軟質金属切削における塗布効果（第2報）*

一切込みならびに切削速度の影響と塗布効果機構—

金 枝 敏 明** 野 口 浩 二***

Lubricant Applying Effect in Ductile Metal Cutting
-Depth of Cut and Cutting Speed Effects and Mechanism-

Toshiaki KANEEDA and Koji NOGUCHI

The depth of cut and cutting speed effects were examined In order to clarify the precise lubricant applying effect The experimental results indicated that the microvickers hardness distribution in the region to be cut and the cutting speed markedly controlled reduction percentages in the cutting forces. It is concluded that the lubricant applied to the pre-cut surface reduced friction in the lamella structure, which results in easier shear deformation under high normal stress at the shear plane.

Key words: lubricant applying effect, applied materials, depth of cut, cutting speed, work hardened layer, work hardening-capacity, boundary lubrication, pre-cut surface, machinability, pure aluminum

1. 緒 言

前報¹⁾では、レビンダー効果と誤解されやすく、また時には存在すら疑問視される塗布効果について、その発生条件について明らかにした。それによれば、塗布効果の発生を左右する要因には、多くのものがあるが、その中でもその存在が疑問視される最大の要因ともなる、前加工面の加工変質層の状態、より正確に表現するならば、切削予定領域の加工硬化状態が決定的な要因であることをつきとめた。そして、そのメカニズムを検討するため各種塗布剤の影響を調べたところ、境界潤滑特性の高い塗布剤ほど塗布効果が大きく、さらに切りくず観察の詳細な結果とから合わせて考えると、塗布効果は切りくずラメラ部での摩擦低減がせん断面でのせん断変形を容易化することに起因するという考えに至った。

そこで、著者らは塗布効果の機構が上述のメカニズムであることを実証するために、新たに考案したシミュレーションせん断実験を実施した²⁾。その結果、塗布剤の境界潤滑特性や塗布効果での前加工面の変質層の厚さに対応させるため準備した試料の焼なましの有無の影響が、せん断抵抗曲線やせん断破断面の損傷に顕著に現れることを明らかにした。したがって、前報で提唱した塗布効果の機構が、切りくず自由面側のラメラもしくは微小クラック開口面での摩擦低減にあることが示唆されたことになる。しかし、今まで得られた切削実験結果は、すべて同一の切込みの $t_1 = 30 \mu\text{m}$ ならびに同一の切削速度 $V = 5.3 \text{ m/min}$ で得られた結果で、切込みや切削速度を変化させた場合の状況やその場合の機構が、今まで述べてきた塗布効果の機構と矛盾はないのか、さらに、概念的な説明に終わっている塗布効果の機構など、その詳細には未解明な部分がある。

本報では、以上の観点から切込みならびに切削速度の塗布

効果に及ぼす影響を明らかにするとともに、従来の研究結果と本報の実験結果を基に、総括的で詳細な塗布効果の機構を論ずる。

2. 実験装置および方法

2.1 実験装置

実験には、図1に示す低速から通常速度まで幅広く切削速度が設定可能で、工具や被削材が剛性高く保持できるNC精密二次元切削実験装置を用いた。被削材も前報と同一の軟質金属材料の純AlのA1050(1/2硬化材)の厚さ3mmの板材である。工具も被削材である純Alに適する超硬合金K10を用いた。工具幅は5mm

- ① Column ② Z axis slide ③ Y axis feed handle
- ④ Tool holder ⑤ Control panel ⑥ Work
- ⑦ X axis table ⑧ Z axis clamp ⑨ Tool
- ⑩ Base

Fig. 1 NC precision cutting apparatus

* 原稿受付 平成11年5月27日

** 正 会 員 岡山理科大学工学部 (岡山市理大町1-1)

*** 森合精機(株) (明石市二見南二見10-2)

Table 1 Cutting conditions

Work material	Pure Al (1050 H24)	
Tool material	Cemented carbide K10	
Tool geometry	Rake angle α °	0
	Relief angle ϵ °	7
Cutting form	Orthogonal cutting	
Cutting speeds V m/min	5.3, 25.7, 50.0	
Depth of cut t_1 μ m	5, 10, 20, 30, 40, 50	
Depth of cut at last pre-cutting t_1 μ m	10, 20, 30, 40, 50, 70, 100	
Applied materials	Oleic acid	

である。すくい角 α は、塗布効果が現れやすく、かつ切りくずが比較的むしれ形になりにくい $\alpha=0^\circ$ とする。工具の刃先丸味は、塗布効果に大きく影響を及ぼす³⁾ので、ダイヤモンド砥石#200、#270で研削した後、#800で仕上研削をする。こうすれば刃先丸味 $\rho=2\mu\text{m}$ の工具が得られる。切削速度 V は5.3, 25.7, 50.0 m/minの3種類である。切込み t_L は5, 10, 20, 30, 40, 50, 100 μm の6種類である。

塗布剤は、塗布効果が顕著に現れる油性向上剤のオレイン酸1種である。切削抵抗の測定には、高剛性（主分力方向1000N/ μm 、背分力方向300N/ μm ）および高感度で、高い固有振動数（主分力方向17.7kHz、背分力方向9.7kHz）を有する水晶製の圧電型切削動力計を用いる。

