程式を連立させ、切りくず生成に伴う変形解析と練成させて非定常解析を行う。

実験によれば、大きな負のすくい角による切削では刃先に滞留層が発生し、切りくずはその滞留層の上(以下、滞留層すくい面とする)を流れる。そこですくい角 -30° 以下のシミュレーションでは、図示のように最初からすくい面に滞留層を設定して工具の一部とし、実験観察の結果に基づいてその形状を定めた。滞留層すくい面での摩擦特性およびその特性定数も既報と同じである。温度解析では塑性仕事と摩擦仕事が熱源であ

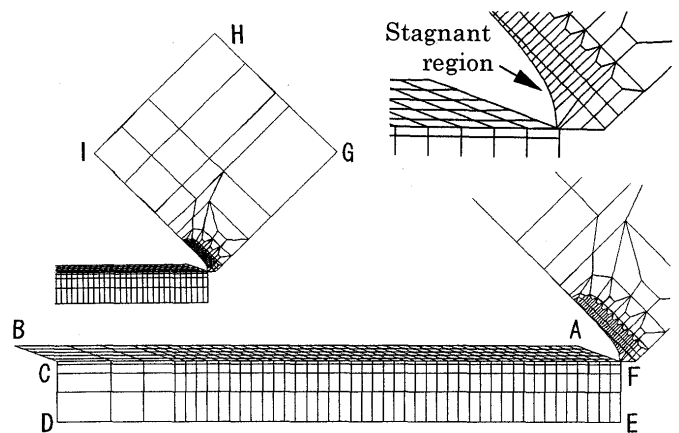


Fig.2 FEM mesh for cutting with large negative rake angle

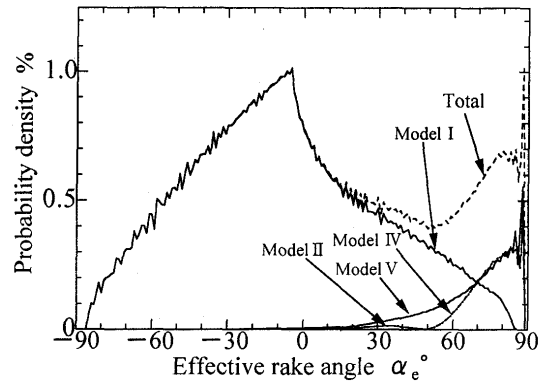


Fig.3 Probability density of effective rake angle

り、100%の機械的仕事が熱に変換されるものと仮定した。

工具材料としては、一般砥粒としてWA、超砥粒としてcBNとダイヤモンドを想定している。また被削材としては既報と同じ高炭素鋼SK-5を使用し、その構成方程式にはひずみ、ひずみ速度、温度依存性を考慮した白樫らの式を用いている¹²⁾。

3. 砥粒切削過程における有効すくい角の統計分布

ランダムな砥粒形状に対してエネルギー法より得られる有効すくい角の分布を図3に示す。垂直すくい角としては負の値しか与えていないにもかかわらず、有効すくい角は -85° から 85° まで広範囲に分布する。仮定した垂直すくい角の上限である -5° 付近でピークを示し、有効すくい角の約半分が正の範囲に分布する。完全な切りくずが生じるモデルIは全体の8割強を占め、特に有効すくい角が 30° 以下ではほとんどがこのモデルである。有効すくい角が 30° 以上になると、モデルIVの半生成切りくず壁とモデルVの盛上がり壁が増え、有効すくい角が 65° 以上で支配的となる。それらの一部は後続の砥粒によって除去されずに仕上面に残留し、表面粗さを悪化させる原因となると考えられる。

常用の切削速度では -20° 付近に良好な切りくずが生成するためのすくい角の下限が存在する。それよりすくい角が負となる場合を「大きな負のすくい角」と定義すると、大きな負の有効すくい角の出現確率は1/3程度となる。さらに -60° より負の有効すくい角が出現する確率は5%程度に過ぎない。それ故、砥粒形状を頂角 $120 \sim 150^\circ$ の円すいで近似し、それによる切削過程を $-60 \sim -75^\circ$ のすくい角による二次元切削で置き換えたとしても、そのような状態は非常に低い確率でしか起こらない。すなわち研削は大きな負のすくい角による切削の集積であるという概念は必ずしも正しくないことが分かる。

