過渡的切削過程における表面特性の研究 (第1報)*

—加工硬化層の解析—

岡村 健二郎** 中島 利勝** 宇野 義幸***

Surface Integrity in the Transitional Cutting Process (1st Report)

—Analysis of Work Hardened Layer—

Kenjiro OKAMURA, Toshikatsu NAKAJIMA, Yoshiyuki UNO

In machining with cutting edges in periphery of a multi-cutting edge tool, the machined surface is generated by repeat of the transitional cutting process. In other words, the machined surface is generated in the transitional cutting process by the beginning part of contact between a cutting edge and workpiece. Surface integrity in the transitional cutting process should, therefore, be analyzed, recognizing the phenomena near the beginning point of the contact.

In this paper, from this point of view the work hardened layer has been analyzed in the transitional cutting process theoretically and experimentally.

First, the work hardening coefficient, a fundamental value on analyzing the depth of work hardened layer, is experimentally measured, and the influences of machining conditions on the coefficient are investigated. Then, the generation curve of the work hardened layer is determined by the work hardening coefficient, and the maximum depth of work hardened layer is theoretically analyzed.

Further, the influences of machining conditions on the maximum depth of work hardened layer are investigated experimentally, and it is indicated that the experimental results coincide with the theoretical one.

1. 緒 言

研削加工やフライス加工などのような多刃回転工具による切削加工においては、旋削などの定切込み切削とは異なり、一つの切れ刃による幾何学的切りくず形状がゼロから始まり最大切りくず厚さに達した後、再びゼロにもどるという過渡的切削過程の繰返しによって表面が生成される。すなわち切れ刃は工作物との接触始点から切りくずを生成するのではなくて、切れ刃と工作物およびそれらの支持部の弾性や塑性特性によって、弾性すべり領域、塑性すべり領域を経た後に切削領域に入って切りくずを生成する¹⁾。

一方、加工部品の性能、寿命という観点からみるならば、切削加工においては最終的に残る仕上表面が重要であり、これらの過渡領域における諸現象が仕上表面の特性にいかなる影響を及ぼすかを研究することが必要である。過渡的切削において一般に仕上表面として残るの

は、切れ刃と工作物の接触始点近傍であり、その後に続く大部分の領域は後続切れ刃によって切りくずとして除去されるために、過渡的切削によってできる仕上表面の表面特性を研究するには、接触始点近傍における情報を得ることが重要である。

本研究においては、すでに得られている過渡的切削過程における諸現象の認識のうえにたつて、仕上表面の表面特性、すなわち加工硬化層や残留応力などを理論的、実験的に解析し、加工部品の性能、寿命を加工の段階で制御するための基礎的理論を展開しようとするものである。本報告においては、表面特性値のうちの加工硬化層をとりあげ、まず加工硬化係数を実験的に測定し、それを用いて加工硬化層創成曲線を理論的に決定する。さらに過渡的切削によって得られる仕上表面下の加工硬化層深さを理論的、実験的に解析し、過渡的切削過程における基本境界条件のうち何が加工硬化層深さを本質的に支配するかを明らかにする。

2. 過渡的切削モデル

多刃回転工具の円周切れ刃による加工においては、切れ刃が工作物に対して非常に小さい角度をなして接触を

* 原稿受付 昭和47年11月15日。昭和47年度精機学会秋季大会学術講演会(昭和47年10月30日)にて発表。

** 正会員 京都大学工学部(京都市左京区吉田本町)

*** 学生会員 京都大学大学院

図2 模型切削実験における加工硬化層深さ

図3 接触始点近傍における加工硬化層深さ

な勾配になって直線的に増加する²⁾。なお、塑性限界干渉深さ y_p は切削抵抗の変化曲線より求めた y_p とよく一致した³⁾。塑性領域、切削領域におけるそれぞれの直線の勾配を加工硬化係数 H_p , H_c とすると、 H_p は塑性領域において切れ刃が単位量だけ切込んだときの y_H の増分を示し、 H_c は切削領域における増分を意味する。したがって、塑性領域および切削領域における加工硬化層深さ y_H はそれぞれ次式で与えられる。

$$y_H = H_p \cdot y \quad (0 \leq y \leq y_p) \quad (1)$$

$$y_H = H_c(y - y_p) + H_p \cdot y_p \quad (y \geq y_p) \quad (2)$$

加工硬化係数 H_p , H_c と塑性限界干渉深さ y_p の値は切削速度の増加とともに減少する。それらの値を一括して表1に示す。

3.3 加工硬化層創成曲線

前節で求めた加工硬化係数を用いると、加工硬化層創成曲線を理論的に解析することができる。図4は過渡的切削過程における一つの切れ刃による加工硬化層創成曲線を解析するための座標系を示すものである。図において曲線 PCD は一つの切れ刃によって生成される加工面創成曲線であり、点Eは切れ刃と工作物との接触始点である。切れ刃は弾性領域 EP の間は工作物上を弾性的に

