切削加工における加工硬化層の生成機構*

(第2報, 加工硬化層の深さに影響する力学的因子の計算モデルによる検討)

引地 力 男^{*1}, 近藤 英 二^{*2}
皮籠石 紀雄^{*2}, 新井 実^{*3}

Generation Mechanism of Work Hardened Surface Layer in Metal Cutting

(2nd Report, Study of Mechanical Factors Acting on Depth of Work Hardened Surface Layer Using Calculation Model)

Rikio HIKIJI^{*4}, Eiji KONDO,
Norio KAWAGOISHI and Minoru ARAI

^{**} Department of Mechanical Engineering, Kagoshima National College of Technology,
1460-1 Shinko, Hayato-cho, Aira-gun, Kagoshima, 899-5193 Japan

Finish machining used to be carried out in grinding, but it is being replaced by cutting with very small undeformed chip thickness. In ultra precision process, the effect of the cutting conditions and the complicated factors on the machined surface integrity is a serious problem. In this research, work hardened surface layer was dealt with as an evaluation of the machined surface integrity and the effect of the mechanical factors on work hardening was investigated experimentally in orthogonal cutting. As a result, it was found that work hardened surface layer was affected not only by the shear angle varied under the cutting conditions and the thrust force of cutting resistance, but also by the thrust force action point, coefficient of thrust force and the compressive stress equivalent to the bulk hardness. Furthermore, these mechanical factors acting on the depth of the work hardened surface layer were investigated with the calculation model.

Key Words: Cutting, Hardness, Work Hardening, Work Hardened Surface Layer, Shear Angle, Thrust Force, Mechanical Factors, Surface Integrity

1. 緒 言

超精密切削加工でみられるように, 切削加工機械の加工精度の向上にともない, 仕上げ加工を切削で行おうとする傾向が強まっている⁽¹⁾。しかしながら, 切削加工により生成される表面の品位, つまり表面粗さと加工変質層は材料の疲労強度などに大きな影響を与える^{(2)~(5)}ため, 加工変質層の生成機構の理解は, 高品位の切削加工を行う上で重要である。

本研究は切削加工における加工変質層を支配する力学的因子を明らかにすることを目的とし, 前報⁽⁶⁾では, 加工変質層の形態の中で, 機械的エネルギーによる塑性変形が原因となって生成される加工硬化層に着目し, セン断

変形領域および切削面下の断面硬さの分布状況より, 切取り厚さで規準化した加工硬化層の深さが材料毎にせん断角と一義的な関係になっていることなどを実験的に示した。一方, 切削面下の加工硬化層の深さに関する理論的な検討は比較的少なく, 奥島ら⁽⁷⁾が刃先力との関係を簡単な計算モデルと実験で, また, 白樫ら⁽⁸⁾がFEMシミュレーションで影響因子を検討している程度である。そこで, ここでは前報⁽⁶⁾にて加工硬化層の深さが材料ごとにせん断角と一義的な関係になったことの原因を示すことを目的とし, 切削面下の応力分布について簡単な理論に基づく計算モデルを提案し, この計算モデルから得られる加工硬化層の深さに影響する直接の力学的因子を示し, 得られた因子とせん断角との関係を調べた。また, その因子とせん断角との関係を使って加工硬化層の深さの計算値を求め, 実験値と比較することにより, 加工硬化層の深さに影響を及ぼす直接の力学的因子を用いた計算モデルの有効性について検討した。

2. 加工硬化層の深さの計算モデル

* 原稿受付 2001年9月27日。

^{*1} 正員, 鹿児島工業高等専門学校機械工学科(☎ 899-5193 鹿児島県始良郡隼人町真孝 1460-1)。

^{*2} 正員, 鹿児島大学工学部(☎ 890-0065 鹿児島市郡元 1-21-40)。

^{*3} 横浜国立大学教育人間科学部(☎ 240-8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台 79-2)。

E-mail: hikiji@kagoshima-ct.ac.jp

Fig.1 Definition of D and D_0

切削抵抗が切削面に作用することによって、切削面下の塑性変形を生じた層が加工硬化層であると仮定すれば、加工硬化層の深さを推定することが可能である。奥島ら⁽⁹⁾は Sokolovskii の平衡くさびの圧縮と曲げの応力式⁽⁹⁾を用いて、材料のデータとして降伏応力と加工硬化指数を代入して刃先力と加工硬化層の深さとの関係を調べた。そこで、ここでは、Sokolovskii の応力式を用いた、加工硬化層の深さの算出法について検討する。

