切削油剤作用の力学的シミュレーション*

臼 井 英 治** 白 樫 高 洋** 帯 川 利 之***

Simulation Analysis of Cutting Fluid Action

Eiji USUI, Takahiro SHIRAKASHI, Toshiyuki OBIKAWA

It has been pointed out by several workers that carbontetrachloride as cutting fluid and manganese sulfide as free machining additive make the shear deformation appear more brittle in metal cutting. It is not clear, however, whether the embrittlement really gives rise to an increase of the shear angle and a reduction of the coefficient of tool face friction as usual cutting fluids do. In order to ascertain this problem, a computer simulation of cutting fluid action in a slow speed orthogonal cutting is conducted by applying the finite element method. From the viewpoint of the continuum mechanics, the embrittlement may be approximated to a reduction of strain hardening or material strength in the shear zone. When the such reduction is introduced to only the workpiece surface-layer or to the whole shear zone, it is found that the shear angle increases, the chip becomes thinner, and the cutting force decreases, while the tool-chip contact length, the shape of the stress distribution and the coefficient of friction on the tool face are remained almost unchanged. On the contrary to this, the contact length is shortened remarkably and the cutting force is concentrated near the cutting edge, when the tool face friction is reduced directly.

1. ま え が き

切削油剤がすくい面を潤滑すれば摩擦係数が減少し、せん断角の増大、切削抵抗の減少を生ずることはいわゆる切削方程式¹⁾を用いて容易に説明される。しかし切削過程はすくい面側の現象とせん断域側の現象の平衡に基づいて成立っているから、上述とは逆に切削剤自体が非潤滑性を示す場合でも、せん断域の状態に何らかの変化が強く導入されれば切削の摩擦係数が減少し、せん断角が増大することがありそうである。四塩化炭素の切削油剤作用に関してこうした可能性を最初に示唆したのは Shaw²⁾ であり、四塩化炭素は切削せん断域に形成される微小き裂群に吸着し、垂直応力によりき裂群が接着回復するのを妨げるために加工硬化が減少すると述べている。また著者の一人と Shaw²⁾ はこの機構が実在することを実験的に示し、特に二次元切削において四塩化炭素を単に被削材上面に塗布するのみで切削状態の改善がえられることを示した。榊田ら⁴⁾、中山⁵⁾ は同様な塗布効果が他の油剤についても存在することを確かめている。またイオウ快削鋼中の快削添加物である硫化マンガンは切削せん断域での切りくず生成に際して、応力集中、微小

空隙の発生源となることが岩田ら⁶⁾ によって観察されており、こうした空隙の合体から変形機構がぜい化することが知られている。硫化マンガン自体には、格別の潤滑性がないにもかかわらず切削状態の改善が生ずるのは、せん断域側のぜい性効果がすくい面側にフィードバックされるからだと考えられる⁷⁾。しかしながら、こうしたせん断域での作用がどのような機構でせん断角の増大をもたらすのかは明らかでないし、確かにもたらしうるとの解析的な証明もない。本報告は連続体力学によって現象を近似した場合ではあるが、せん断域効果や上面塗布効果が力系の平衡を介して切削状態を改善しうることを有限要素法によるシミュレーション解析によって具体的に示そうとしたものである。

2. 問 題 の 設 定

従来の諸実験の多くが極低速の二次元切削について行われていることから、問題をこの状況下で流れ型切りくずを生ずる場合に限ることにする。先に著者ら⁸⁾ は、被削材材料の流動応力特性と工具面摩擦の応力特性を導入して有限要素法による計算を行えば、定常切削状態の解を得ることができ、せん断角、工具面の平均摩擦係数、切削抵抗、温度分布、応力-ひずみ分布などの諸量を同時に決定しうること示した。本報告ではまず適当と思われる流動応力特性と摩擦特性を用いて乾切削での定常解を求め、ついで既述の諸効果が導入された時、① 定常切