表1 加工硬化係数

V	$H_p(\mu\text{m}/\mu\text{m})$	$H_c(\mu\text{m}/\mu\text{m})$	$y_p(\mu\text{m})$
30 m/min	17.9	1.45	7.80
104	15.0	1.25	6.45
245	13.5	0.84	5.85

図4 加工硬化層創成曲線解析のための座標系

すべるのみであり、加工硬化は生じないが、点Pに至ると工作物は塑性変形を始め、この部分から加工硬化が始まる。ここで前節で求めた関係を使うと塑性変形域 PC における加工硬化層深さは式(1)に従って増加し、C点を過ぎた切削域における加工硬化層深さは式(2)に従う。これらの関係を式に表わせれば次のようになる。

$$y_1(x) = \frac{A}{2R_s} \left(x + \frac{f}{2} \right)^2, \quad y_2(x) = \frac{A}{2R_s} \left(x - \frac{f}{2} \right)^2$$

$$\therefore y(x) = y_1(x) - y_2(x) = \frac{A \cdot f}{R_s} x$$

ここで塑性域、すなわち $0 \leq y(x) \leq y_p$ の場合は式(1)より

$$y_H(x) = H_p \cdot y(x) = \frac{A \cdot f}{R_s} H_p \cdot x$$

となるから、加工硬化層創成曲線は

$$y_K(x) = y_H(x) - y_2(x) = \frac{A \cdot f}{R_s} H_p \cdot x - \frac{A}{2R_s} \left(x - \frac{f}{2} \right)^2 \quad (3)$$

この曲線の極値をとる x の値は

$$x_1 = f \cdot \left(H_p + \frac{1}{2} \right) \quad (4)$$

また切削域、すなわち $y(x) \geq y_p$ の場合は式(2)より同様に

$$y_K(x) = \frac{A \cdot f}{R_s} H_c \cdot x + y_p(H_p - H_c) - \frac{A}{2R_s} \left(x - \frac{f}{2} \right)^2 \quad (5)$$

極値をとる x の値は

$$x_2 = f \cdot \left(H_c + \frac{1}{2} \right) \quad (6)$$

一方、式(3), (5)の交点、すなわち塑性限界点における x の値は

$$x_p = R_s \cdot y_p / A \cdot f \quad (7)$$

最大加工硬化層深さ D_H は加工硬化層創成曲線 $y_K(x)$ の最大値で与えられるから, x_1 , x_2 および x_p の大小関係により図5の三つの場合に分けられる. 図において (a) は塑性域において最大値が与えられる場合であり, 最大加工硬化層深さ D_H は式(8)の x に x_1 を代入することによって得られる. (b) は塑性限界点 $x = x_p$ における値が最大加工硬化層深さ D_H を与える場合で, ここでは式(8)と式(5)の値が一致する. また (c) は切削域において最大値が与えられる場合で, 式(5)の x に x_2 を代入した値が最大加工硬化層深さ D_H となる. 以上により, それぞれの場合における最大加工硬化層深さ D_H は次に示すようである.

(a) 塑性域で D_H が与えられるとき ($x_2 \leq x_1 \leq x_p$)

$$D_H = y_K(x_1) = \frac{H_p(H_p+1)}{2} f \cdot i_g \quad (8)$$

(b) 塑性限界点で D_H が与えられるとき ($x_2 \leq x_p \leq x_1$)

$$D_H = y_K(x_p) = H_p \cdot y_p + \frac{y_p^2}{2} - \frac{1}{f \cdot i_g} \cdot \frac{f \cdot i_g}{8} \quad (9)$$

(c) 切削域で D_H が与えられるとき ($x_p \leq x_2 \leq x_1$)

$$D_H = y_K(x_2) = \frac{H_c(H_c+1)}{2} f \cdot i_g + y_p(H_p - H_c) \quad (10)$$

図5 最大加工硬化層深さの形態

図6 最大加工硬化層深さの理論曲線

すでに述べたように, H_p , H_c および y_p は切削速度が一定であれば定数であり, したがって上式からわかるように最大加工硬化層深さ D_H は一刃あたりの送り f と切れ刃切込み角 i_g の積 $f \cdot i_g$ のみの関数である. 図6は表1に示す切削速度 $V = 30 \text{ m/min}$, 104 m/min , 245 m/min における H_p , H_c および y_p を用いて, 上式より計算された最大加工硬化層深さ D_H を示す. 図よりわかるように, $f \cdot i_g$ の小さいところ, すなわち塑性域で最大加工硬化層深さ D_H が与えられる場合には, D_H は積 $f \cdot i_g$ の増加に伴って直線的に急増し, D_H が塑性限界点における値で与えられるところでは, 勾配を徐々に減少させながら増加する. さらに積 $f \cdot i_g$ が大きくなって切削域で最大加工硬化層深さ D_H が与えられる場合には, 塑性域における勾配の $1/10$ 以下のオーダーのゆるやかな勾配で直線的に増加する. また D_H は切削速度の増加とともに減少する.

