

砥粒切削シミュレーションによる被研削性の解析的検討*

大 淵 慶 史*¹, 帯 川 利 之*²

Evaluation of Grindability of Materials Based on Abrasive Cutting Simulation

Yoshifumi OHBUCHI*³ and Toshiyuki OBIKAWA^{*3} Department of Mechanical Engineering and Materials Science, Kumamoto University,
2-39-1 Kurokami, Kumamoto-shi, Kumamoto, 860-8555 Japan

The grindability of materials is investigated based on thermo-elastic-plastic finite element simulations of orthogonal cutting with negative rake abrasive-grits. First the cutting mechanism of steel SK-5 with negative rake is clarified. In high speed grinding, adiabatic shear, which lead to serrated chip formation, is observed. Then the influence of material properties of SK-5 and cutting conditions on the cutting states are analyzed. Analysis shows a critical uncut chip thickness, under which chip forms with great difficulty. The critical uncut chip thickness changes complicatedly when material properties including the strain hardening exponent, yield stress, thermal conductivity, and initial temperature, are changed. Finally, grinding performance or grindability is evaluated by means of the critical uncut chip thickness and chip geometry.

Key Words: Grinding, FEM, Grindability, Material Properties, Chip Formation

1. 緒 言

被研削性は被削材の削り易さを表す一つの指標であり、一般に、砥石の損耗や目つぶれなどの砥石寿命、あるいは、仕上げ面粗さや研削焼け、研削割れなどの仕上面性状によって評価される⁽¹⁾。しかし砥石寿命や仕上面性状は、被削材の物性値や研削条件により大きくしかも複雑に変化するため、被研削性と物性値との因果関係はほとんど解明されていない。そのため、物性値から被研削性を予測し、適切な研削条件を選ぶことは非常に難しく、通常は、試行錯誤を繰り返し、研削条件を決定する。そこで、研削が砥石作用面上の個々の砥粒による切削であることを考慮し、先ずは、砥粒による切削と物性値との関係を定量的に明らかにし、この知見に基づいて、被研削性と被削材の物性値との因果関係を見通すことが重要である。

砥粒による切削での最も大きな特徴は、すくい角が負の大きな値をとることであり、その結果、砥粒切削状態は、通常の切削と比べ、非常に複雑で定量的な評価が難しいとされている。したがって砥粒による切削と物性値との関係を定量的に明らかにするためには、汎用性の高い解析手法が必要であり、本論文では、著者が砥粒切削過程の解析のために開発した有限要素

シミュレーションを用いる⁽²⁾。また、大きな負のすくい角による切削機構については、定量的な解明がほとんど行われていないので、最初に切削条件による切りくず生成状態の違いを明確にし、砥粒切削機構を明かにする。次いで、現実には単独で変更することが不可能な被削材の物性値を、解析上で変化させることにより、材料物性や加工条件が切りくず生成状態に及ぼす影響を明らかにし、これにより被研削性と材料物性との関係を考察する。

2. シミュレーションの概略

有限要素法による砥粒切削過程のモデル化については、別報で詳述したので⁽²⁾、ここでは概略を述べる。図1は砥粒による切削を想定した4節点アイソパラメトリック要素による切削モデルである。ABCDEFが被削材であり、FGHIが工具である。大きな負のすくい角の場合には、工具すくい面に滞留層が安定に存在するので^(3,4)、予め滞留層を工具面上に設定し、工具の一部とみなした。また同図の初期状態から被削材の左端と下端に切削速度を与えて被削材を水平方向に移動させ、平面ひずみ状態で2次元切削を行った。工具は剛体とし、被削材のみの変形を解析したが、それと同時に、切削温度の解析を行った。温度解析では、被削材の塑性仕事と工具面での摩擦仕事を熱源とし、消費エネルギーの全てが熱に変換されると仮定して、被

* 原稿受付 2001年6月18日。

^{*1} 正員, 熊本大学大学院自然科学研究科(☎860-8555 熊本市黒髪2-39-1)。^{*2} 正員, 東京工業大学理工学研究科(☎152-8552 東京都目黒区大岡山2-12-1)。

E-mail: yohbuchi@mech.kumamoto-u.ac.jp

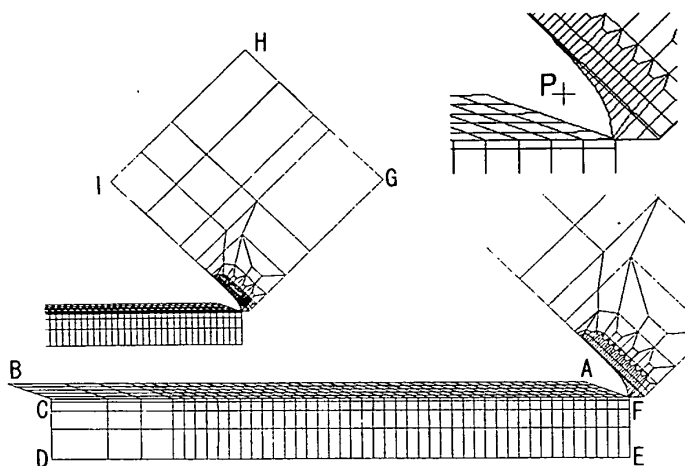


Fig. 1 Finite Element mesh for machining

削材と工具を連成させ、切りくず生成にともなう温度分布の推移を求めた。

実質的なすくい面である滞留層上を切りくずが流出する際の摩擦については、特性式⁽⁵⁾

$$\frac{\tau_t}{\tau_e} = 1 - \exp\left(-\lambda \frac{\sigma_t}{\tau_e}\right) \quad (1)$$