* 原稿受付 昭和51年12月28日。昭和51年度精機学会春季大会学術講演会(昭和51年4月6日)にて発表。

** 正 会 員 東京工業大学工学部(東京都目黒区大岡山2-12-1)

*** 学生会員 東京工業大学大学院

図1 材料の特性曲線

削状態にどのような相違が生ずるか, ② どのような過渡的变化が生ずるか, を検討する。

流動応力特性については温度とひずみ速度の影響を無視し, 加工硬化のみを考慮する。図1(a)の実線は四六黄銅の通常圧縮試験から得られた塑性曲線であり, これを基準の特性として使用した。切削過程への適用では, 等方性硬化を前提とする塑性仕事の等価性による換算法を用いた。また摩擦特性式として, 次式を用いた⁹⁾。

$$\tau_t/\tau_e = 1 - \exp(-C\sigma_t/\tau_e) \quad (1)$$

ただし, τ_t , σ_t はそれぞれ工具すくい面の摩擦応力, 垂直応力, τ_e は考える地点での切りくず内主せん断応力, C は特性定数である。式(1)はせん断域の状況によって変化する τ_e を含む応力特性であり, 単一の摩擦係数を与えるものではない。

まず図1(a)の実線の塑性曲線は不変とし, 式(1)の特性定数 C を0.6, 1.2, 1.8とする場合の定常解を求める。この3種の係数に対する式(1)の関係を図1(b)にそれぞれ示した。 $\sigma_t \approx 0$ ではクーロン摩擦の状態になって, この場合の摩擦係数は C に等しく⁹⁾, C が大なるほど激しい摩擦状態である。したがって得られる3種の定常解は切削油剤が工具面を直接潤滑したら切削状態がどのように変わるか, に対応する。ただし実際の切削油剤の侵入では位置に応じて色々な C の値の状態となるであろうから, 完全なシミュレーションにはなっていない。

油剤の表層塗布効果は, せん断域内でしか生じないとも考えられるが, レビンダー効果と考えれば表層全体が弱くなっているともみなしうる。そこで表層部のみの流

図2 有限要素分割

動応力を母材のその80%に下げ, 図1(a)の破線(表層効果)の塑性曲線 になるとして定常状態の解を求めた。もちろん摩擦特性($C=0.6$)は表層塗布により影響されないと考える。

せん断域効果については次のように考えられる。せん断域内のある点で相当ひずみ ϵ がある値(本報告では $\epsilon=0.4$)に達すると, き裂や空隙の発生および成長が顕著になり, それらが合体して部分的なすべりがせん断域の各部で発生した。そうすると巨視的には, 材料が弱化して流動応力が低下したものと考えることができる。そこで, せん断域全体について, 相当ひずみが0.4を越えたら加工硬化を減少させて図1(a)の一点鎖線のように塑性曲線を変化させた。この場合をせん断域効果Iとよぶ。しかしながら, き裂や空隙が非常に顕著になり, 有効せん断面の減少が著しくなれば, 連続体力学的にはむしろ加工軟化したとみるべきであろう。そこで同図の二点鎖線のような塑性曲線になる場合も考慮して, これをせん断域効果IIとした。

図2(a)が定常切削状態を求めるために用いた要素分割である。表層効果を検討する場合は, 縦線をほどした一要素列のみを弱化し, せん断域効果の場合は, 実際に有効ひずみが0.4以上になる図示の点を打った要素の強度を低下させた。

表1 切削条件および材料定数

切削条件	二次元切削, すくい角: 25°, 切削速度: 13 mm/min, 切削厚さ: 0.8 mm, 切削幅: 4.88 mm
材料定数	被削材: 四六黄銅, 縦弾性係数: 9 800 kg/mm ² , ポアソン比: 0.35, 摩擦特性係数: 0.6, 1.2, 1.8

次にせん断域効果のない状態に, 突然効果が導入されればどうなるかという過渡変化について考えてみる. この場合, 相当ひずみが 0.4 以上で塑性変形が継続している領域の各部では同時に効果が発生するから, 図 1 (a) の矢印で示すように, 相当ひずみの異なる各地点でそれぞれ一点鎖線で表したせん断域効果の曲線に平行な塑性曲線群に変わるものと考えた. この過渡変化を検討する場合には図 2 (b) の要素分割を用いた. 以上のせん断域のぜい性効果に関する計算に用いた摩擦特性係数はいずれも 0.6 であり, 乾切削の場合と変わらないと仮定する. なお計算に使用した切削条件および材料定数を表 1 に示す.