3.4 切込み深さの影響

以上の解析は, 最大加工硬化層深さ D_H が $x \leq L_t$ において与えられる場合であり, この領域においては干渉深さ y は切込み深さ A に無関係であるために, D_H も A に無関係である. しかし, 切込み深さ A , 切削域加工硬化係数 H_c , 一刃あたりの送り f , および切れ刃切込み角 i_g との関係から $x_2 \geq L_t$ となる場合には, $x = L_t$ での値 $y_K(L_t)$ が最大加工硬化層深さ D_H を与える. この場合, y は A の関数となるから D_H も A の影響を受ける. これらの関係を式に表わすと次のようになる.

$x_2 \geq L_t$ すなわち $A \geq (H_c + 1)^2 f \cdot i_g / 2$ のとき

$$D_H = y_K(L_t) = \sqrt{2A(H_c+1)} \sqrt{f \cdot i_g} - (H_c+1)f \cdot i_g / 2 + y_p(H_p - H_c) - A \quad (11)$$

図7は, これらの関係を $V = 30 \text{ m/min}$ の曲線について示す. 図中, 実線は式(8), (9)および(10)を適用したものであり, A によって影響されない場合の D_H を表わし, 破線は式(11)を適用して求めたもので, A によって影響される場合の D_H を表わす. 図に示すように, 切込み

図7 切込み深さによる最大加工硬化層深さの影響

図8 理論曲線と実験曲線の比較

深さ Δ が決まったとき、それに対応して D_H が切込み深さ Δ に影響される積 $f \cdot i_g$ の限界値が存在し、それより大きい積 $f \cdot i_g$ に対しては破線に沿って変化し、実線よりも小さな値をとる。たとえば図において $\Delta_1 = 0.05 \text{ mm}$ の場合、実線と破線の接点すなわち積 $f \cdot i_g$ の限界値は $(f \cdot i_g)_{\Delta_1}$ であり、その他の加工条件によって定まる積 $f \cdot i_g$ が限界値 $(f \cdot i_g)_{\Delta_1}$ より小さい場合は実線に沿って増加し、 $(f \cdot i_g)_{\Delta_1}$ より大きくなると $\Delta_1 = 0.05 \text{ mm}$ の破線に沿って変化する。同様に $\Delta_2 = 0.1 \text{ mm}$ の場合は $(f \cdot i_g)_{\Delta_2}$ が限界値である。しかし、多刃回転工具による切削加工においては、積 $f \cdot i_g$ は一般に小さく、この限界に至ることはほとんどない。

図8は、一刃あたりの送り f を非常に大きくとることによって、 D_H が Δ によって影響される場合の一例を示すもので、あわせて連続して切削が行なわれる場合の加工硬化層の干渉現象をも実験的に検討したものである。図よりわかるように、理論的加工硬化層創成曲線は、実験曲線との交わり以後では実験的に得られた曲線とよく一致しており、また二つの切れ刃による加工硬化層の干渉現象は、ほとんど存在しない。したがって、模型切削実験によって得られる H_p , H_c および y_p を用いて、過渡的切削における仕上表面下の最大加工硬化層深さを理論的に解析することができる。

4. 過渡的切削における加工硬化層

前節までの解析によって、過渡的切削における最大加工硬化層深さ D_H は、3.4 節に示す場合を除けば、切込み深さ Δ の影響を受けずに、一刃あたりの送り f と切れ刃切込み角 i_g の積 $f \cdot i_g$ によって整理されることがわかった。ここでは、これを実験的に検討する。

4.1 実験方法および実験装置

過渡的切削が連続して行なわれる実験装置として、フライス盤の主軸に一枚刃カッタを取付け、テーブル横送りを利用して切削する。一枚刃カッタを用いた理由は、通常の多刃フライスカッタでは切れ刃自体の偏心や取付