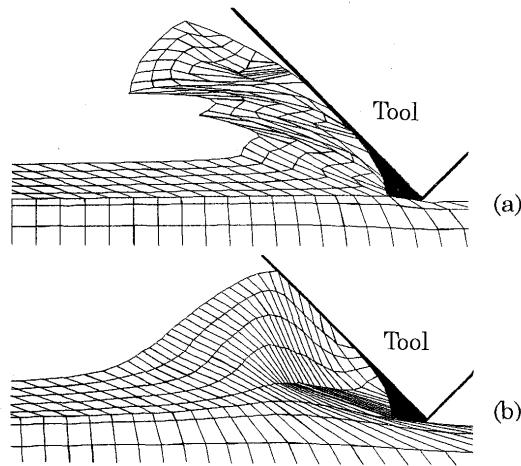


Fig.4 Typical deformation when cutting with large negative rake angle. Cutting conditions: work, carbon steel SK-5; tool, WA (rake angle, -45°); cutting speed, 30m/s; undeformed chip thickness, (a)100 μm , (b)1 μm

以上の結果と考察に基づいて、次節では、有限要素法による詳細な砥粒切削過程のシミュレーションを、すくい角が -60° から $+30^\circ$ の範囲で行う。特に大きな負のすくい角の場合に、切削速度と切取り厚さが切削現象に及ぼす影響に注目し、砥粒切削過程の全体像をとらえることにする。

4. 切削速度と臨界切取り厚さの関係

4.1 切りくず生成マップ

エネルギー解法の結果より、すくい角が図3の分布を有する二次元切削の集積として研削現象をとらえられることが分かった。同図より、過半数の砥粒切れ刃では有効すくい角が -20° 以上であり、比較的良好な切りくずが生成する。したがって、それに伴う諸現象の予測は、従来通りの解析手法を適用することにより可能であると考えられる。

一方、 -20° 以下の大きな負の有効すくい角による切削については十分に解析が行われておらず、いまだ不明な点が多い。しかし有効すくい角が大きな負の値となる領域においてはモデルIVの半生成切りくず壁やモデルVの盛上がり壁の生成などが無く、モデルIの完全な切りくずのみが生じるため、既報で提案した二次元切削シミュレーションを適用することが可能である。

図4に、二つの典型的な有限要素シミュレーションの結果を示す。(a)においては、良好に切りくずが生成されている。大きな負のすくい角の場合、せん断面で加工硬化と加工軟化が周期的に繰り返すため、この歯状を呈する。エネルギー解法では流れ形の切りくずを仮定したが、この歯状切りくずは、流れ形切りくずに比べて非常に薄く、高切削速度ではエネルギー的に実現しやすい。

(b)の条件においては材料がすくい面前方に盛り上がるだけで上方への切りくずの流出が起こらない。切削速度が低い場合、あるいは切取り厚さが小さい場合に、このようなすくい面前方への盛上がりが生ずる。これはモデルIVやVに分類される側方への盛上がり壁とは全く異なる。実際には(b)の状態から破断を伴う切りくずに転化する場合、あるいは極度に大きなサイドフローが生ずるだけで切りくずが生成されない場合などが考えられる。しかし図2の二次元メッシュではそこまで解析を進めることができないので、本論文では切りくず生成が困難となる(b)の状態を総称して切りくず生成不良域と呼ぶこと

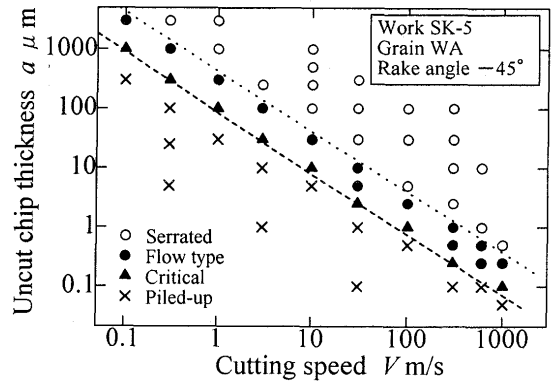


Fig.5 Chip formation map. Cutting conditions: work, carbon steel SK-5; tool, WA (rake angle, -45°)