3. シミュレーション解析の計算手法

等方性の弾塑性理論では応力-ひずみの関係式は, 増分を用いて次式で表される¹⁰⁾.

$$\{d\sigma\} = [D]\{d\varepsilon\} \quad (2)$$

$$[D] = [D^e] - \frac{[D^e]\{\partial f/\partial \sigma\}\{\partial f/\partial \sigma\}^T [D^e]}{H' + [D^e]\{\partial f/\partial \sigma\}\{D^e\}\{\partial f/\partial \sigma\}^T}$$

$[D^e]$ は弾性状態の応力-ひずみ関係マトリクス, f は塑性ポテンシャルでこの場合は Mises の降伏条件, H' は加工硬化係数である. 増分理論による静的問題の有限要素計算では, 各要素の節点反力増分 $\{dF\}$ と節点変位増分 $\{d\delta\}$ との関係式

$$\{dF\} = ([B]^T [D] [B] A + [K_G]) \{d\delta\} \quad (3)$$

に式 (2) を代入した連立方程式を平面ひずみ変形過程の進行とともに, 境界条件を満たしながら解いていけばよい. なお $\{d\varepsilon\} = [B]\{d\delta\}$ であり, A, t はそれぞれ要素の面積および厚さ, $[K_G]$ は幾何学的非線形項¹⁰⁾に相当する. 本報告では $[K_G]$ の項を考慮する計算を行ったが, 先の報告⁸⁾では省略した. しかしこの項の有無は結果に大きな相違を生じないようである.

さて, 実際に切削過程の定常状態を求める方法としては, 反復収束法と呼ぶ次の手法⁸⁾を用いた. 概略は図 3 のフローチャートに示してある. まず妥当と思われるせん断角, 流線を設定し, それに合わせて例えば図 2 (a) のように要素網を組む. ただし, 工具刃先部分には 1 要素長さの割れを入れてある. この状態から工具を押付けて切削を開始する. 増分法による有限要素計算を行いながら微小距離切削すると各要素に相当ひずみ増分を生ず

図3 反復収束法の概要

る. この計算値を設定した流線に沿って着目要素まで積分し, その要素の新しい相当ひずみとする. 次に, 最初の位置に工具を引きもどし, 各要素の応力をゼロとして新しい相当ひずみ分布とそれに対応する加工硬化状態に対して, また微小距離切削する. この手順を繰返すと, 最初に設定したせん断角, 流線が正しければ相当ひずみ分布は収束し, 定常切削状態が得られたことになる.

この方法は切削開始から定常状態にいたる過程を逐次追跡する場合と比べると計算の収束が極めて早く, 有限要素の組替えや刃先節点の分割手続¹¹⁾を要しない長所がある. しかし, 定常状態の流線を想定する計算であるから, この方法ではせん断域効果が導入されてからの過渡状態の推移をみる訳にはいかない. そこで, このような過渡変化を調べる場合には, 有限要素を図 2 (b) のような新たな要素分割に組替え, あらかじめ反復収束法で定常切削状態を得ておく. そしてその状態から工具を引きもどすことなく, 要素の組替え, 刃先節点の分割手続を行いながらひたすら前進させ, 各要素の相当ひずみ増分をそれぞれ逐次加算して相当ひずみを求める通常の方法をとる. もちろん流線は設定しない. この手法を前進収束法と呼ぶことにする. 効果の導入はこの計算過程で行えばよい.

4. 解析結果とその検討

4.1 定常切削状態の変化

まず前項の有限要素計算法で実際の状態に近い解が得

(a) 有限要素計算による結果

(b) 格子線解析法による応力分布, 切削力の計算結果

図4 有限要素法と格子線解析法による結果の比較

(a) 切削力, 主せん断ひずみ速度分布

(b) 工具すくい面の応力分布

図5 直接潤滑効果による切削状態の変化

られるかどうか確かめておく必要がある。図4(a)は摩擦特性係数 $C=0.6$ で四六黄銅の塑性曲線(図1(a)の実線)を用いた場合の反復収束法による解であり, 同図(b)は同じ切削条件で実際に四六黄銅を切削し, 格子線解析法で応力分布を半実験的に求めた結果である¹²⁾。計算されたすくい面平均摩擦係数0.42, せん断角 24° , 合成切削力480kgは実測された結果と同等であり, すくい面上およびせん断面付近のすべり線上の応力分布も類似なものとなっている。等方性連続体近似であるにもかかわらず, 採用した有限要素計算法で実際に近い妥当な状態を実現できるといえる。