Sokolovskii の応力式において、背分力 F_t が切削面に作用すると仮定した場合、圧縮応力 σ_D との関係は式(1)で与えられる。

$$\sigma_D = \frac{C}{D} F_t \quad \text{.....(1)}$$

ここで、Sokolovskii によれば D は表面から圧縮応力値 σ_D を示すところまでの距離と定義している。なお、 C は、表面に集中荷重が作用したときの内部応力の式における集中荷重の係数で、本研究では集中荷重として背分力 F_t を用いるため、これ以後、 C を背分力の係数と呼ぶことにする。切削加工では、切れ刃が鋭い場合は切削抵抗は切削面上に作用するのではなく、図1のように、切削面から D_0 だけ上方に離れた位置で作用すると仮定すれば、式(1)中の右辺の分母は $(D+D_0)$ で示される。よって、式(2)が得られる。

$$\sigma_D = \frac{C}{D+D_0} F_t \quad \text{.....(2)}$$

切削面下の圧縮応力分布は、切削条件により曲線形状に違いはあるが図1のようになる⁽¹⁰⁾。加工硬化層の深さ D_H は、切削面から母材硬さに到達したところまでの深さなので、図1に示したように、材料が加工硬化しない最大の圧縮応力、すなわち、材料の母材硬さに相当する圧縮応力を σ_e として式(2)に代入すれば式(3)が得られる。

Fig.2 Relationship between stress and hardness

Table 1 Bulk hardness and compressive stress equivalent to bulk hardness

Work materials	60-40Brass	S25C	SUS304
Bulk hardness HV_0	98	113	180
σ_e MPa	140	115	181

$$D_H = C \frac{F_t}{\sigma_e} - D_0 \quad \text{.....(3)}$$

式(3)において、 F_t は計測、 σ_e は材料試験によって求めることができるから、 C および D_0 と切削条件、材料との関係が得られれば、式(3)により加工硬化層の深さ D_H が求まる。そこで、式(2)を変形すれば、

$$\frac{F_t}{\sigma_D} = \frac{1}{C} D + \frac{D_0}{C} \quad \text{.....(4)}$$

となるから、 F_t / σ_D と D との関係から C と D_0 を推定し、切削条件、材料との関係を検討する。しかしながら、切削面下の圧縮応力 σ_D を直接求めることは困難なため、ここでは各材料の応力硬さ線図を用いて切削面下の断面硬さ H_v から圧縮応力 σ_D を求めることにした。

応力硬さ線図はアムスラ万能試験機にて、直径 10 mm、長さ 10 mm の焼なまし短丸棒の試験片を軸方向に圧縮して求めた⁽¹¹⁾。圧縮面にはスピンドル油を塗布し、試験片が負荷中にたるとならないように気を付けた。なお、圧縮速度は、温度の影響を避けるために低速で行い、ひずみ速度でいうと 10^{-3} sec^{-1} 程度である。試験片は 0.05 ずつひずみが増加するたびに圧縮を中止し硬さ測定を行った。スピンドル油の潤滑効果により試験片の圧縮面と中心部との硬さの違いはみられなかったので、硬さの測定は、試験片を規定のひずみになるまで圧縮したのち圧縮面の硬さをマイクロビッカース硬度計(荷重: 0.49N)にて測定した。

Ramaekers ら⁽¹²⁾ は、ポンチによるせん断変形における、硬さと応力の関係を式(5)とした。

$$H_v = C_1 \sigma_D + C_2 \quad \text{.....(5)}$$

ここで、 C_1 と C_2 は定数である。今回の実験においても、図2に示すように、硬さと圧縮応力の関係について式(5)の関係が得られた。したがって、式(5)より、切削面下の硬さ H_v の分布から圧縮応力 σ_c の分布が求まる。

なお、図2において、各材料のデータを外挿すれば、母材硬さに相当するところの圧縮応力 σ_c が求まる。表1に、今回使用した材料の母材硬さ H_{V0} の平均値と母材硬さに相当するところの圧縮応力 σ_c を示す。

前報⁽⁶⁾では、切取り厚さ h で規準化した加工硬化層の深さ D_H/h がせん断角 ϕ と一義的な関係を示した。式(3)から切取り厚さ h で規準化した加工硬化層の深さ D_H/h の計算式(6)が得られる。

$$\frac{D_H}{h} = \frac{C}{\sigma_c} \frac{F_t}{h} - \frac{D_0}{h} \quad \dots\dots\dots(6)$$