にする。切りくず生成不良域で加工が行われた場合、材料除去効率の低下や変形状態の不安定化による面粗さの悪化や振動の発生などが工作物の表面性状を悪化させると推測される。

図5は工具すくい角 -45° のWA砥粒を使用し、切削速度0.1~1000m/s、切取り厚さ0.01~2500 μm の広い範囲でシミュレーションを行ったときの、切りくず生成の良否を示すもの(以下、切りくず生成マップと呼ぶ)である。○はこの歯状切りくず、●は流れ形あるいはリボン状切りくず、×と▲は切取り厚さの10倍以上の切削距離において、それぞれ切りくず流れが認められず盛上がりと判定された場合と、盛上がりに近いが切りくずが流れている場合を表す。この結果より図5の領域を、この歯状の薄い切りくずが生成される領域、切りくず生成不良域、およびその中間領域に分類した。

図より明らかなように、良好な切りくずを生成する限界の切取り厚さが存在し、切削速度の増加に伴って限界切取り厚さは減少する。すなわち低切削速度から常用の切削速度へ、さらに常用の研削速度から高速・超高速研削速度領域に移行するにしたがって、より小さな切取り厚さで良好に切りくずが排出されるようになる。1000 m/sの超高速研削では、塑性波の伝播速度を切削速度が上回っていると思われるが、参考のために結果を示してある。以下では良好な切りくず生成領域と切りくず生成不良域との境界の切取り厚さを臨界切取り厚さと称することにする。

臨界切取り厚さは低速切削領域から超高速研削領域にわたって、両対数上でほぼ直線的な変化を示している。その傾きは約 -1 であるため、切削速度と臨界切取り厚さの関係は反比例で近似できる。しかし流動応力のひずみ速度依存性などの材料特性が異なる場合には、その影響で傾きが変化すると考えられる。また既報¹¹⁾でも述べたように臨界切取り厚さから数倍の切取り厚さの範囲で流れ形やリボン状切りくずが発生する領域が存在し、それを超えるとの歯状切りくずが生成される。この移行領域は臨界切取り厚さとほぼ比例関係にあり、図中では臨界切取り厚さの境界線とおおむね平行な直線となっている。

4.2 切りくず生成に及ぼす工具すくい角の影響

前節では -45° のすくい角を対象にしたが、本節ではすくい角を変えた場合を検討する。最初に、すくい角が -60° と -30° の結果を示す。図6(a)に示すように、すくい角が -60° の場合でも良好な切りくずが生成される。また解析結果は、同図(b)の実験結果と類似の形状を有することが分かる。臨界切取り厚さは、すくい角 -60° と -45° との間に明確な差が現れなかった。本シミュレーションでは切取り厚さを2~3倍程度の間隔で変化させているため、その差はそれより小さいものと

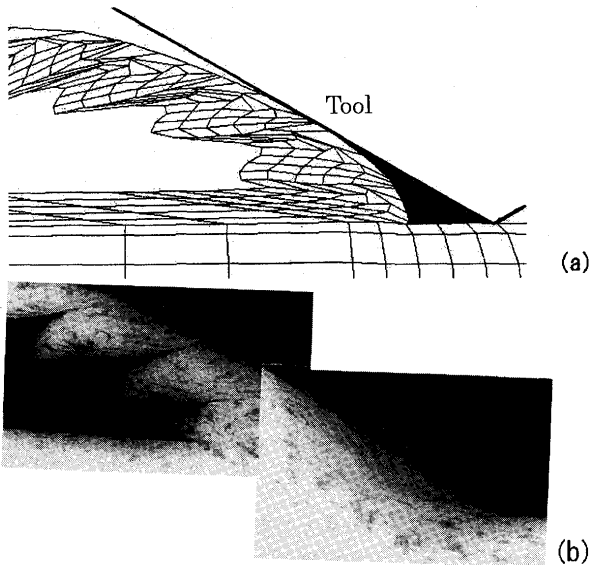


Fig.6 Chip formation simulated and photomicrograph of partially formed chip with -60° rake. Cutting conditions: work, carbon steel ((a) SK-5, (b) S45C); tool, diamond; cutting speed, 20m/s; undeformed chip thickness $75\mu\text{m}$