図5(a)は摩擦特性係数を $C=1.8, 1.2, 0.6$ と変化した場合の定常切削状態の比較であり, 同図(b)は工具すくい面の応力分布, 接触長さのみを取出して比べたものである。一点鎖線, 破線, 実線がそれぞれ $C=1.8, 1.2, 0.6$ に対応している。摩擦の軽減とともに, せん断角の増大, 切りくず厚さ, 切削抵抗, すくい面平均摩擦係数の減少が生ずるのが明らかである。また注目すべきは同図(b)の応力分布と接触長さであり, 低摩擦では著しく接触長さが減少し, 切削力が刃先側に集中することがわかる。既述のように, この結果は必ずしも切削油剤の侵入による直接潤滑に対応するものではないが, 切削油剤は図示の尾を引いた低応力域に侵入し, 同様な変化をもたらすものと考えられる。著者の一人¹³⁾は光弾性実験により, このような変化が切削油剤の侵入に際して生ずることを示した。なお乾切削時の摩擦係数が大なる場合ほど切削油剤の効果が著しいことを経験するが, 上述の低応力域の広がりや油剤の侵入の容易さがこれを説明しているように思われる。

図6(a)の破線は表層効果(レビンダー効果)を導入した場合の定常切削状態であり, 効果を導入しない実線の場合と比較されている。摩擦特性定数はいずれも $C=0.6$ である。表層効果により, せん断角の増大, 切りくず厚さの減少, 切削抵抗の減少が生ずるのは明らかであるが, すくい面の平均摩擦係数はほとんど変化しない。この結果は榊田ら⁴⁾, 斎藤ら¹⁴⁾の実測結果と一致している。計算結果は表層をどの程度に, またどの深さまで弱化するかの設定によるわけであるが, 同図の結果はやはり, 表層効果のみでは顕著な切削状態の改善が得られないことを示しているように思われる。ただし, 強調したいのは同図の結果が厳密な

(a) 表層効果

(b) せん断域効果 I

(c) せん断域効果 II

図6 諸効果による切削状態の変化

理論結果である点であり、表層効果のみで切削状態が改善されるのは確かである。

図6(b)の破線はせん断域効果Iを導入した場合の定常切削状態であり、効果を導入しない実線 ($C=0.6$) の場合と比較されている。また同図(c)はせん断域効果IIを導入した場合の同様な比較である。効果が強まるほどせん断角の増大、切りくず厚さと切削抵抗の減少が著し

図7 単位切削幅の切削力の変化

くなっているが、すくい面の平均摩擦係数、接触長さ、応力分布形状に及ぼす影響は顕著でない。 $C=1.2$ とした場合の結果も同様であり、図5に示したすくい面直接潤滑の場合とは著しく相違している。他の諸結果も総合して考えると、すくい面の応力分布と接触長さを強く支配しているのは図1(b)の摩擦特性とその特性定数のようであり、これを変化させる要因（例えばせん断域効果の導入によって C の値も変化するなど）がなければ、すくい面の平均摩擦係数に大幅な改善は生じないように思われる。ただし本報告の結果はあくまでも等方性連続体理論による近似的シミュレーションのそれであり、内部き裂の発生、成長、合体の過程を非連続体力学で扱ったものではない。例えば図6(b),(c)のせん断域を見ると、効果I,IIの導入によりひずみ域の幅が減少し、強いひずみ集中が生ずるのがわかるが、非連続体の場合、この状態に到達する以前にせん断域の全長にわたり巨視的すべりを生ずるのである。このような過程の繰返しがすくい面の切りくず接触長さを縮小させ、図5(b)のように平均摩擦係数を減少させることはありそうに思われる。

4.2 切削状態の過渡的变化

まず反復収束法で求めた解が安定したものであるかどうかを確かめるため、反復収束法の定常解の状態から、前進収束法の手法を用いて更に切削を継続してみた。このときの切削抵抗の変化は図7の実線のようにになった。切削抵抗は工具の移動とともにわずかながら増大していく。そして1節点間の切削終了ごとに行われる要素の組替え、切れ刃節点の再分割に伴って切削力にわずかな段差が生じた。現存の計算機（東大大型計算機センター HITAC 8800/8700）の容量と計算技術上の問題からこれ以上の改善はできなかったが、せん断角や切りくず厚さに関する限り、この間でほとんど変化が生じていない。例えば図8(a),(b)の実線はこれを示すものであり、それぞれ切削距離370 μm と750 μm の状態である。同図(a)の太線で囲んだ要素が同図(b)では隣接位置に移動している。

図8 要素の変形過程 (節点を曲線で連結している)

