切削加工変質層生成過程のシミュレーション解析 (第2報)*

——残留応力分布への影響因子と応力分布制御の可能性——

白樫高洋** 帯川利之** 笹原弘之** 和田武司***

Effect of Tool Condition on Residual Stress Distribution within Machined Sublayer

Takahiro SHIRAKASHI, Toshiyuki OBIKAWA, Hiroyuki SASAHARA and Takeshi WADA

The effect of tool rake angle and friction characteristics of tool face on residual stress distribution within machined sublayer was investigated based on FEM simulation proposed in the previous paper. Within the machined top surface by a sharp edge tool the tensile residual stress in the cutting direction was generated. The tensile stress increased with increase of rake angle and decrease of the friction characteristic. The stress on tool flank face affects on the amount of the residual stress and its distribution. The normal stress on the flank face has a tendency to decrease the tensile stress on machined top surface, while the frictional stress increases the tensile stress. It may be possible to control the amount of residual stress and its distribution by change of tool edge geometry or use of cutting fluid.

Key words: cutting, FEM simulation, machined surface, residual stress

1. ま え が き

機械部品や要素の機能はそれらの幾何学的形状とその精度はもちろん、残留ひずみ、残留応力等の材質的・力学的状態にも左右される。例えば、加工時に表面層に生じた残留塑性ひずみは加工硬化を伴い、内部とは異なった硬さとなる。また残留応力はそれが未知な場合には製品の強度の評価を困難なものとし、表面に生じた大きな引張残留応力は製品の疲労寿命をいちじるしく短縮するとされている¹⁾。さらに高精度が要求される製品、特に薄物の加工にあっては加工後チャックからの解放によって生ずる残留応力の再配分に起因する反り、変形が無視出来ない。これらの諸問題に解答を与えるためには加工により生ずる加工層内のひずみ・応力の分布を定量的に評価する必要がある、さらに必要とあればこの分布を制御しなければならない。著者らは前報において切削加工を対象に温度、ひずみ速度を無視可能な極低速切削という限られた条件ではあるが、切削過程を仕上面の状況まで含めてシミュレートし、残留応力分布、残留ひずみ分布、それらによ

る変形を定量的に予測する方法を提案し、その妥当性を報告した²⁾。

本報告は温度、ひずみ速度の影響を無視し得る極低速切削での限られた条件ではあるが、前報で提案した方法に基づき、まず仕上面残留応力分布に及ぼす切削条件、すなわち、すくい角、工具すくい面摩擦特性の影響を検討する。ついで、製品寿命に最も影響することが想定される加工層内の残留応力分布の制御の可能性について報告する。

2. シミュレーション法の概略

切削過程、仕上面生成過程のシミュレーションは弾塑性FEMにより実施した。図1は2次元切削を想定した本シミュレーションに用いたFEMの初期モデルである。切削後の工作物の変形を明確にするため、被削材厚さ 1.25mm、切削厚さ 0.25mm を想定し、また左側面BCD、底面DEは固定端とした。4節点アイソパラメトリック要素を用い、大変形に起因する幾何学的非線形の導入と非圧縮性の緩和を考慮し、次のような up-dated Lagrange 法による増分形の定式化を行った³⁾。

*原稿受付 平成 5 年 5 月 31 日
**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

Fig. 1 Finite element model

$$\{\dot{F}_N\} = \{[K] + [K_G] + [K_F]\} \{V_N\} \quad (1)$$

ここで $\{\dot{F}_N\}$, $\{V_N\}$ はそれぞれ節点力の変化率と同速度, $[K]$ は微小変形問題の剛性マトリックスにひずみ速度-節点速度関係を修正し, 非圧縮条件を緩和したマトリックス, $[K_G]$ は幾何剛性マトリックス, $[K_F]$ は荷重補正マトリックスである.

本シミュレーションでは図1の工具HFGを剛体とし, 工具を切削開始からFCに沿って移動し, 切削予定面FCに沿って被削材の節点を工具前方で次々と分離する. 節点の分離は前報で提案した次の幾何学的条件を導入した. すなわち

- (1) 節点が刃先から0.005mm以内に到達している,
- (2) 前回分離した切りくず側の節点がすくい面上にある,

が満たされたとき, 節点を分離する. 分離後にはその節点には絶対値が同じで逆向きの力を想定し, 切りくず側の節点がすくい面に到達する過程で順次減少させる.

図2は対象とした被削材(7-3黄銅)の実測した応力-ひずみ関係であり, また縦弾性係数 98GPa, ポアソン比 0.35, 降伏応力 0.26GPa である. 切削速度は 13mm/min とし, ひずみ速度, 温度の影響を無視した.

工具すくい面と切りくず接触面の摩擦の境界条件は次の特性にしたがうのものとした.⁴⁾

$$\frac{\tau_t}{k} = 1 - \exp\left(-\lambda \frac{\sigma_t}{k}\right) \quad (2)$$

ただし, τ_t , σ_t は工具すくい面着眼点での摩擦応力, 垂直応力であり, k はその点における切りくずの降伏せん断応力である. また λ は切削剤を用いない場合は被削材と工具材の組み合わせのみによって定まる摩擦の特性定数であり, 超硬工具P20と7-3黄銅の被削材の組合せでは $\lambda = 1.0$ である.