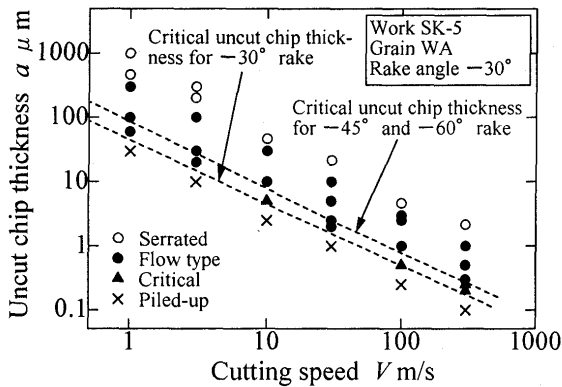


Fig.7 Chip formation map for -30° rake. Other cutting conditions are the same as in Fig.5.

考えられる。ただし、すくい角 -60° の場合は切りくずが流出を始めるまでに -45° の場合と比較して長い切削距離が必要であった。そのため、切りくず生成の良否の判定距離は切り厚さの20倍としている。

すくい角が -30° の場合の切りくず生成マップを図7に示す。 -45° の場合と比較して臨界切り厚さが減少する。すくい角の増加により切りくずの流れが容易になったと考えられる。一方、切り厚さの増大に伴う流れ形からのこ歯状への切りくず形態の変化において、2つの切りくず生成領域の境界は、 -45° の場合よりわずかに上方に移行する。その結果、図7における中間領域は、 -45° の場合と比較して上下に拡大する。

次に、すくい角が 0° 前後の場合を検討する。図8に、切りくず生成に及ぼす切削速度の影響を示す。ただしすくい角は -15° , 0° , および 15° であり、切り厚さは $1\mu\text{m}$ である。正の 15° のすくい角では、 30m/s と 300m/s の切削速度において、類似の流れ形切りくずになる。しかし 0° および -15° のすくい角では切りくず生成状態が速度により大幅に異なる。切削速度 300m/s では、大きな負のすくい角におけるのこ歯状切りくずと同様にせん断面で加工軟化が生じるため、薄い切りくずが生成する。しかし 30m/s ではすくい面との接触長さの増大とともに切りくず厚さは増加を続け、切り厚さの約30倍の

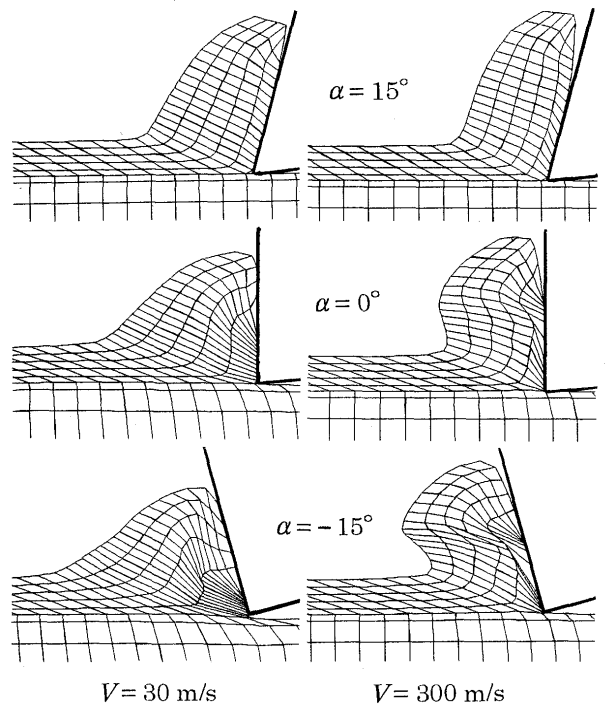


Fig.8 Chip formation with -15 to 15° rake. Cutting speed, 30m/s (left) and 300m/s (right); other cutting conditions are the same as in Fig.4(b).