を適用した。ここで、 σ_t と τ_t とはそれぞれ工具すくい面の垂直応力と摩擦応力であり、 τ_e は着目点における切りくずの降伏せん断応力である。また λ は摩擦の特性定数であり、既報と同じ0.4とした。工具材料は一般砥粒WAを仮定し、研削に特有な大きな負のすくい角として -45 度を想定した。

被削材は共析鋼SK-5とし、その構成方程式として、回復を考慮した白樫らの式⁽⁶⁾を用いた。

$$\bar{\sigma} = 380 \exp(-p(\theta - \theta_c)) \left(\frac{\dot{\varepsilon}_p}{1000} \right)^a \left\{ \int dW + c \right\}^b \quad (2)$$

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

$$a = 0.00394, b = 0.145, c = 8.45$$

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

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

ただし、 ε_p は相当塑性ひずみ、 $\dot{\varepsilon}_p$ は相当塑性ひずみ速度、 θ は温度、 p と θ_c は実験から求まる材料定数であり、応力、ひずみ速度、温度の単位はそれぞれMPa、 s^{-1} 、 $^\circ\text{C}$ である。また、 W は塑性仕事から回復相当分を差引いた量であり、増分 dW を与える式の右辺第1項は消費された塑性仕事による W の増加、右辺第2項は回復による W の減少を表す。そこで、切りくず生成に及ぼす材料特性の影響を調べるには、上式を基準として降伏応力、熱伝導率、被削材温度、加工硬化およびひずみ速度硬化の特性を変更して解析を行った。

3. 砥粒切削機構

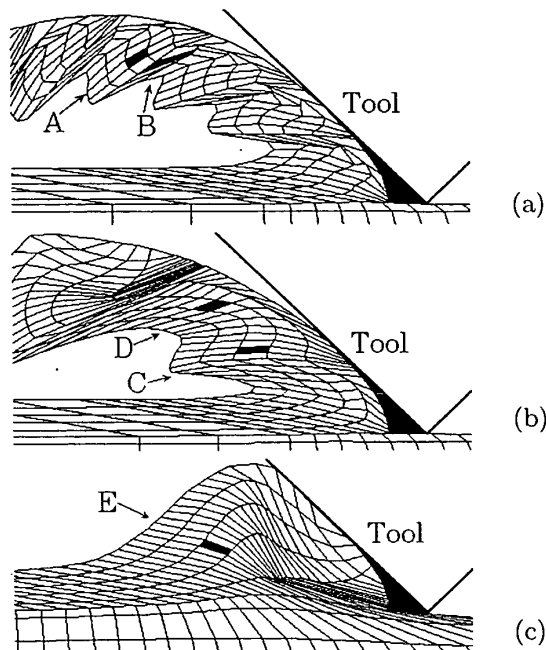


Fig. 2 Typical chip geometry when cutting with a negative large rake angle of -45 deg. Deformation of black elements A, B, C, D and E are examined in detail. Cutting conditions: work, carbon steel SK-5; tool, WA; cutting speed 30m/s; uncut chip thickness, (a)100 μm , (b)4.6 μm , (c)1 μm .

3.1 切りくず形態の変化 図2に、シミュレーションによって得られる三つの典型的な切りくず形態を示す。標準的な研削速度30m/sにおいて、切取り厚さ h を図(a),(b),(c)の順に低下させた結果である。切取り厚さが100 μm と大きい(a)では、 -45 度のすくい角による切削としては極めて薄い鋸歯状切りくずが良好に生成する。中間的な切取り厚さ $h = 4.6\mu\text{m}$ の(b)では、表面が波打つ波状切りくずとなる。一方、切取り厚さが1 μm と小さい(c)では、切りくずは滞留層上を流れず、すくい面前方に盛り上がる。砥粒による実切削では(c)の状態から破壊を伴うせん断形切りくずやむしれ形切りくずに転化する場合も考えられるが、いずれにしても切りくずは容易に生じないので、この状態を切りくず生成不良域と定義する。また良好な切りくず生成状態から切りくず生成不良域に移行する切取り厚さを臨界切取り厚さ h_c と定義すると、臨界切取り厚さは、図3の破線のように、研削速度 V にほぼ反比例して減少する⁽⁷⁾。

Loewenら⁽⁸⁾の解析によれば、せん断面モデルにおけるせん断面の平均温度は次式によって与えられる。

$$\bar{\theta}_s = \frac{1}{1 + 1.328 \sqrt{\gamma_c / P_s}} \cdot \frac{\tau_s \gamma_c}{J \rho_s c_s} + \theta_0 \quad (3)$$

ここで τ_s はせん断面せん断応力、 γ_c は切りくずのせん断ひずみ、 J は熱の仕事当量、 ρ_s と c_s はそれぞれ

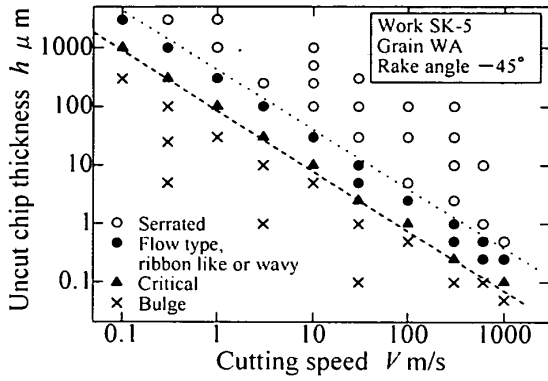


Fig. 3 Chip formation map (influence of cutting speed). Cutting conditions: work, carbon steel SK-5; tool, WA (rake angle, -45°)