以上のことより、加工硬化層の深さの計算モデルの有効性を確認するために、式(6)の各項について、実験により検討する必要がある。

3. 実験方法

2章で述べた計算モデルに関係する力学的因子について必要なデータを得るため、以下のような切削実験を行った。

3・1 切削方式 実験は図3(a)に示すようなホルダに幅3 mm長さ30 mmの被削材を固定し、このホルダを旋盤に取り付け、工具を半径方向に送って乾式の断続二次元切削を行った。通常行われるフライス盤や形削り盤を利用した二次元切削では切削速度に限界があるが、図3(a)に示す切削方式では常用切削速度領域での二次元切削が可能である。切削速度を上げると温度も上昇するが、切削温度を工具・工作物熱電対法⁽¹³⁾で実測した結果、いずれの実験の場合も断続切削のせいもあり、最高温度は再結晶温度より100℃以上も低く、また奥島ら⁽¹⁴⁾の実験式を用いて切削温度を求めた場合でも算出された温度は低く、今回の実験条件の範囲内では温度の影響は無視できるものとした。被削材にはおもに60-40黄銅を使用し、比較のためS25C、SUS304も用いた。これらはあらかじめ焼なまし処理を施してある。工具には超硬K10スローアウェイチップを用いた。切削条件を表2に

示す。なお、表中の各材料における各条件の範囲や基準値が異なるのは、構成刃先の発生や、工具のチッピング、機械の剛性によるびり振動等を防ぐためである。また、山本⁽¹⁵⁾は切削の繰り返し回数が増えると変質層深さも深くなっていくが、ある回数になると一定になることを実験的に示した。今回、切削回数が5回以上で加工硬化層の深さが安定したので、以後の実験では切削回数は10回とした。なお、切削中は圧電素子タイプの動力計にて切削抵抗を測定した。さらに、切りくずの厚さをマイクロメータにてその中央付近の5箇所について測定し、その平均値よりせん断角を算出した。

3・2 加工硬化層の深さの評価方法 加工硬化層の深さは切削が定常状態になった部分（切削開始から10 mmの位置）の試験片をワイヤ放電加工機で切り出し、それを樹脂に埋め込み切削方向に垂直な方向の試験片断面をエメリ研磨紙#600および#1500にて研磨後、さらにバフで研磨面が加工硬化しないようにラッピングし、マイクロビッカース硬度計（荷重：0.49 N）で図3(b)に示すように、切削面から深さ方向に、同一深さ位置で5点ずつ硬さを測定し、その平均値をもって断面硬

Fig.3 Experimental procedure

Table 2 Cutting conditions

Work materials	60-40Brass	S25C	SUS304
Rake angle γ deg.	-30, -10, <u>0</u> , 10, 30	-10, -5, <u>0</u> , 5, 10, 15, 20	-10, -5, <u>0</u> , 5, 10, 15, 20
Clearance angle β deg.	6	6	6
Undeformed chip thickness h mm	0.05, 0.1, <u>0.2</u> , 0.4	0.05, <u>0.1</u> , 0.2	0.05, <u>0.1</u> , 0.2
Cutting speed V m/min	<u>10</u> , 50, 100	50, <u>100</u> , 150	10, <u>50</u> , 100

N.B. Under lines: Standard values.

Fig.4 Effect of cutting resistance on depth of work hardened surface layer

Fig.5 Relationship between ϕ and F_c/h , F_t/h

さ分布曲線を求めた。そして、母材の硬さに到達するところまでを加工硬化層の深さ D_H とした。なお、このときの硬さのばらつきは 5% 以内であった。

4. 実験結果と力学的因子の検討

4・1 切削抵抗 前報⁽⁶⁾では、すくい角 γ 、切削速度 V 、取り厚 h などの切削条件と加工硬化層の深さ D_H との関係について検討し、切削抵抗が増加するような切削条件の場合、加工硬化層の深さも増加した。勇田ら⁽¹⁶⁾は、切削抵抗の背分力が大きくなると切削面下の加工硬化層の深さが増加することを示した。しかし、切削抵抗と加工硬化層の深さとは材料ごとに異なり、また、必ずしも直線的な関係ではない⁽¹⁷⁾。図4は、すくい角 γ 、切削速度 V 、取り厚 h などの切削条件によって変化した主分力 F_c 、背分力 F_t などの切削抵抗が加工硬化層の深さ D_H に及ぼす影響を示す。(a)は60-40黄銅、(b)はS25C、(c)はSUS304であり、材料ごとに加工硬化層の深さの変化の割合が異なる。また、切削抵抗が増加すれば、加工硬化層の深さも大きくなるが、規則性がみられない。