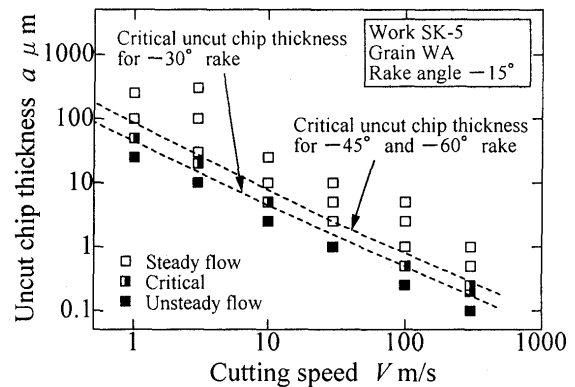


Fig.9 Chip formation map for -15° rake. Other cutting conditions are the same as in Fig.5.

切削距離において切りくずは流れるものの定常状態にならずに解析が終了した。

図9にすくい角が -15° の場合のマップを示す。 -15° 以上のすくい角では仮定したすべての切削条件で切りくずは生成されるため、定常的切りくずが実現する場合を□で、切り厚さの約30倍の切削距離において定常的な状態に到達しない場合を■で、両者の中間的な場合を■で表す。切り厚さの小さな領域においては、大きな負のすくい角における切りくず生成不良域と同様に切削温度の上昇が十分でないため、薄い連続した切りくずは生成されにくい。同様の結果はすくい角が 0° の場合にも見られる。

図5から9までの結果によれば、砥粒切込み深さが微小な研削において、良好な加工状態を実現するためには、より速い研削速度を選ぶ必要がある。高研削速度は負のすくい角での切りくずせん断面において局所的な温度上昇をもたらし、それにより周期的に加工軟化が繰り返され、薄い切りくずが生成される。

4.3 工具材質の影響

工具材質が切りくず生成状態に及ぼす影響を調べるため、cBNおよびダイヤモンドを工具とした場合を解析し、WAの場

Table 1 Material properties (280 - 1100K)

Density kg/m ³	WA	3920 - 0.100T (T ≤ 500K)	
		3903 - 0.0667T (500K ≤ T < 800K)	
		3946 - 0.120T (T ≥ 800K)	
Specific heat J/(kg·K)	cBN	3480	
		diamond	3515
Thermal conductivity W/(m·K)	WA	387.5 + 1.31T (T ≤ 500K)	
		805.0 + 0.470T (500K ≤ T < 800K)	
		1037 + 0.180T (T ≥ 800K)	
Frictional characteristic constant	cBN	1.689T	
		diamond	2.667T (T ≤ 420K)
			687.4 + 1.03T (T ≥ 420K)
Frictional characteristic constant	WA	59.70 - 0.0790T (T ≤ 500K)	
		36.53 - 0.0327T (500K ≤ T < 800K)	
		17.23 - 0.00854T (T ≥ 800K)	
Frictional characteristic constant	cBN	600	
		diamond	2000
		Frictional characteristic constant	WA
cBN	0.4		
diamond	0.08		

合と比較した。解析では工具を剛体と仮定しているため、工具材質の変更に伴って熱物性値と摩擦特性のみが変化する。表1に3種類の工具の物性値を示す。熱物性値は温度依存性が大きいので、温度の関数として表した。

最初に切りくずと工具の最高温度に及ぼす工具材質の影響を検討する。図10に、すくい角に対する温度変化を示す。切削条件は、超高速研削に対応させて、切削速度300m/s、切取り厚さ1 μ mとし、15°間隔にすくい角を設定した。実験データに従い-20°より大きな負のすくい角の解析では、上述のように滞留層が発生するものと仮定した。なお、工具がWAの場合には、滞留層の有無にかかわらず、工具一切りくず接触面上部が最高温度となり、両者の最高温度は一致するため、工具最高温度のプロットを省略した。