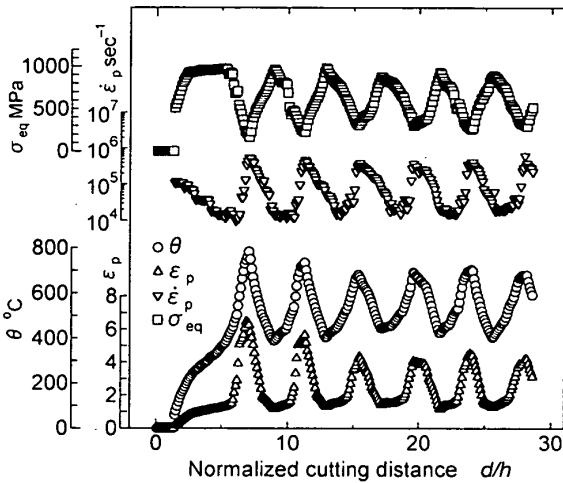


Fig. 4 Changes in temperature, strain, strain rate and stress at point P in Fig.1. Cutting conditions are the same as in Fig.2(a).

被削材の密度と比熱, θ_0 は室温であり, P_s は k_s を被削材の熱伝導率として

$$P_s = \frac{\rho_s c_s V h}{k_s} \quad (4)$$

で与えられるペクレ数である。Chao⁽⁹⁾やWeiner⁽¹⁰⁾によっても同様の解析結果が得られており, せん断面温度は, ペクレ数 P_s によって支配される。

上述のように, 臨界切り厚さでは,

$$h_c \approx \frac{Const.}{V} \quad (5)$$

が満たされ, ペクレ数がほぼ一定となるので, せん断面はほぼ同じ温度である。したがって切り厚さを小さくして, しかも良好な砥粒切削状態を維持するためには, せん断面温度が低下しないように研削速度を増大させなくてはならない。また図3の点線で示すように, 波状切りくずと鋸歯状切りくずの境界の切り厚さも切削速度に反比例して減少する傾向にあるから, 切削温度は切りくず形態に対しても大きな影響を及ぼ

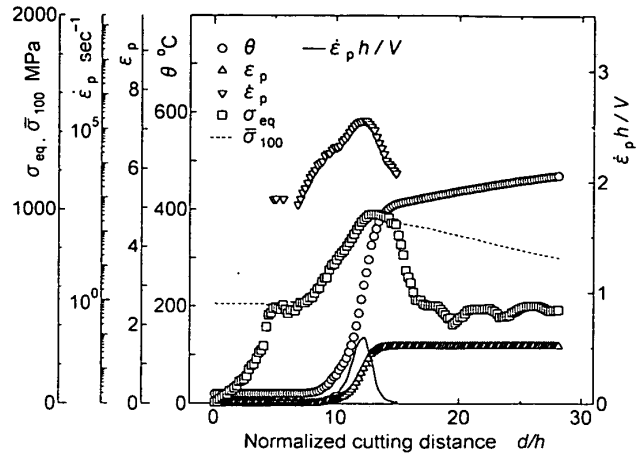


Fig. 5 Changes in temperature, strain, strain rate and stress of element A in Fig.2(a).

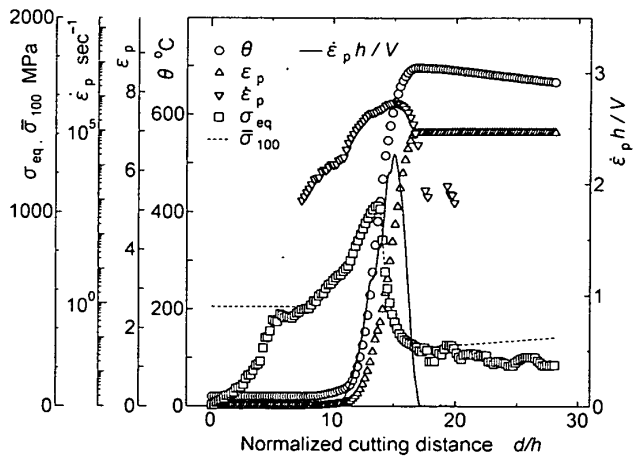


Fig. 6 Changes in temperature, strain, strain rate and stress of element B in Fig.2(a).

していることが分かる。そこで, 切削せん断域における変形挙動を詳細に調べ, 研削における切りくず生成機構を検討する。

3.2 切りくず生成機構 図2(a)の鋸歯状切りくず生成における温度, 相当塑性ひずみ, 相当塑性ひずみ速度, 相当応力 σ_{eq} の変化を図4に示す。図1の添え図に+印で示した空間固定点Pでの観測結果であり, 鋸歯状切りくず生成における各種状態量の周期的変化が明瞭に現われている。ひずみ, ひずみ速度, 温度がそれぞれ極大値をとり, 相当応力が極小値をとる切削距離は常に一致しているから, 塑性変形で消費されたエネルギーによって温度が上昇すると同時に熱軟化が生じ, 断熱的なせん断変形が発達することが分かる。

次に, 図2(a)の鋸歯状切りくずにおいて, 切りくずが厚くなる領域の要素Aと, 切りくずが急激に薄くなるひずみ集中域の要素Bに注目し, これらの要素での諸量の変化をそれぞれ図5と図6とに示す。また図2(b)の波状切りくずにおいて, 切りくずが厚くな