次に、2章で求めた式(6)中の切取り厚 h で規準化した背分力 F_t/h について、切りくずの厚さから算出したせん断角 ϕ を用いて検討した。図5に示すように、せん断角 ϕ と切取り厚 h で規準化した背分力 F_t/h とは、今

Fig.6 Relationship between D and F_t/σ_D

回の切削条件の範囲においては一義的な関係がみられる。また、主分力の場合 F_c/h も同様であった。

4・2 背分力の係数および切削面から背分力の作用点までの距離 図6は F_t/σ_D と D との関係の一例を示す。この図の場合、 D が 0.2 mm 以下の小さい値ではせん断変形領域と考えられ変形ひずみが極端に大きく変化するため線形にならない。圧縮による塑性変形領域は D が 0.2 mm 以上の領域とみなし⁽⁶⁾、グラフの線形部分から、式(4)を用いて材料ごとに各切削条件における C と D_0 を求めた。

Fig.7 Effects of cutting conditions on C , D_0 and shear angle in the case of 60-40Brass

Fig.8 Relationship between $1 / \sin \phi$ and D_0 / h

Fig.10 Relationship between ϕ and D_H / h in work materials

Fig.9 Relationship between ϕ and C

図7は、60-40黄銅の場合の切削条件と C , D_0 およびせん断角 ϕ との関係を示す。図より、以下のことがわかる。

- (1) すくい角 γ , 切削速度 V および切取り厚さ h が変化しても、背分力の係数 C は一定である。
- (2) 切取り厚さ h が増加すると、切削面から背分力の作用点までの距離 D_0 は増大する。
- (3) D_0 は、切取り厚さ h が一定の場合、せん断角 ϕ が減少れば増加する。

なお、S25C, SUS304 についても同様な結果を得た。

図1で示したように、 D_0 は工具すくい面の切りくずとの接触長さに関係すると考えられ、 $h / \sin \phi$ の関数になると推測される⁽¹⁸⁾。そこで、式(6)も考慮し $1 / \sin \phi$ と D_0 / h との関係を調べた。図8は得られた結果で、材料ごとに一義的な関係がみられる。図7, 8の結果より、 D_0 の支配因子は切取り厚さ h とせん断角 ϕ であるといえる。また、背分力の係数 C についてはせん断角 ϕ との関係を調べた。図9は得られた結果で、それぞれの材料ごとに、 ϕ に対して C はほぼ一定値をとる。

4・3 計算モデルの有効性 これらの結果より、加工硬化層の深さに影響を及ぼす直接の支配因子が明らかになった。したがって、式(6)の各項が求まったことになる。 F_t / h および D_0 / h はせん断角の関数として、 C および σ_c は定数として示された。そこで、 F_t / h , D_0 / h , C および σ_c を式(6)に代入して、加工硬化層の深さの計算値を求めた。図10はせん断角 ϕ と切取り厚さで規準化した加工硬化層の深さ D_H / h との関係で、材料ごとに計算値が求まる。こうして、切取り厚さで規準化した加工硬化層の深さ D_H / h はせん断角 ϕ の関数として示された。

図5において、60-40黄銅とS25Cとは、せん断角に

対する切削抵抗がほぼ同じ傾向にあるのにもかかわらず、図10では加工硬化層の深さが異なる理由は、図8、図9で示したように、それぞれ C 、 D_0/h が材料により異なることのほかに、材料の母材硬さに相当するところの圧縮応力 σ_c が、材料ごとに異なることも式(3)により推定される。また、S25CとSUS304とは、背分力の係数の値 C はほぼ同じであるが、図5の結果より、せん断角に対する背分力の大きさが大きく異なるため、加工硬化層の深さに違いを生じたと推定される。

5. 結 言

切取り厚さで規準化した加工硬化層の深さが、材料ごとにせん断角で整理される理由を示すことを目的として、60-40黄銅、S25C、SUS304の二次元の切削実験を行い、以下の結論を得た。