切りくずの最高温度はすくい角に対して常識的な変化を示し、すくい角が小さくなるに従い、いずれの工具でも上昇した。切りくず温度に及ぼす工具の熱伝導率の影響は、すくい角が正の領域で明確に現れ、熱伝導率が大きいほど切りくずの最高温度は低下する。しかし-30°以下のすくい角では、すくい面上に生成した滞留層により、工具と切りくずが隔てられ、しかも滞留層と切りくずの間の摩擦仕事はいずれの工具においてもほぼ同じであるため、工具の熱伝導率の影響は低減し、工具材質の違いによる切りくず温度の差は小さくなる。

一方、工具の最高温度には、工具材質の違いによる影響が非常に大きく現れ、すべてのすくい角で大きな温度差が生じた。通常、工具と切りくずの熱伝導率がほぼ同じオーダーであれば、工具一切りくず接触面に最高温度が出現するが、工具と切りくずの熱伝導率の比が非常に大きくなると、最高温度は切りくず内に現れ、工具一切りくず接触面温度はそれより低くなるからである¹³⁾¹⁴⁾。工具すくい面に滞留層が生じると、この傾向はさらに助長され、熱伝導率の非常に大きい超砥粒では、すくい角の減少に伴って上昇してきた工具最高温度が、滞留層の生成により若干低下するとともに、-30°以下の滞留層生成域においてはほぼ一定の低い温度に維持される。この結果より、WA砥粒では、すくい角が大きな負の砥粒ほど熱損傷を受けやすいが、熱伝導率の大きな超砥粒では、すくい角が大きな負の砥粒でも熱損傷を受けにくく、超砥粒本来の刃先丸みの小さい切れ刃が維持されると考えられる。したがって超砥粒は高速研削に対して優れた性質を有していることが明らかである。

次に切りくず生成マップに及ぼす工具材質の影響を検討する。表1に示すように工具の物性値が異なるので、滞留層が生

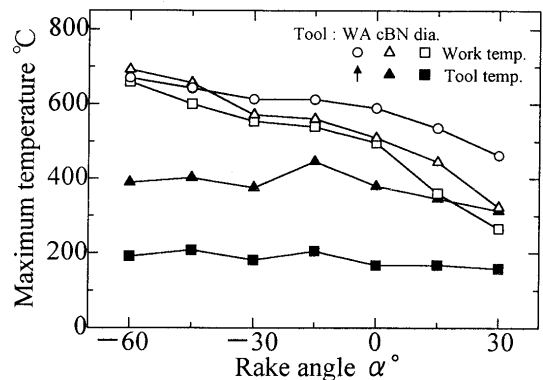


Fig.10 Maximum temperatures of work and tool. Cutting conditions: tool, WA, cBN and diamond; cutting speed, 300m/s; undeformed chip thickness, 1 μ m

成されなければ、当然の結果として、工具材質により切りくず生成が異なる。しかし、滞留層が生成される場合、例えばすくい角が-45°の場合、中間領域からのこ歯状切りくず領域への遷移域に工具材質の影響が多少見られたものの、臨界切取り厚さには全速度域にわたって影響がほとんど現れなかった。滞留層が存在する場合には、図10の切りくず最高温度と同様に、臨界切取り厚さを決定するせん断面温度に工具材質の影響が現れにくいためである。こうした理由により、超砥粒はWA砥粒による図5の結果とほとんど同じ切りくず生成マップを与える。なお、以上の解析結果では工具材質による切れ刃形状の違いを無視したが、実際には材質によって垂直すくい角の平均値と分布が異なり、これによって切りくず生成状態が影響を受けるものと思われる。

