切削加工変質層生成過程のシミュレーション解析

(第3報)*

—仕上面特性に及ぼす機械的・熱的要因の影響—

笹原 弘之** 帯川 利之** 白 檜 高 洋**

The Analytical Prediction of the Characteristics within Machined Surface Layer (Part 3)

The Thermal and Mechanical Effects on Machined Surface Characteristics —

Hiroyuki SASAHARA, Toshiyuki OBIKAWA and Takahiro SHIRAKASHI

The analytical method for the prediction of the mechanical state of machined surface layer was proposed. The residual stress and strain are caused by both the mechanical and the thermal state of cutting processes. Thus elastic-plastic deformation analysis and thermal analysis of cutting processes were simultaneously carried out using a finite element method. The tensile residual stress in the cutting direction was generated within the numerically machined top surface. At high speed cutting the flow stress of the primary shear zone ahead of the cutting edge increased because of increasing of strain rate. Furthermore the tensile stress parallel to cutting direction generated just behind the cutting tool was further increased by shrinkage of workpiece surface in cooling process. Thus the residual stress at high cutting speed became larger than that at low cutting speed. The curvature of the machined workpiece after unchucked increased with cutting speed, too. The residual stress and the temperature of the finished surface calculated were in good agreement with experimental data.

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

1. ま え が き

切削加工後の仕上面表層には残留応力が生じ、これは製品の幾何学的な寸法精度だけでなく、製品の疲労強度、耐摩耗性にも影響するといわれている。そのため実験的な検討は多くなされてきたが⁽¹⁾ 解析的研究は少なく、垣野ら⁽²⁾の切削温度による残留応力を解析した例以外にほとんど見当たらない。著者らは前報まで⁽³⁾⁽⁴⁾、切削温度の上昇を生じない場合について、切削過程での弾塑性変形、すなわち機械的要因によって切削後に仕上面表層に残留する応力、ひずみ、あるいはそれによって引き起こされる製品の変形等を、有限要素法シミュレーションによって予測する手法を提案し、切削実験により解析手法の妥当性を検証した。また、工具・被削材間の摩擦特性や工具逃げ面に働く力を変化させることにより、仕上面残留応力分布を制御する可能性について示した。

しかし、実際の切削加工は温度上昇を伴う高速で行われ、切削仕上面特性は温度変化による熱的要因の影響も受ける。熱的要因には熱膨張あるいは組織の相変態による体積変化と、流動応力の温度依存性等が挙げられる。工作物の流動応力は、実際には温度、ひずみ、ひずみ速度に対応して変化し、それに応じて変形の間が定まるから、機械的要因と熱的要因は流動応力を軸として相互に関連している。従って変態を生じない材料の場合には、応力、ひずみ、ひずみ速度といった力学的な場と温度場の履歴が仕上面に残留する応力、ひずみを定めることになるため、機械的要因、熱的要因の両者は同時に考慮し議論することが必要である。

本報告では、熱伝導解析と弾塑性解析を有限要素法により行い、温度上昇を伴う切削過程と切削後の冷却過程、さらに工作物をチャックから取り外した後の変形過程までをシミュレートし、仕上面の幾何学的精度と力学的特性に及ぼす切削温度と機械的作用の影響について総合的に検討した。

2. 基礎方程式と切削条件

図1は解析に用いた二次元切削の有限要素モデルであり、4節点アイソパラメトリック要素で構成されている。IHGFが工具、ABCDEFが工作物であり、BCDEを速度固定端とした。切削予定面CF上を工具刃先が通過し、ABCFが切りくずとなる。工作物厚さすなわち同図のY方向の高さは1.25mmと5.25mmの2種類、切削厚さは0.25mmとした。なお、弾塑性解析では工具は剛体として扱った。

弾塑性有限要素法の定式化については別報⁽⁵⁾に詳しいので詳細は省略するが、切りくず生成過程の大変形に対応するよう、変形に起因する幾何学的非線形を導入し、塑性変形時の要素の非圧縮性の緩和を行って up-dated Lagrangean 法により次式のように定式化を行った。

$$\{\dot{F}\} + \{\dot{f}_i\} = ([K_M] + [K_G] + [K_F])\{v\} \quad (1)$$

ここで $\{\dot{F}\}$ と $\{v\}$ は節点力の変化率と節点速度ベクトル、 $[K_M]$ はRiceら⁽⁶⁾の汎関数により非圧縮条件を緩和した剛性マトリクス、 $[K_G]$ は幾何剛性マトリクス、 $[K_F]$ は荷重補正マトリクス、 $\{\dot{f}_i\}$ は熱膨張に起因する等価節点力の変化率である。