Fig. 2 Stress-strain relation

3. 残留応力分布に及ぼす切削条件の影響

3.1 工具すくい角の影響

以下に本シミュレーションにより得られた工作物内の残留応力分布を示す.

図3は摩擦特性定数 $\lambda = 1.0$ (実測値) とし, 工作物をチャックより解放後の工具すくい角による工作物内の残留応力分布 ($\bullet - \sigma_x$, $\blacktriangle - \sigma_y$) と残留ひずみ分布 ($\blacksquare - \epsilon$) を添図の位置で計算した結果である. いずれのすくい角においても σ_x ($\bullet$) は表面で引張応力, 内部で一度圧縮応力となり, 裏面でわずかではあるが, 再び引張応力となる. 表面での最大引張応力はわずかではあるが, すくい角の増大とともに増大する. なお深さ方向の応力 ($\blacktriangle - \sigma_y$) はいずれの場合もわずかであり, 全域にわたってほとんど無視可能な程度である. また残留塑性ひずみ ($\blacksquare - \epsilon$) は表面で最大となり, この値はすくい角が大である程小である.

図3における σ_x 分布の変化が, 工作物の加工後の変形の原因となり, 一般にすくい角が大である程変形量は小であることは前報で示した通りである.

3.2 すくい面摩擦特性の影響

切りくず生成状況はよく知られているように工具すくい面の摩擦の状況と密接な関係を有している. またすくい面の摩擦状況は摩擦係数のような単一な量では表現不可能でせん断面の状況を含んだ式(2)で示したような特性式で表され, 模式的に示すと λ の値により図4のようになる. 式(2)に含まれる特性定数 λ は乾切削の場合には工具材と被削材の組合せのみで決定し, すくい角, 切削速度等の切削条件に影響されない. しかし, 切削油剤の使用, 工具材種の変更等により, この定数 λ は変更することが可能である. そこで特性定数 λ の残留応力分布に及ぼす影響を本手法により検討

Fig. 3 Effect of rake angle on residual stress distribution

Fig. 4 Friction characteristic on rake face

 Fig. 5 Effect of friction characteristic λ on chip formation

した。

図5はすくい角 $\alpha = 10^\circ$ を想定し、 λ の変化による相当ひずみ分布、せん断角 ϕ 、平均摩擦角 β および切削主分力および背分力 F_h , F_v を示したものである。同図より明らかなように λ が大なるにしたがって β が大、 ϕ が小、 F_h , F_v が大となることがわかる。また表面のひずみも増大している。

図6は工作物を解放した後の工作物内の残留応力分布(●— σ_x , ▲— σ_y)、残留塑性ひずみ分布(■— ϵ)を示したものである。特性定数 λ が小となるにしたがって表面に生ずる σ_x の最大値は大となり、一方残留

Fig. 6 Effect of friction characteristic on residual stress

ひずみは小となる。この傾向を図3で示したすくい角の影響と比較すると明かなように λ を小さくすると α を大とすることは残留応力、残留ひずみの点においても同一の意味を有することがわかる。

4. 残留応力分布の制御の可能性

図3, 6に見るように、鋭利な工具による低速切削では加工表面に大きなx方向の引張応力が残留する。一方工作物の破壊は一般に引張応力によるものが多く、引張応力が残留していれば外応力との相乗作用により、見かけの破壊応力の低下、すなわち破壊強度低下を招く。また疲労寿命を伸ばすため、熱処理、またはショットピーニング等の付加的加工により引張残留応力を減少、さらには圧縮残留応力を付与する等の努力が払われることもある。これらの後操作が不可能な製品の切削加工に対しては切削厚さを極力少なくし、加工層そのものの厚さを薄くすることによって残留応力の影響を少なくする方法がとられている。そこで引張残留応力が発生しない切削加工法、さらに残留応力分布そのものを制御する指針が得られれば有用であろう。ここでは先に述べたように温度、ひずみ速度の効果を無視した条件の範囲ではあるが、残留応力分布の制御の可能性について検討する。

切削は被削材表面の一部を“引きはがし”ながら、切りくずを生成する過程であり、このため工作物が工具刃先後方で切削方向に引張られるため、仕上面表層に切削方向の引張応力が生ずるものと考えられる。詳

Fig. 7 Additional force on tool flank edge

細は別報にゆずるが、この傾向は温度上昇が生じても基本的に同一である。したがって、この引張応力を減少させるためには、切削中に工具刃先で被削材に圧縮力を加えることが考えられる。そこで図7に示すように工具逃げ面摩耗部に付加的な力 F_{fh} , F_{fv} が作用しながら切削する過程を想定して、残留応力分布に及ぼす付加力の影響を調べた。摩耗幅 0.2mm に応力が均一に作用するものとし、これを節点力として配分した。