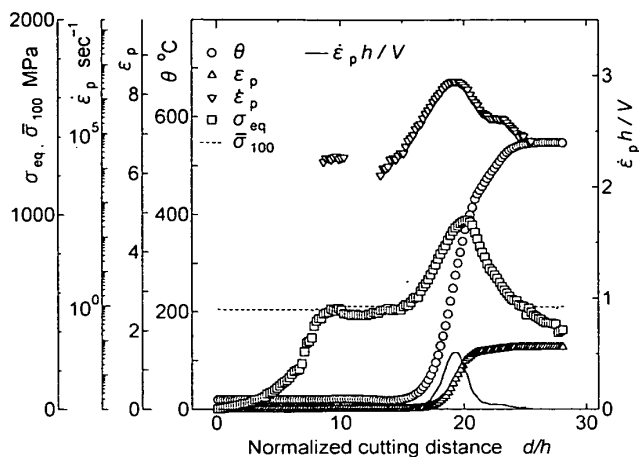


Fig. 7 Changes in temperature, strain, strain rate and stress of element C in Fig.2(b).

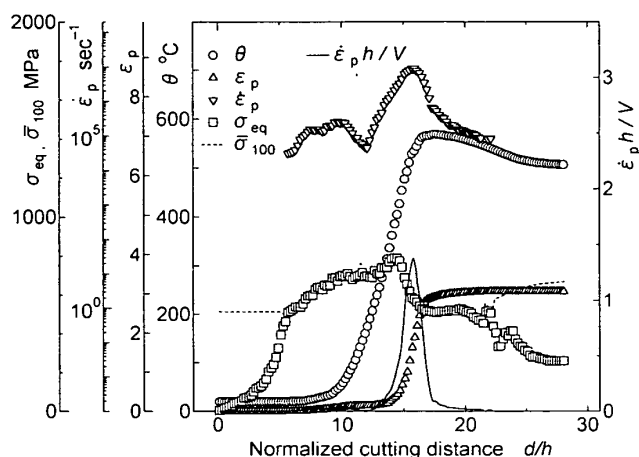


Fig. 8 Changes in temperature, strain, strain rate and stress of element D in Fig.2(b).

る領域の要素 C と切りくずが薄くなる領域の要素 D での諸量の変化をそれぞれ図 7 と図 8 に、図 2(c) の盛り上がり域の要素 E の諸量の変化を図 9 に示す。これらの図では、ひずみ速度を対数で表示しているが、ひずみ速度は切削速度 V にほぼ比例し、切り厚さ h にほぼ反比例するので、無次元化ひずみ速度 $\dot{\epsilon}_p h/V$ も図示した。無次元量を用いれば、切り厚さや切削速度が異なっても、同じオーダの値で切りくず生成状態を比較できる。また、図中の諸量は非常に複雑な変化を示すので、要素が弾性域にあるのか塑性域にあるのかが明瞭でない。そこで、要素が弾性域にある場合には、相当応力の他に、ひずみ速度を 100s^{-1} として式 (2) より求めた塑性流動応力 $\bar{\sigma}_{100}$ を点線で示し、相当応力と塑性流動応力との差を明確にした。

図 5 より、鋸歯状切りくずにおいて切りくずが厚くなる領域の要素 A では、切りくずの生成に伴って、ひずみ、ひずみ速度、相当応力、温度が共に増加するが、そのうちひずみ速度が最初にピークに達する。ひずみ

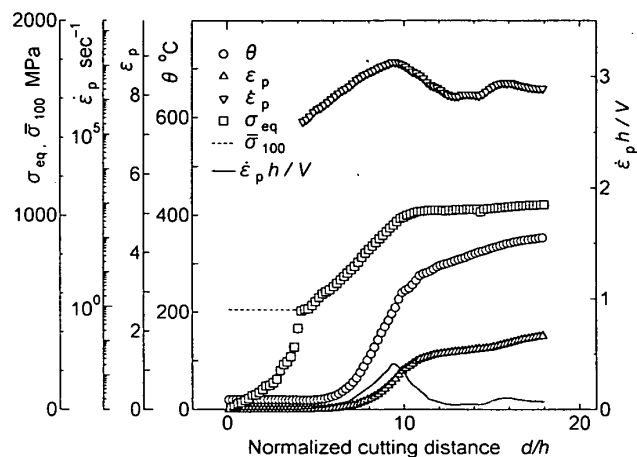


Fig. 9 Changes in temperature, strain, strain rate and stress of element E in Fig.2(c).

速度が低下し始めてもひずみは増え続けるため、応力はわずかに増大する。しかしひずみ速度が小さくなり、温度がさらに上昇すると、応力は直に減少し始める。図 7 に示す要素 C の諸量の変化も応力増大時には、要素 A のそれとよく似ている。しかし要素 C では要素 A に比べてひずみが大きいので、温度が高い。その結果、要素 A では、主として弾性的に応力が低下するのに対し、要素 C では、緩やかなひずみの増大を伴う加工軟化が生じ、塑性的に応力が低下する。