熱伝導解析では、有限要素が物質固定なので移流項が省略でき、次の熱伝導方程式

$$\rho c \frac{\partial \theta}{\partial t} = \kappa \left\{ \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} \right\} + \dot{Q} \quad (2)$$

を離散化して解く⁽⁵⁾。ここで ρ, c, κ, t はそれぞれ密度、比熱、熱

Fig. 1 Finite element model

* 原稿受付 平成6年5月20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)

伝導率，時間で， $\dot{Q}$ は塑性仕事と摩擦仕事による発熱量である．式(2)を空間的にはガラーキン法，時間的にクランク-ニコルソン差分を用いて離散化すると⁷⁾次式となる．

$$\left(\frac{1}{2}[K] + \frac{1}{\Delta t}[C]\right)\{\theta(t + \Delta t)\} = \left(-\frac{1}{2}[K] + \frac{1}{\Delta t}[C]\right)\{\theta(t)\} + \{H\} \quad (3)$$

ただし $[K]$ ， $[C]$ は熱伝導マトリクスと熱容量マトリクス， $\{\theta\}$ ， $\{H\}$ は節点温度ベクトルと熱流束ベクトルである．境界条件としては図1の工具-切りくず接触面を除く切りくず・工作物表面は乾切削を想定し，室温20°Cとの熱伝達境界とした．計算に使用した工具と工作物の材料定数を表1に示す．

工作物は7-3黄銅であり，その流動応力 σ はひずみ ε ，ひずみ速度 $\dot{\varepsilon}$ ，温度 θ の関数とした実験式

$$\bar{\sigma} = 691.9 \exp\left(\frac{56.7}{\theta + 273.15}\right) \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{1000}\right)^{0.024} \left\{ \int \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{1000}\right)^{0.06} d\varepsilon + 0.1062 \right\}^{0.5} \quad (\varepsilon \leq 1.0)$$

$$\bar{\sigma} = 691.9 \exp\left(\frac{56.7}{\theta + 273.15}\right) \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{1000}\right)^{0.024} \left\{ \int_0^{1.0} \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{1000}\right)^{0.06} d\varepsilon + 0.1062 \right\}^{0.5} + \frac{\varepsilon}{100} \quad (\varepsilon > 1.0) \quad (4)$$

を用いた．ここで応力，ひずみ速度，温度の単位はそれぞれMPa，s⁻¹，°Cである．

本シミュレーションでは，切削の進行に伴って切削予定面上の節点を次々と分離させる．この節点分離は次の二つの幾何学的な条件が満たされたときに行う⁵⁾．

- (1) 分離予定節点が刃先から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．

分離後はすぐに節点力を開放し自由節点とはせず，図1のFC方向の節点力は切りくず側の節点がすくい面に到達するまでに順次減少させる．

また工具-切りくず接触面は

$$\frac{\tau_t}{\tau_e} = 1 - \exp\left(-\lambda \frac{\sigma_t}{\tau_e}\right) \quad (5)$$

で表される摩擦境界として扱う⁸⁾．ただし σ_t ， τ_t はすくい面上の垂直，摩擦応力， τ_e は着目点の切りくずの降伏せん断応力， λ は摩擦特性定数である．

3. 解析結果と検討

3.1 切削温度，応力，ひずみの分布

図2は切削速度 $V=30\text{m/min}$ および $V=200\text{m/min}$ における切削温度分布で，切削条件は，すくい角 $\alpha=15^\circ$ ，摩擦特性定数 $\lambda=0.7$ ，切削厚さ0.25mm，工作物厚さ1.25mmであり，室温20°Cの工作物を1パスだけ切削して仕上げることを想定している．切削開始からの距離が5mmと短いため，特に工具内の温度分布は定常状態には達していないが，仕上面の最高温度は定常状態と同等な温度に達している．また，温度の分布形状は切削速度30m/minの方が切削時間が6.7倍長いため等温線が下部まで広がっている．この傾向は奥島らの実験結果⁹⁾とも一致する．これを検証するために，工具逃げ面の刃先直後の位置に直径80 μm のコンスタンタン線を露出させ，工作物と熱電対を構成することにより仕上面の温度を測定した．まず，幅3mmの板の表面を切込み0.01mmで数十回切削し，残留応力が無視できるように仕上げた後，切削厚さ0.25mmで1パス二次元切削した時の温度を測定した．図3に仕上面での最高温度 θ_{max} の

Table 1 Material properties

	Work 70%Cu-30%Zn Brass	Tool P20 Carbide
Shear modulus GPa	36.3	-
Bulk modulus GPa	108.9	-
Density kg/m ³	8530	11100
Thermal conductivity Wm ⁻¹ K ⁻¹	121	64
Specific heat JKg ⁻¹ K ⁻¹	396	250+0.29 θ
Heat transfer coefficient Wm ⁻² K ⁻¹	10	10
Thermal expansion coefficient K ⁻¹	19.9×10^{-1}	-

Fig. 2 Temperature distribution in cutting (°C)

Cutting conditions: orthogonal cutting; material cut, 70%Cu-30%Zn brass; undeformed chip thickness, 0.25mm; rake angle, 15°; characteristic constant of friction λ , 0.7; cutting speed, var.