4.4 高速研削に関する考察

図3の砥粒切削過程における有効すくい角の統計分布、すくい角を変えた有限要素解析の結果、ならびにKomanduriの実験結果¹⁾を総合すると、砥粒切削過程を、次のようにすくい角を4つの領域に分け、理解することができる。すなわち、モデルIが成立する砥粒切削状態において、有効すくい角が5~10°を超える約30%強の切れ刃は、切削速度と切取り厚さのすべての組合せにおいて常に良好な切りくずを生成する。有効すくい角が5~10°より小さいが-25~-20°ほど大きな負でない切れ刃は約30%あり、この場合にも切削速度と切取り厚さのすべての組合せにおいて切りくずは流出する。しかし切削速度と切取り厚さが共に小さい場合、切りくず生成状態は必ずしも良好ではない。有効すくい角が-20~-25°よりさらに大きな負ではあるが-75°ほどでなければ臨界切取り厚さが存在し、この切取り厚さを下回れば切りくず生成不良域に移行する。こうした切れ刃は40%近くを占める。臨界切取り厚さは切削速度の増加に伴って減少するので、切削速度が高速になれば、良好な切りくずが生成する。有効すくい角が-75°より大きな負の切れ刃は1~2%存在する。しかしこれらの切れ刃による切りくず生成は極めて困難であるとされている¹⁾。

以上の状況のもとで、研削速度が30m/s程度の常用の研削条件を想定しよう。このとき平均的な砥粒切込み深さは、およそ1 μ m程度といわれており、有効すくい角が大きな負の砥粒切れ刃においては、臨界切取り厚さより砥粒切込み深さが小となるので、少なからぬ砥粒において、切りくず生成状態は必ずしも良好でないことが分る。臨界切取り厚さは研削速度の増加にともなって減少するから、高速化によって砥粒切削状態は改善される。その効果は有効すくい角がおおよそ5°以下の砥粒切

削過程において現れ、特に有効すくい角 $20^{\circ}\sim 70^{\circ}$ の範囲で顕著になる。

一般に研削速度が変えられない場合、仕上げ面粗さの向上のためには、砥石切込み深さや工作物速度の低減、あるいは細粒砥石の使用により平均砥粒切込み深さを減少させる。しかしこれらの研削条件のみを変えた場合、大きな負の有効すくい角の砥粒では砥粒切込み深さが臨界切り厚さを下回り、切りくず生成不良域に移行する。したがってこの方法では切れ刃形状の転写性が悪化し、表面性状の向上に限界が現れるものと考えられる。一方、研削速度を増加させ、平均砥粒切込み深さを一定に保つように条件を変更した場合、上述のように切りくず生成状態が良好になり、切れ刃形状の転写性が改善されて仕上げ面粗さは向上する。しかし仕上げ面粗さをさらに向上させるためには、砥粒切込み深さを小さく設定し、工作物の除去単位を減少させる必要がある。臨界切り厚さは切削速度にほぼ反比例して減少するので、平均砥粒切込み深さの減少率が研削速度の増加率を下回るように条件を設定すれば、高速研削による加工能率と仕上げ面粗さの向上を同時に実現することができる。

ここで、「砥粒切込み深さが減少すると、研削に関与する砥粒刃先の平均的な垂直すくい角は低下し、大きな負の有効すくい角による切削が増加する」という、より現実的なモデルを考慮することにしよう。切削速度の増加に対応して切り厚さが減少する場合、このモデルでは大きな負の有効すくい角での切削状態が増える。そのため、同じ程度に良好な切りくず生成状態を維持するには、図7などに示される同一すくい角での臨界切り厚さの減少よりも緩やかに切り厚さを変化させる必要がある。すなわち、平均的なすくい角の変化の影響により、実質的な臨界切り厚さは研削速度の -1 乗よりは緩やかに変化する。したがって、研削速度だけを単独に増加させ、加工能率は一定となるように砥粒切込み深さを研削速度に反比例して減少させる場合には、砥粒切込み深さが実質的な臨界切り厚さより小さくなり過ぎ、和久田ら¹⁵⁾による細粒cBNホイールを用いた高速研削のように仕上げ面粗さが向上しないことも十分に想定できる。