一方、図 6 と図 8 より、鋸歯状切りくずと波状切りくずにおいて切りくずが薄くなる領域の要素 B と D では、上述の要素 A, C の場合と異なり、相当応力が最初に最大値に達し、その後の加工軟化の過程でひずみ速度が最大となる。相当応力のピークに遅れてひずみ速度のピークが出現したのは、断熱的せん断変形が生じ、温度上昇による急激な加工軟化によって、一段と変形が加速されたためである。図 6 の鋸歯状切りくずの場合には、切り厚さ h が大きいので、ペクレ数 P_s が大きく、相対的に熱が拡散しにくい。また、軟化開始時点の相当応力と無次元化ひずみ速度が高いので、それだけ消費エネルギーが大きい。したがって、一旦、断熱的せん断変形が出現すると、大きな加工軟化が生じ、大幅な温度上昇とひずみの増大を引き起こすことが分る。これに対し、図 8 の波状切りくずでは、切り厚さ h が小さいので、相対的に熱が拡散しやすい。また、軟化開始時点の相当応力とひずみ速度が鋸歯状切りくずほど大きくないので、断熱的せん断変形が持続せず、加工軟化による応力の低下は小さい。

図 9 の盛り上がり域の要素 E の変形状態は、切りくずが生成される上述の場合とは大幅に異なる。本条件では、切り厚さが非常に小さいので、ペクレ数 P_s も小さく、相対的に熱の拡散が早い。したがって、相

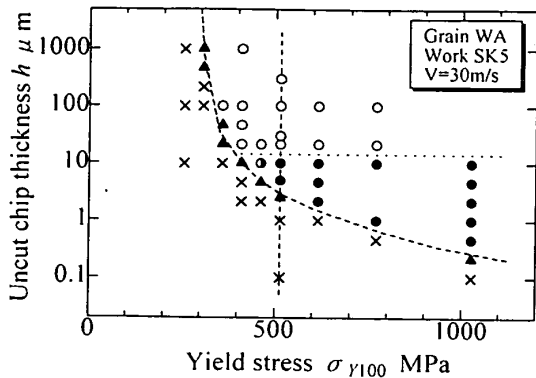


Fig. 10 Chip formation map (influence of yield stress). Cutting conditions are the same as in Fig. 3.

対的な温度の上昇速度は、切りくずが生成される場合に比べて、かなり遅く、温度上昇も十分でない。その結果、相当応力は、約 1000MPa まで増大した後、緩和されることなく、高いレベルを維持する。

4. 切りくず生成に及ぼす材料物性の影響

特性の異なる個々の材料の被研削性を検討するためには、被削材の特性が研削に及ぼす影響を明らかにする必要がある。しかし、実在する材料の物性値をそのまま使用したのでは、値の選択に制限があるだけでなく、複数の物性値が同時に変わることになり、特定の物性値の影響を抽出できない。そこで、SK-5 の物性値を基本として、そのうちのひとつのパラメータを変化させることにより、物性値の相違が切りくず生成状態に及ぼす影響を解析した。標準の砥粒切削条件としては、工具材 WA、切削速度 30m/s、すくい角 $\gamma = 45^\circ$ を想定し、切りくず厚さと物性値の多くの組合せに対して、解析を行った。また得られた切りくず生成状態には、下記の記号を対応させ、切りくず生成マップを作成した。

1. 切りくず生成不良 (記号×)。盛り上がり主体の変形で切りくずはすくい面上を流れない。
2. 盛り上がり形切りくず (記号▼)。切りくず厚さは増加し続けるが、盛り上がりとは異なり切りくずはすくい面上を流れる。(例として、図 11, $b=0.025$)
3. 盛り上がり形から流れ形切りくずへの遷移領域 (記号▲)。
4. 流れ形、リボン状、および波状切りくず (記号●)。
5. 波状から鋸歯状切りくずへの遷移領域 (記号、半黒丸)。
6. 鋸歯状切りくず (記号○)。

4.1 降伏応力の影響 最初に、材料の機械的性質として最も基本的な降伏応力の影響について検討した。

このために、式 (2) に定数 C_Y を乗じて

$$\bar{\sigma} = 380C_Y \exp(-p(\theta - \theta_c)) \left(\frac{\dot{\epsilon}_p}{1000} \right)^a \left\{ \int dW + c \right\}^b \quad (6)$$

と表し、 C_Y を増減することによって降伏応力を調節した。図 10 に降伏応力による切りくず形態の変化を示す。降伏応力はひずみ速度によって変わるので、横軸には、ひずみ速度が $100s^{-1}$ のときの降伏応力 σ_{Y100} をとり、これにより降伏応力の変化を代表させた。なお、SK-5 の σ_{Y100} は 513MPa であり、SK-5 の本来の切りくず形態は図中の縦の破線上に示される。

図より臨界切り厚さは降伏応力の増加と共に減少することが分かる。生成する切りくずは、 $10\mu m$ 以上の切り厚さにおいて、降伏応力に無関係に鋸歯状を呈する。また、降伏応力が 300MPa より小さい範囲では臨界切り厚さが急激に増大し、良好な切りくずは生成しない。前章で考察したように、大きな負のすくい角での切りくず生成機構には温度の影響が非常に大きく、図 9 のように温度上昇が不十分な場合には、切りくず生成が不良となる。したがって降伏応力の小さな材料では、加工に要するエネルギーが少なく、温度が上昇しにくいいため、良好な切りくず生成が阻害される。その結果、切りくず生成状態が不安定になり、仕上面粗さの増大や振動の発生などによって、仕上面性状は悪化する。また良好に排出されない切りくずは目づまりを助長するものと推測される。結局、「降伏応力が小さく軟らかい材料は研削が難しい」という経験的によく知られた軟質材の被研削性は、同図の結果から良く理解できる。

4.2 加工硬化指数の影響 実在の材料では、加工硬化と加工軟化が複合した複雑な変形状態を経て切りくずが生成される。そこで、熱軟化に関する係数は不変のまま、加工硬化のみを変えることにより、切りくず生成に及ぼす加工硬化と熱軟化の相対的な影響を検討した。