次に、一応の定常状態がえられたとし、切削距離 $30 \mu\text{m}$ において図1(a)の要領でせん断域効果Iを突然導入してみた。四塩化炭素を突然に切削位置に注入した場合に相当する。ただし簡単のためすくい面の摩擦特性は不変 ($C=0.6$) とした。図7の破線は効果の導入時からの切削抵抗の推移である。また、図8(b)の点線は切削距離 $750 \mu\text{m}$ における要素の状態であり、流線は工具側に彎曲してせん断角の増大、切りくず厚さの減少が生じようとしているのがわかる。また塑性流れの変化は工作物上面側ではげしく生じ、工具すくい面側での変化は少ない。工作物上面側ほど外乱の影響を受けやすいわけであり、せん断角の変化もこのゆえに生ずる。またすくい面の応力分布形状、平均摩擦係数に変化がみられないのもこのためであり、わずかな表層弱화가切削状態をかえうるのもこのような力系の平衡特性によるものと考えられる。なお図示の点線の状態では変形域内の要素がそっくり入替わっていないので、新しい定常状態は得られていない。

5. 結 論

- (1) すくい面摩擦の応力特性を導入した有限要素法解析により、実際の状態に近い極低速流れ型切削の解をうることができる。
- (2) 切削せん断域になんらかの方法でぜい性効果が導入された場合、これを塑性曲線の変化として連続体力学的にとらえるものとすれば、工具すくい面の

摩擦特性に変化が生じない場合でも、力系の平衡を介してせん断角の増大、切りくず厚さ、切削抵抗の減少といった切削状態の改善がえられる。

- (3) 前項のぜい性効果によって生ずる切削状態の過渡的变化を前進収束法によるシミュレーション解析でとらえることができた。
- (4) 工作物表層がレビンダー効果などで弱化する場合も同様の改善が生じうるが、せん断域における効果の場合ほど改善は著しくない。
- (5) 前記の両効果の導入のみではすくい面上の平均摩擦係数、応力分布の形状、切りくず接触長さはほとんど変化しない。すくい面近傍の塑性流れに生ずる変化が少ないためである。これに対し、すくい面の摩擦を直接に軽減させる場合には、(2) 項の改善のほか、切りくず接触長さの著しい減少、切削力の刃先側への集中、平均摩擦係数の減少が同時に生ずる。

謝 辞

本報告の諸計算、特に過渡状態の検討については東京工業大学大学院生・奈良林直君の努力によるところが大きい。記して感謝の意を表する。

文 献

- 1) 例えば, M. E. Merchant: Mechanics of the Metal Cutting Process, II, J. Appl. Phys., 16, (1945) 318; E. H. Lee & B. W. Shaffer: The Theory of Plasticity Applied to a Problem of Machining, J. Appl. Mech., 73, (1951) 405.
- 2) M. C. Shaw: On the Action of Metal Cutting Fluids at Low Speeds, Wear, 2, (1958/59) 217.
- 3) E. Usui, A. Gujral & M. C. Shaw: An Experimental Study of the Action of CCl_4 in Cutting and Other Processes Involving Plastic Flow, Int. J. Mech. Tool Des. Res., 1, (1961) 187.
- 4) 榊田勝実, 渡辺善次郎, 益子正巳: 被削材表面環境の切削現象に及ぼす影響, 日本機械学会論文集, 38, 316 (1972) 3246.
- 5) K. Nakayama: The Formation of "Saw-toothed Chip" in Metal Cutting, Proc. ICPE, (1974) 572.
- 6) K. Iwata & K. Ueda: Dynamic Behaviour of Manganese Sulphide Inclusions in Machining under Scanning Electron Microscope Observation, Proc. ICPE, (1974) 516.
- 7) 白井英治: 快削鋼の被削性に関する研究, 機械研究所報告, 43 (1961).
- 8) 白樫高洋, 白井英治: 二次元流れ型切削のシミュレーション解析, 精密機械, 42, 5 (1976) 340.
- 9) 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.
- 10) 山田嘉明: 塑性・粘弾性, 培風館 (1972).
- 11) 横内弘宇, 中島明一, 前川克広, 菊池千之: 有限要素法による金属切削機構の解析 (第3報), 昭和48年度精機学会春季大会学術講演会前刷 (1973) 49.
- 12) 白井英治, 牧野亮哉: 低速流れ形切削における応力, ひずみ分布, 精密機械, 33, 4 (1967) 245.
- 13) 7)に同じ, p.11
- 14) 斎藤勝政, 岸浪建史, 島崎 茂, 能 明彦: 切削面性状に及ぼす有機物質の効果 (第2報), 昭和51年度精機学会春季大会学術講演会前刷 (1976) 161.