高速研削においては、目詰まりや砥石摩耗が研削速度の増加に対して単調に変化しない例が多くみられる。これらの例は臨界切り厚さの存在およびその速度依存性と密接に関係するものと思われる。すなわち個々の砥粒の切込み深さや有効すくい角は一樣ではなく分布を持つので、常用の研削速度では臨界切り厚さ以下の切削が少なからず存在する。この状態から平均砥粒切込み深さを一定のまま研削速度を増加させると、臨界切り厚さが低下するので、砥粒切込み深さが臨界値より大きく、良好に切りくずを生成する砥粒の割合は増加する。ここで砥粒切込み深さが図3の有効すくい角と同様にほぼ正規分布に従うものとするれば、ある速度域で良好に切りくずを生成する砥粒の割合が急速に増加し、切りくず生成状態は急激に改善される。その結果、研削速度は増加しても目詰まりが生じにくくなる、あるいは砥粒への機械的・熱的負荷が軽減されることにより摩耗が低減する状態が実現する可能性は十分にある。また最適な研削状態が出現する速度域は、研削速度の増加に対して平均砥粒切込み深さをどのような割合で低減させるかにかかわっている。しかし研削速度を最適値以上に増加させても、良好な切りくずを生成する砥粒の増加割合は低下するため、砥

粒切削状態の改善よりも研削速度の増加に伴う温度上昇の弊害の方が著しくなり、研削状態は悪化し、砥石寿命は短くなると考えられる。

以上より、高速研削による加工能率と表面粗さの向上のためには、目標値を実現するために必要な砥粒切込み深さが臨界切り厚さを下回らない砥石周速度を選択し、これに対して粒度、工作物速度などのパラメータを慎重に調整する必要がある。これにより、更なる高速化に対応した研削加工技術が実現できるものと思われる。

5. 結 論

研削における微小切削の有効すくい角分布を統計的に求め、通常の金属切削領域から超高速研削領域まで広範囲な条件で切りくず生成状態をシミュレートすることにより以下のことが明らかになった。

- (1) 負の垂直すくい角を持つ砥粒切れ刃の3次元切削において、有効すくい角が大きな負となる割合は、通常の切削領域のすくい角となる割合より少ない。
- (2) 大きな負のすくい角での切削においては、与えられた切削速度に対して切りくず生成の可能な臨界切り厚さが存在し、切削速度の増加とともに減少する。
- (3) 臨界切り厚さは工具すくい角の影響を受け、すくい角が負が大きくなるに従いわずかに増大する。
- (4) 臨界切り厚さの存在により、良好な研削状態が、高速研削で実現する可能性がある。

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) 喜田義宏, 井戸 守, 川崎直通: 大きな負のすくい角による切削機構, *精密機械*, **44**, 9 (1978) 1099.
- 3) 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.
- 4) Y. Ohbuchi and T. Matsuo: Force and Chip Formation in Single-Grit Orthogonal Cutting with Shaped CBN and Diamond Grains, *Ann. CIRP*, **40**, 1 (1991) 327.
- 5) 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.
- 6) 大村悦二, 安部哲也, 江田 弘: 超高速研削加工の表面創成シミュレーション, *精密工学会誌*, **59**, 8 (1993) 1245.
- 7) E. Brinksmeier and E. Minke: High-Performance Surface Grinding - The Influence of Coolant on the Abrasive Process, *Ann. CIRP*, **42**, 1 (1993) 367.
- 8) 高橋正行, 上田修治, 黒部利次: 超高速研削砥石の開発とガラスの加工, *精密工学会誌*, **60**, 12 (1994) 1791.
- 9) 和久田 学, 宮原克敏, 大田 稔: 鉄鋼材料の超高速研削特性, *砥粒加工学会誌*, **41**, 1 (1997) 26.
- 10) 庄司克雄, 渡辺良平, 厨川常元: 軟鋼研削時の砥石異常摩耗の減少効果について, *砥粒加工学会誌*, **42**, 10 (1998) 436.
- 11) 大淵慶史, 帯川利之: 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 -, *精密工学会誌*, **66**, 9 (2000) 1467.
- 12) 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, *日本機械学会論文集 (C編)*, **60**, 577 (1994) 2946.
- 13) 帯川利之, 安味貞正, 白樫高洋, 白井英治: 高分子材料の切削過程の有限要素法解析 (その1), *精密工学会誌*, **53**, 2 (1987) 288.
- 14) 帯川利之, 白井英治: Ti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.
- 15) 和久田 学, 大田 稔, E. Brinksmeier, E. Minke: 細粒CBNホイールによる高速研削, 1999年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, (1999) 318.