図 11 は、式 (6) の指数 b を変化させたときの切りくず生成状態である。ただし、指数 b のみを変えると、降伏応力も変わるので、温度 $20^\circ C$ 、ひずみ速度 $100s^{-1}$ における降伏応力 σ_{Y100} を基準とし、その値が SK-5 のそれと同じ 513MPa になるように C_Y を調節した。同図の切りくず厚さは $2.5\mu m$ であるが、加工硬化の違いによって切りくず生成状態が複雑に変化することが分かる。加工硬化指数 0.01 では加工硬化の影響が小さいため、容易に切りくずが排出される。加工硬化指数が 0.025 になると加工硬化の影響が大きくなるために切りくず厚さが増大し、0.10 では切りくず

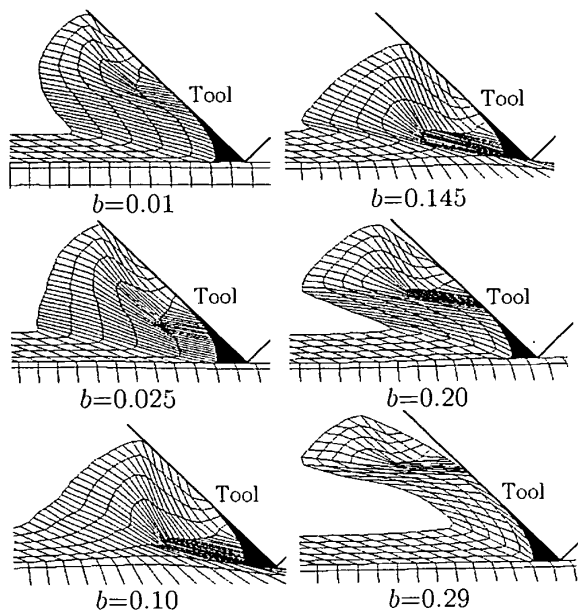


Fig. 11 Change in chip geometry with work-hardening exponent. Cutting conditions are the same as in Fig.2 except uncut chip thickness is $2.5\mu\text{m}$.

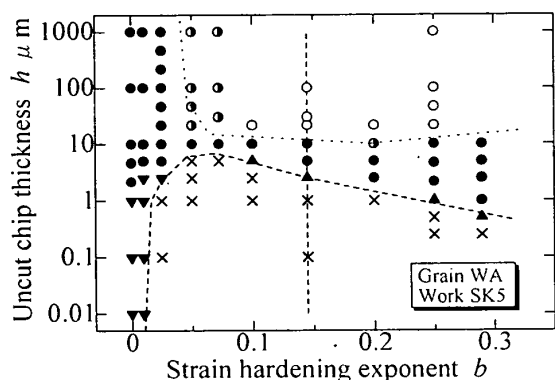


Fig. 12 Chip formation map (influence of work-hardening exponent) (I). Cutting conditions are the same as in Fig.3.

生成は不良となる。ところがSK-5の実際の指数である0.145まで大きくなると、盛り上がりから流れ形への遷移状態になり、それ以上の指数においては流れ形の切りくずが生成され、指数の増加とともに切りくずは薄くなる。

図12に、指数 b と切り厚の組み合わせに対する切りくず生成マップを示す。加工硬化が非常に小さな領域では、主に流れ形の切りくずが生成される。指数が0.05程度まで増加すると加工硬化が大きくなるため、切り厚が小さい場合には、盛り上がりが生じ、切りくず生成が不良となる。良好に切りくずを生成するためには、せん断面温度を上げる必要があり、そのために臨界切り厚 h_c は急激に増大する。し

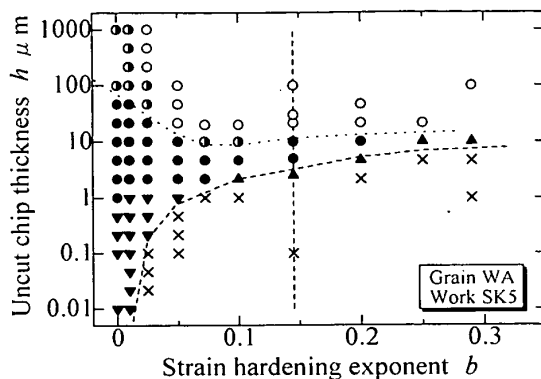


Fig. 13 Chip formation map (influence of work-hardening exponent) (II). Cutting conditions are the same as in Fig.3.

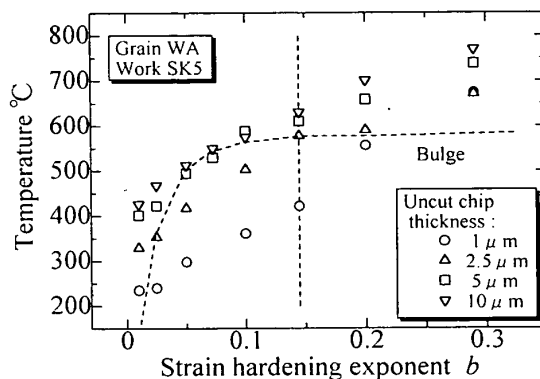


Fig. 14 Change in the maximum temperature with work-hardening exponent. Cutting conditions are the same as in Fig.3.