- (1) 切削面下の応力分布について、背分力、背分力の係数、切削面から背分力の作用点までの距離および材料の母材硬さに相当するところの圧縮応力を用いた計算モデルを提案し、この計算モデルでは、これらは加工硬化層の深さに影響する直接の力学的因子であることを示した。
- (2) 切削面から背分力の作用点までの距離、背分力の係数は、加工硬化層の深さに影響を及ぼし、それらは材料ごとに異なるが、背分力の係数はせん断角に対して一定値になり、切取り厚さで規準化した切削面から背分力の作用点までの距離は、せん断角によって整理できる。
- (3) 切取り厚さで規準化した背分力は、本研究で起こった実験条件の範囲内では、材料ごとにせん断角に対して一義的な関係が得られた。
- (4) 今回用いた材料の加工硬化層の深さについて、60-40黄銅とS25Cとはせん断角に対する切削抵抗の大きさはほぼ同じであるが、背分力の作用点の位置、背分力の係数の値、および材料の母材硬さに相当する圧縮応力が異なることに起因して、加工硬化層の深さに違いを生じたと推定される。また、S25CとSUS304とは、せん断角に対する背分力の大きさが大きく異なるため、加工硬化層の深さに違いを生じたと推定される。
- (5) 以上のことから、本研究で提案した計算モデルから導いた切取り厚さで規準化した加工硬化層の深さは、今回の実験条件の範囲内ではせん断角の関数になることが示された。そして、加工硬化層の深さに影響を及ぼす直接の力学的因子を用いた計算モデルの有効性が実験によって確認された。

文 献

- (1) 森脇俊道, 切削加工の軌跡, 精密工学会誌, 65-1(1999), 25-30.
- (2) 原田昭治・西田新一・遠藤達雄・末弘健次郎・福島良博・山口弘幸, 共析鋼の高サイクル回転曲げ疲労(第1報, 疲労強度に及ぼす表面粗さおよび微小表面欠陥の影響), 機論, 53-487, A(1987), 401-407.
- (3) 渡部正気・古市博, 高硬度鋼の疲労強度に及ぼす研削加工の影響(第2報, 疲労き裂生成との関連), 機論, 57-535, C(1991), 1002-1007.
- (4) 西谷弘信・薬師寺輝敏・鹿毛正治, 炭素鋼焼なまし材の回転曲げ疲労強度に及ぼす表面加工層の影響, 機論, 58-553, A(1992), 1575-1580.
- (5) 村上敬宜・堤一也, 藤嶋正博, 疲労強度に及ぼす表面粗さの影響の定量的評価, 機論, 62-597, A(1996), 1124-1131.
- (6) 引地力男・近藤英二・皮籠石紀雄・新井実, 切削加工における加工硬化層の生成機構(第1報, 加工硬化層の生成に関係力学的因子の検討), 機論, 66-647, C(2000), 2423-2428.
- (7) 奥島啓式・垣野義昭, 切削加工面の生成機構に関する研究, 機論第3部, 34-261(1968), 971-978.
- (8) 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)一残留応力分布への影響因子と応力分布制御の可能性一, 精密工学会誌, 59-12(1993), 2003-2008.
- (9) B.B.Sokolovskii (大橋義夫訳), 塑性学, (1959), 264-268, 朝倉書店.
- (10) 米谷茂, 残留応力(5)一切削, 研削加工による残留応力の発生一, 機械の研究, 38-5(1986), 633-639.
- (11) 河本実, 材料試験, (1965), 38-42, 朝倉書店.
- (12) J.A.H.Ramaekers and P.C.Veenstra, The Relation between Effective Deformation and Micro-Hardness in a State of Large Plastic Deformation, *Annals of the CIRP*, 18,(1970), 541-545.
- (13) K.Nakayama, M.C.Shaw and R.C.Brewer, Relationship Between Cutting Forces, Temperatures, Built-up Edge and Surface Finish, *Annals of the CIRP*, 14,(1966), 211-223.
- (14) 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)一測定法と切削表面層の温度分布一, 精密機械, 34-11(1968), 726-730.
- (15) 山本明, 切削加工による金属表面層の研究(第2報)一切削角を変化した場合一, 精密機械, 15-7(1949), 143-147.
- (16) 勇田敏夫・田頭孝介, 二次元切削により生ずる加工変質領域の観察, 精密機械, 39-3(1973), 312-317.
- (17) 山本明, 切削加工による金属表面層の研究(第1報)一切削角を変化せる場合一, 精密機械, 15-5,6(1949), 112-117.
- (18) 中山一雄・上原邦雄, 新版機械加工, (1997), 45, 朝倉書店.