図8は逃げ面に垂直応力 F_{fv} のみが作用する場合のせん断角 ϕ 、相当塑性ひずみ分布、切削力 F_h , F_v の計算結果である。同図より明かなように付加力の範囲では逃げ面に付加的垂直応力の作用による切削状況の顕著な変化は認められず、ただ切削背分力のみが

ほぼ付加力分だけ増加しているだけである。

図9は工作物をバイスから解放した後の工作物内の残留応力分布に及ぼす逃げ面垂直応力の影響を示したものである。同図(a)は逃げ面垂直応力が働かない場合、同図(b)は同応力 250MPa が働く場合(●■▲)で図中白ヌキ印で逃げ面力が働かない同図(a)の結果を併記してある。同図より明らかなようにひずみ分布

Fig. 8 Effect of flank normal stress σ_f on chip formation

Fig. 9 Change of residual stress and strain distributions by flank normal stress σ_f

(□■- ε)および σ_y 分布(△▲- σ_y)では逃げ面応力の付加による影響は認められないが、 σ_x 分布(○●- σ_x)については○と●を比較すれば明らかなように垂直応力を付加することにより、表面の引張応力が310MPaから200MPaへとほぼ2/3に減少している。さらに同図(c)の500MPaの付加の場合ではこの表面の σ_x の減少はさらに顕著であり、310MPaから50MPaへと1/6に急減し、 σ_x の最大引張応力は表面から内部に移動している。これらの表面での σ_x の減少に対応してわずかではあるが、内部の圧縮応力もその絶対値が減少している。すなわち逃げ面に垂直応力を作用させることが可能であれば、残留応力 σ_x の分布を変えることが可能である。

図10は逃げ面に作用する摩擦応力の残留応力分布への影響を調べたものである。なお、逃げ面に摩擦応力が作用しても切削状況の顕著な変化はなく、切削力のはほぼ付加力に相当する量変化するのみであった。同図(a)は摩擦応力が働かないで250MPaの垂直応力のみが作用した場合であり、両者とも作用しない場合(図中白ヌキ印)に比して表面の σ_x が減少することは上述の通りである。同図(b)は125MPaの摩擦応力が作用する場合であり、表面の σ_x は310MPaから295MPaへと減少しているもののその割合は同図(a)の場合に比して小となっている。さらに同図(c)の250MPaの摩擦応力が作用する場合には表面の σ_x は逆に付加応力のない場合(○印)より増大する傾向にある。

以上をまとめれば、逃げ面に作用する垂直応力は加工表面の残留 σ_x を減少させる効果があるが、これと

Fig.10 Effect of flank shear stress τ_f on residual stress distribution

は逆に同摩擦応力は σ_x を増大させる効果がある。一般に工具逃げ面が工作物と接触する場合には同面には垂直応力と摩擦応力が同時に作用するが加工表面の残留 σ_x を減少させるためには摩擦応力よりも垂直応力を増大させる方法、例えば工具刃先形状の工夫や潤滑性の良い切削油剤の併用等が有効であろう。

5. ま と め

本報告では、前報で示した工作物が加工層内の残留応力分布をFEMシミュレーションにより計算・予測する方法を用いて、同残留応力に及ぼす影響因子と、残留応力の制御の可能性について検討し、以下の結果を得た。

- (1) すくい角は大なる程、わずかではあるが加工表面の切削方向の引張残留応力が大となる。
- (2) 工具すくい面の摩擦特性値が大なる程、すなわち工具面の平均摩擦係数が小なる程、加工表面の切削方向の引張残留応力は大となり、これはすくい角が大となるのと同一傾向である。
- (3) 工具逃げ面が工作物と接触し、計算の範囲（表面の降伏応力以下の応力）の逃げ面応力が作用しても切削状況の変化はほとんどなく、単に切削力

が変化するのみである。

- (4) 工具逃げ面に作用する垂直応力は加工表面の切削方向の残留応力を減少させる効果があり、逆に同摩擦応力はこれを増大させる効果がある。

これらの結果を総合すれば、機械的原因による残留応力は、切削油剤や工具刃先形状を工夫することにより、かなりの範囲で制御の可能性があらう。なお切削温度、ひずみ速度の影響については次報以後で検討したい。

本研究の一部は平成3年度文部省科学研究補助（一般B03452111）で行われた。

参 考 文 献

- 1) Y. Matsumoto, D. Magda, D. W. Hoepfner and Tae Young Kim: Effect of Machining Process on the Fatigue Strength of Hardened AISI 4340 Steel, ASME, J. Eng. Ind., vol.113, (1991-5)154.
- 2) 白樫高洋, 帯川利之, 笹原弘之: 切削加工変質層生成過程のシミュレーション解析 (第1報), 精密工学会誌, 59, 10 (1993) 1695.
- 3) 帯川利之, 臼井英治: 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 (第1報), 精密工学会誌, 58, 6 (1992) 1092.
- 4) 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) 966.