かし更なる指数 b の増加に対して、臨界切り厚は緩やかに減少する。 σ_{Y100} を一定としているので、加工硬化が大きいほど塑性仕事が増大し、せん断面温度が上昇しやすいからである。

次に、相当塑性ひずみ1.0、温度 20°C 、ひずみ速度 1000s^{-1} におけるSK-5の応力を基準とし、この値が上記の条件で常に等しくなるように、加工硬化指数 b と C_Y とを同時に変化させ、解析を行った。図13に結果を示す。切りくずのひずみは約2であるから、大略、消費される塑性仕事は等しいが、加工硬化が異なる場合を想定することができる。この場合には、指数の増加に伴って臨界切り厚が単調に増大する。

図14に、図12の条件における切りくず最高温度と加工硬化指数の関係を示す。また図中の破線は、臨界切り厚における切りくず最高温度を示す。加工硬化が非常に小さい場合には、比較的低い温度上昇でも切りくずが生成する。しかし指数 b が0.05まで大きくなると、臨界切り厚における切りくず最高温度は、上述のように急激に上昇し、さらに大きな指数 b に対しては、約 580°C で、ほぼ一定となる。このこと

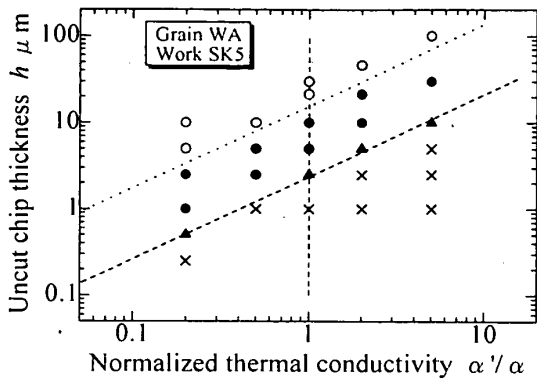


Fig. 15 Chip formation map (influence of thermal conductivity). Cutting conditions are the same as in Fig. 3.

から、切りくず最高温度で評価した場合、約 580 °C が切りくず生成に必要な温度であることが分かる。

以上のように、切りくずの生成状態は、加工硬化と切削温度とに密接に関係する。また加工硬化は、塑性仕事により消費されるエネルギーに直接影響し、その結果として切削温度に影響を及ぼすので、切りくず生成状態は複雑に変化する。しかし実在材料を用いた実験結果からこうした特性を求めることは、非常に難しい。したがって解析的な手法により被研削性を検討することは極めて有効であることが分かる。

4.3 熱伝導率の影響 被削材の熱伝導率は熱の拡散速度を支配し、式 (3) のペクレ数に影響を及ぼすため、切りくず生成状態に対し、非常に重要な物性値である。一般に熱伝導の悪い材料では加工表面の温度が上昇するので、研削焼けや引張り残留応力が生じやすい。また、切りくずの温度が上昇し、工具摩耗を促進する。そこで、被削材の熱伝導率を SK-5 のその 1/5 から 5 倍まで変化させ、解析を行った。図 15 に、得られた切りくず生成状態を示す。なお、横軸は想定した被削材と SK-5 との熱伝導率の比 α'/α である。同図より、臨界切り厚さは熱伝導にほぼ比例するため、臨界切り厚さにおいてペクレ数はほぼ一定となる。また、図 3 と図 15 の結果より、熱伝導率の低下は研削速度の増大に対応する。さらに、波状と鋸歯状の切りくず形態の境界も直線となるため、熱伝導による切りくず生成状態の変化は、非常に単純であり、その影響に関しては容易に予測できることが分かる。

例えば、熱伝導率のよい材料では、臨界切り厚さが大きいので、切りくずが排出しにくく、目詰まりが生じやすい。これを避けるためには、砥石の切り込みや研削速度を増加させることが必要であるが、切り込みの増加は加工表面の品位や精度を低下させるので、好ましくない。そこで、高品位加工を実現するために、

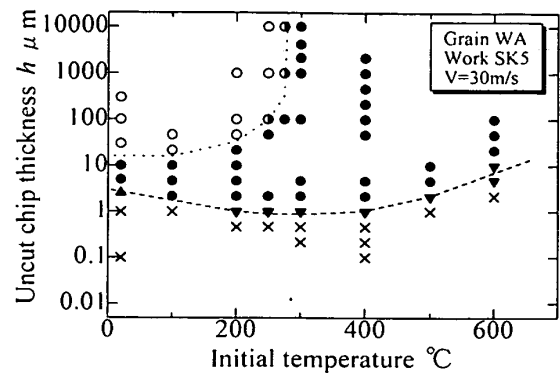


Fig. 16 Chip formation map (influence of initial temperature). Cutting conditions are the same as in Fig. 3.

研削速度の高速化が重要であることが分かる。

4.4 初期温度の影響 研削加工では、砥石と被削材の接触弧内において砥粒による切削が次々と行われるため、先行する砥粒によって削られ、温度が上昇した面を、後続の砥粒が削ることになる。そこで、被削材の初期温度が切りくず生成に与える影響を確認しておくことは有用である。図 16 に被削材の初期温度を上昇させた場合の切りくず生成状態の変化を示す。臨界切り厚さは、初期温度が 200 °C になるまで減少し、200 °C から 400 °C の間ではほぼ一定となり、それ以上の高温では上昇する。しかし、臨界切り厚さに及ぼす初期温度の影響は大きくない。一方、鋸歯状切りくずへ遷移する切り厚さは温度上昇に伴って増大し、270 °C 以上では、切り厚さを増大させても鋸歯状切りくずは生成しない。切削では、被削材の温度上昇にともなって、SUS304 のように鋸歯状切りくずが消滅する場合と炭素鋼 S20C のように発達する場合があるが^(11, 12)、図 16 の SK-5 の結果は SUS304 における変化と同様である。初期温度が上昇すると、切りくず全体にわたって、熱軟化が相対的に優位になるので、SK-5 の特性では変形の集中が生じにくくなると考えられる。