Fig. 3 Maximum temperature on finished surface
Cutting conditions are the same as in fig.2

Fig. 4 Strain distribution
Cutting conditions are the same as in fig.2

計算結果と実測結果を示す。実験値と計算値は良い一致を示していることがわかる。

図4にひずみ分布を示す。仕上面下のひずみ等高線は仕上面に平行に、また切りくず内の等高線もすくい面に平行になっており、切削初期を除き定常的な変形状態になっている。したがっ

Fig. 5 Flow stress (MPa) and stress on rake face
Cutting conditions are the same as in fig.2

て切削距離5mm(切削厚さ×20)に対応するシミュレーションにより、ほぼ定常に近い熱的および力学的な変形の履歴が、切削後の工作物に与えられる。

図5は切削中の流動応力分布と工具面垂直応力 σ_t 、同摩擦応力 τ_t の分布である。まず、工作物内のせん断域の流動応力に着目すると、温度上昇を生じず、ひずみ速度変化の影響がほとんど現れない切削速度13mm/minの同図(a)に比べ、これが無視できない同図(b), (c)では100MPa程度高い値となっている。高速切削ではひずみ速度の増大による流動応力の増大と、温度上昇によるその低下の影響が現れるが、ここでは前者の影響が後者の影響より大きく現れているためである。一方、工具面の応力分布は低速の同図(a)より高速の同図(b), (c)の方がわずかに大であり、同図に示したように工具 切りくず接触長さ ℓ は高速切削ほど短くなっている。その結果、平均せん断角 ϕ は高速切削ほど大となる傾向が現れている。

3.2 残留応力分布とその推移

切削中の工作物内の応力、ひずみと温度の分布を深さ方向に対して示したのが図6である。切削距離5mmにおける工具刃先から1.5mm後方での値を加工表面からの深さに対して示しており、 σ_x は切削方向の垂直応力、 σ_y はそれと垂直な深さ方向の垂直応力である。V=13mm/minの場合に比べ高速切削の場合には、 σ_x が特に増大している。これは図5に示したようにせん断変形域の流動応力がひずみ速度の増大によって上昇したことによるとと思われる。また前述のようにV=30mm/minと200mm/minの温度分布を比べると前者の方が内部まで温度が上昇している。

この状態から切削を停止し、すくい面の節点力を開放した状態(●▲印)と、さらに室温まで冷却した後(○△印)の応力分布を図7に示す。切削停止後には切削による引張り力が作用しなくなるため、 σ_x は図6よりも低下するが、冷却後には切削速度30mm/min、200mm/minの場合とともに σ_x は増大する傾向にあり、特に工作物表面では高切削速度ほどこの傾向が大である。これは冷却時の温度低下に対応した体積の収縮により生じる。また、変態が生じる可能性がある工作物の場合には、変態に大きな影響を及ぼす冷却速度を考慮する必要がある。

Fig. 6 Stress/strain and temperature distribution in cutting
Cutting conditions are the same as in fig.2

Fig. 7 Change of stress distribution of chucked workpiece by cooling

 Fig. 8 σ_x on finished surface

図8はX線応力測定により得た切削仕上面の切削方向垂直応力 σ_x と計算結果を示す。両者ともチャックに固定したままの状態での残留応力である。特性X線は透過力の小さいCrK α 線を使用した。測定には微小部X線応力測定装置を用い、 $\sin^2\psi$ 法¹⁰⁾により応力を求めた。管電圧は30kV、管電流40mA、コリメータの直径は0.5mmとした。同図の実測値の誤差棒は68.3%信頼限界を示す。誤差範囲は無視できないが、これは切削仕上面では結晶粒が切削方向に引き伸ばされ集合組織となっているため回折角と $\sin^2\psi$ の関係が直線にならないこと、応力勾配が急激であることなどが原因として考えられる。しかしながらその中央値は計算結果とよい一致を示している。なお、実験に先立って切削厚さ0.01mmで数十パス予切削した面の残留応力 σ_x は -42.5 ± 26.4 MPaであり、切削後のそれに比べ無視