け誤差によって仕上表面にうねりが生じて、本研究の目的とする過渡的切削過程を観察することが困難となるためである。実験に用いたカッタには、3.1 節で述べた模型切削実験と同じ正三角形の超硬チップが取付けてあり、すくい角は -5° 、半径は 62.5 mm である。標準切削実験においては、切削速度は 32 m/min とし、上向き削りを行なう。試験片 ($80 \times 40 \times 3 \text{ mm}$) の材質は S55C であり、 820°C 、1 時間真空焼鈍したものを用いる。また、切削速度の影響を調べるために、速度比 K_V 、切込み深さ Δ を一定に保って、切削速度を 21 m/min から 300 m/min まで変化させて切削実験を行なう。

4.2 標準切削実験条件

切削加工によって得られる結果は、切れ刃と工作物との相互干渉の結果であるから、入力（設定条件）と出力（切削結果）の間の関係を明確にするためには、切れ刃と工作物の相互干渉を特徴づける変数を組織的に変化させなければならない。切れ刃と工作物の相互干渉を特徴づける変数は、明らかに 1 個の切れ刃が工作物と干渉する部分の形状に関係する値であり、それらの値はすでに述べたように、切削速度、切れ刃形状、切込み深さなどと一定の関係を持っている。このために、手軽に変えられる条件を適当に変えただけでは、切削結果を明確に認識することはできない。このような観点から、次の 4 組の実験条件が設定される。

- (1) T シリーズ ($t_{\max}$ が一定)
- (2) L シリーズ (L_t が一定)
- (3) F シリーズ (f が一定)
- (4) C シリーズ (f/L_c が一定)

図9は、各シリーズにおける実験条件と幾何学的切りくず形状の間の関係を示すものである。また図10は、変化させる二つの変数 Δ および K_V のそれぞれのシリーズにおける関係を示すもので、この図よりこれら 4 組の実験条件は、 K_V と Δ の間に存在する代表的な四つの傾

図9 幾何学的切りくず形状と標準切削実験の関係

図10 標準切削実験における切込み深さ Δ と速度比 K_V の関係

図11 標準切削実験における最大加工硬化層深さ

向を含んでいることがわかる。

4.3 実験結果

標準切削実験条件のもとで行なった切削実験における最大加工硬化層深さ D_H に対する、一刃あたりの送り f と切れ刃切込み角 i_g との積 $f \cdot i_g$ の関係を図11に示す。図の各点は、T, L, F, C 各シリーズの実験結果を示すものであり、図より明らかなように、最大加工硬化層深さ D_H は積 $f \cdot i_g$ が等しければ各シリーズとも同じ値を示しており、 D_H は切込み深さ Δ の影響を受けずに積 $f \cdot i_g$ によって整理できることがわかる。また D_H は、積 $f \cdot i_g$ の小さいところでは $f \cdot i_g$ の増加とともに急激に増加した後、積 $f \cdot i_g$ が大きくなるにつれて、ゆるやかに増加してゆくことがわかる。一方、図中の破線は表1の $V=30$ m/min における H_p, H_c, y_p を式(8), (9), (10)に代入して求めた理論値である。図より理論値と実験値は、定性的にも定量的にもよく一致していることがわかる。

図12 切削速度による最大加工硬化層深さの影響

図12は、最大加工硬化層深さ D_H に及ぼす切削速度 V の影響を、速度比 K_V を変数にして示すものである。図において、プロットは切込み深さ Δ を 0.5 mm の一定値に保ち、速度比 $K_V=0.005$ および 0.0008 に対して切削速度を変化させたときの D_H を表す。また、図中の破線は表1に示す H_p, H_c, y_p を用いた場合の理論値である。図よりわかるように、最大加工硬化層深さ D_H は、切削速度の増加とともに減少する。また、理論値と実験値はよく一致している。

5. 結 論

過渡的切削過程においては、切れ刃と工作物との接触始点近傍における現象が表面生成機構に重要な役割を果たし、表面特性値を支配する。このような観点から加工硬化層深さを理論的、実験的に解析した。まず、加工硬化層深さを解明する場合の基本値である加工硬化係数を実験的に求め、それに及ぼす加工条件の影響を検討した。また、加工硬化係数を用いて加工硬化層創成曲線を決定し、最大加工硬化層深さを理論的に解析した。さらに、最大加工硬化層深さを実験的に検討することによって加工条件の影響を明らかにするとともに、理論値ともよく一致することを示した。

参 考 文 献

- 1) 岡村健二郎, 中島利勝: 砥粒切れ刃による切削現象の研究 (第2報), 精密機械, **32**, 8 (1966) 551.
- 2) 岡村健二郎, 中島利勝: 砥粒切れ刃による切削現象の研究 (第6報), 精密機械, **33**, 5 (1967) 312.
- 3) 岡村健二郎, 中島利勝, 平 邦昭, 藤原煌三: 砥粒切れ刃による切削現象の研究 (第4報), 精密機械, **33**, 3 (1967) 161.