上述のように、臨界切り厚さに対しては、初期温度の影響は小さい。しかし、切りくず生成状態に及ぼす初期温度の影響は存在し、切りくずの厚さは、初期温度の上昇に伴って少なからず増加した。したがって、砥石と被削材の接触弧内における温度の上昇は、砥粒切削状態を悪化させる可能性があり、研削焼けや引張り残留応力を防ぐ意味でも積極的な冷却が有効であると考えられる。

上記の結果の他に、被削材と工具の初期温度を共に上昇させた場合を解析している。この場合には、被削材から工具に向かう熱の流れが弱まり、切りくず中の

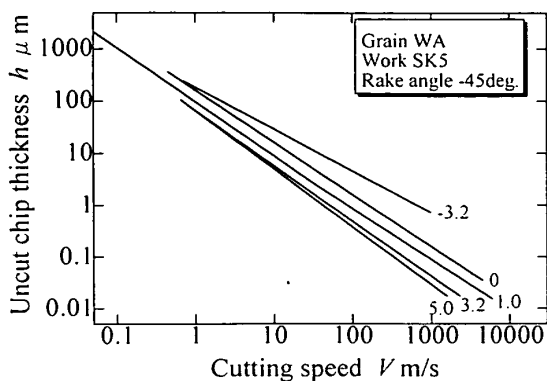


Fig. 17 Influence of strain-rate-hardening exponent on the critical uncut chip thickness. Cutting conditions are the same as in Fig.3.

温度勾配が変化するが、切りくず生成状態に与える影響はほとんど見られなかった。

4.5 ひずみ速度硬化指数の影響 図 17 にひずみ速度硬化が臨界切取り厚さに及ぼす影響を示す。横軸に研削速度をとり、想定する材料と SK-5 とのひずみ速度硬化指数の比 a'/a をパラメータとした場合の結果である。図中の数字は上述の指数の比であり、1.0 の場合が SK-5 に相当する。ひずみ速度硬化が小さいほど、臨界切取り厚さが大きくなり、切りくずは生成しにくいことが分かる。非現実的ではあるが、指数の比を負の -3.2 とし、ひずみ速度軟化を生じさせた場合にも、臨界切取り厚さは明らかに増加した。

既に加工硬化が存在するので、ひずみ速度硬化を小さくして加工硬化を緩和する場合とひずみ速度硬化を大きくしてさらに硬化を促進させる場合を想定する。ここで、図 11 の切りくず生成を参照すると、加工硬化指数が $b = 0.145$ の SK-5 では、加工硬化をさらに大きくした方が、良好な切りくず生成が実現することが分かり、図 17 の結果もこの事実に対応している。したがって、大きな負のすくい角による砥粒切削過程に対しては、ひずみ速度硬化は、加工硬化と組み合わせると複雑な影響を及ぼすことが分かる。

以上のように、本章では、すくい角が -45 度の場合の切りくず形態と臨界切取り厚さに注目することにより、研削特性に及ぼす材料物性の影響を明らかにした。臨界切取り厚さは与えられた研削条件に対して切りくず生成の良否を判定することとなり、被研削性としては仕上面の品位を評価したことになる。しかし工具温度や切削抵抗も解析されるため、適当な工具摩耗

条件が与えられれば、摩耗予測に基づいて砥石寿命評価も可能になり、総合的な被研削性を解析的に検討できることになる。

5. 結 論

砥粒切削シミュレーションにより、大きな負のすくい角による切りくず生成機構を明らかにするとともに、被削材 SK-5 の物性値をシミュレーション上で変更することにより、研削に及ぼす材料物性と加工条件の影響を総合的に検討し、以下の結論を得た。

1. 大きな負のすくい角による砥粒切削状態の有限要素解析は、切りくず生成状態の予測や被削材の被研削性の検討に極めて有効である。
2. 被削材の被研削性を正しく理解するためには、加工硬化、降伏応力、熱伝導率等の物性値が、切りくず生成に及ぼす複雑な影響を、解析により定量的に把握することが重要である。
3. 共析鋼 SK-5 で鋸歯状切りくずが生成される場合には、断熱的せん断変形が実現し、ひずみ速度と温度の急激な上昇を伴いながら応力は激減する。

文 献

- (1) 小野浩二, 研削仕上, 槇書店, (1962), pp.205-206
- (2) 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), pp.1467-1471
- (3) 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), pp.1099-1104
- (4) 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), pp.607-612
- (5) 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), pp.966-972
- (6) 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, “日本機学会論文集 (C 編)”, 60, 577, (1994), pp.2946-2951
- (7) 大淵慶史, 帯川利之, 高速研削における切りくず生成の解析的検討, “精密工学会誌”, 67, 6, (2001), pp.910-915
- (8) E. G. Loewen and M. C. Shaw, *On the Analysis of Cutting-Tool Temperatures*, “Trans. ASME”, 76, Feb, (1954), pp.217-231
- (9) B. T. Chao and K. J. Trigger, *The Significance of the Thermal Number in Metal Machining*, “Trans. ASME”, 75, Jan, (1953), pp.109-120
- (10) J. H. Wiener, *Shear-Plane Temperature Distribution in Orthogonal Cutting*, “Trans. ASME”, 77, Nov, (1955), pp.1331-1341
- (11) 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), pp.585-591
- (12) 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 3 報), “精密機械”, 48, 2, (1982), pp.198-203