できる応力レベルであった。

次に工作物底面の固定を外し、チャックから取り出した状態での残留応力(○△印)を図9に示す。残留応力は固定中のもの(●▲)から開放後のもの(○△)へと再配分されて σ_x は表面から内部にかけて引張り、圧縮、再び弱い引張りとなり変化する。工作物は下に凸形に変形する。工作物表面での σ_x は切削速度による大きな変化はないが、固定開放前後の残留応力の変化は高切削速度の場合の方が大となっている。図10は工作物の変形を曲率半径 ρ で示したものである。切削速度30m/min、200m/minでは、13mm/minの場合より約4倍の変形を生じることがわかる。

3.3 工作物厚さの残留応力分布への影響

以上の検討は厚さ1.25mmの薄物を切込み0.25mmで重切削し、切削後の工作物厚さ $T_w=1.0$ mmに仕上げる極端な例であったが、工作物厚さをより厚くし、 $T_w=5.0$ mmとした場合について検討した。切削速度は13mm/minと200m/min、その他の切削条件は前項までと同じである。切削中の応力・ひずみ分布を図11に示す。●▲■印が切削後の工作物の厚さ $T_w=5.0$ mm、○△□印が $T_w=1.0$ mmの場合である。 $T_w=5.0$ mmの方が底面の固定節点の影響を受けにくく、 σ_x は全体としてわずかに小さな値となっているが、両者はほぼ一致した分布となっており、切削状態はほとんど変わらない。

図12は切削後、冷却しチャックから取りはずした後の残留応力分布である。応力の再配分量は小さく、 $V=200$ m/minの場合の表面での σ_x は600MPaに達している。一方、 σ_y は表面

Fig. 9 Comparison of stress distribution between chucked and unchucked workpiece

Fig. 10 Curl radius of unchucked workpiece

(a) V=13mm/min

(b) V=200m/min

Fig. 11 Effect of the thickness of workpiece on stress/strain distribution in cutting

Cutting conditions are the same as in fig.2 except the thickness of finished workpiece is 1.0mm and 5.0mm

直下で圧縮、内部で引張りとなっており、 $V=200\text{m/min}$ の場合には 100MPa 程度の引張り応力が生じている。この時の工作物の変形の曲率半径は $V=13\text{m/min}$ の場合が $\rho=775.9\text{mm}$ 、 $V=200\text{m/min}$ の場合が $\rho=691.4\text{mm}$ であるから、図 10 に示した $T_w=1.0\text{mm}$ の場合に比べれば、工作物の変形はかなり小さいが、要求精度が高い場合や、大きな工作物の場合には変形が無視できない。実用的な薄物の切削においても残留応力による変形は小さくなく、以上のように高速切削時には製品に残留する応力は大きくなることから、加工条件の選定には十分な配慮が必要である。

4. 結 論

- (1) 切削仕上面の幾何精度と力学的特性に及ぼす機械的要因と熱的要因の影響を総合的に評価するため、有限要素法による弾塑性解析と熱伝導解析を連成して切削過程と切削後の冷却過程までをシミュレートすること

(a) V=13mm/min

(b) V=200m/min

Fig. 12 Change of stress distribution by unchucking of workpiece

ができた。

- (2) 本報告で用いた 7-3 黄銅では切削方向と平行な引張り応力が残留するが、高速切削時にはひずみ速度の増大により工作物の変形域の流動応力が增大するため、残留応力も大きくなる。さらに切削時に上昇した温度から冷却される際の熱収縮も、切削方向の引張り残留応力を増大させる原因である。
- (3) 工作物の厚みが増せば、加工後の残留応力による変形量は小さくなるが、その分だけチャックから取り外す際の応力の再配分量が小さいため、残留応力レベルは大となる。

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

引用文献

- 1) 例えば、土井幸滋、川田雄一、児玉昭太郎：旋削による残留応力の分布に関する研究、日本機械学会論文集（第 1 部）、40,334(1974)1563.
- 2) 垣野義昭、奥島啓式：被削材温度分布の残留応力に及ぼす影響の理論的解析（第 2 報）、精密機械、35,12 (1969) 775.
- 3) 白樫高洋、帯川利之、笹原弘之、和田武司：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.
- 4) 白樫高洋、帯川利之、笹原弘之、和田武司：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）、精密工学会誌、59,12(1993)2003.
- 5) 帯川利之、白井英治：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.
- 6) J.R. Rice, R.M. McMeeking, D.M. Parks and E.P. Sorensen: Recent Finite Element Studies in Plasticity and Fracture Mechanics, Comp. Math. Appl. Mech. Eng., 17/18, (1979)411.
- 7) 矢川元基：流れと熱伝導の有限要素法入門、培風館、(1983).
- 8) 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.
- 9) 奥島啓式、垣野義昭：切削中の被削材内部の温度分布について（第 1 報）、精密機械、34, 11 (1968) 726.
- 10) 日本材料学会編：X 線応力測定法、養賢堂、(1981) 146.