表1に切削条件をまとめて示す。

2.2 切削予定領域の加工硬化度制御

塗布効果の発生条件は、前報で示したように被削材の機械的性質（延性、破断ひずみ、加工硬化率等）、工具形状（すくい角）、切削条件（切削速度、切込み）⁴⁾のほか、切削予定領域の加工硬化度が決定的要因となる。しかし、被削材表面には元々製造時ならびに切り出し時に加工変質層が生成される。そこでまず後者の影響を除去するため、極圧油による湿式切削を切込み（以下 t_L と略す） $t_L=50\mu\text{m}$ から $10\mu\text{m}$ まで漸次 $10\mu\text{m}$ ずつ減少させながら、各切込みで十数回切削する。その後 $t_L=10\mu\text{m}$ で軟質金属切削特有の交番現象⁵⁾の存在を十分確認した後、切削抵抗が小となったとき、本実験法での前加工面の最小の加工変質層厚さとなる。そしてその後前加工面の最終前加工を $t_L=10, 20, 30, 50, 60, 70, 100\mu\text{m}$ で実施する。そうすれば図2に示すように前加工面の加工変質層の内部には、最終前加工時の切込みに応じた複雑なマイクロピッカース硬さ分布をとる。前報では、一定の切込みの $t_L=30\mu\text{m}$ でその部分を切削すれば、その分布に応じて切削抵抗減少率 R が、 $R=0\sim 80\%$ 前後まで変動することを明らかにした。概して言えば、加工変質層の厚さを減少させればさせるほど塗布効果が大きくなり、一方厚くなれば、たとえば、 $t_L=100\mu\text{m}$ 以上では全く効果が現れない、すなわち減少率 $R=0\%$ となることを明らかにした。

2.3 切削実験法

切削実験法は前報と全く同一である。最終前加工時の切込み t_L で最終前加工を実施した後、被削材に付着している切削油剤等をアセトンで十分除去し、ドライヤによって乾燥させ、切削実験に移る。板状の被削材の長さは340mmであり、前半の310mmを乾式部とし、後半の30mmを塗布部とした。乾式部が塗布部に比し極端に長いのは、軟質金属切削においては切削抵抗、すなわち切削状態が切削開始から定常状態に至るまで、軟鋼などの他の延性金属よりも切削距離を要

Fig. 2 Microvickers hardness distribution under pre-cut surface¹⁾

するためである。塗布剤を前加工面に汚れ膜程度に塗布する。そうすれば塗布部の表面は、目視でわずかに光沢が鈍くなる程度となる。

3. 実験結果ならびに考察

3.1 塗布効果の機構

前報での実験ならびに考察結果、さらに後述する切込みの影響などの結果を基に作成した塗布効果の機構を述べる。ここでは切削抵抗減少率が、主分力ならびに背分力の両者で70%以上の減少率が得られた $t_L=10\mu\text{m}$ 、切込み $t_L=30\mu\text{m}$ の場合を想定して説明していく。図3に塗布効果の機構を4段階に分けて記述する。なお、切りくず中の大きい方の矢印は、切りくずが図中の左右方向に移動する様を表現している。また、矩形要素を用いてその部分の応力状態を表している。

段階(1)は、乾式部の切削がほぼ終了し、まさに塗布部が切削の変形領域に進入しようとするところである。この段階では、切りくずは強く圧縮された羽根ぼうき状¹⁾を呈している。すなわち最終前加工切込みが $t_L=10\mu\text{m}$ と小さいため、図2に示したように切削予定領域には加工硬化能¹⁾が十分にある。ここで、切りくずならびに切削急停止試料のピッカース硬さ値やその分布を前加工面のそれらと比較すると、結局切削時の変形領域では、加工硬化が十分に行われて切りくずが生成されることになる。したがって前加工面の硬さが全般的に低い $t_L=10\mu\text{m}$ の場合には、加工硬化能が十分にあり、加工硬化が十分になるまで変形する必要がある。また加工硬化の程度が小さい場合、すくい面での摩擦が大きくなる。その結果図3(1)のように変形領域が拡大するとともに掘り起こし作用(Plowing)が生ずる。また切りくず自由面側の根元には盛り上がりが生ずる。変形領域内の盛り上がりが生じた前加工面表面の部分には、変形領域に達してから微小なせん断変形による微小クラックが発生している。これは、疲労における“突き出し”と“入り込み”と同様な作用で発生したもので、これがせん断面に到達す

Fig. 3 Lubricant applying effect mechanism

ると一部ラメラに発達する。加工硬化を十分にしている微小クラック開口面間では摩擦（以後これを従来通りラメラ間の摩擦と表現する）が過大になる。そしてこのような変形状態のため、せん断面には過大な垂直応力が負荷され、せん断応力が大きくなり、切りくずが簡単に流出しない。したがって切削抵抗は過大になる。これらの状況がさらに悪化すれば、むしろ形切りくずになる場合がある。

段階(2)では、塗布部が変形領域に達したためラメラ間の摩擦が、塗布剤の境界潤滑効果ならびにスクイズ膜効果によって急減するとともに、その影響で工具刃先前方での被削材の滞留が大幅に減少する。それに伴って掘り起こし作用も縮小され、スムーズな切りくず生成になり、切削抵抗も急激に低下する。

段階(3)では、ラメラ間の摩擦低減により“圧縮された羽根ぼうき状切りくず”が単なる“羽根ぼうき状切りくず”になる。しかし、この場合でも前加工面の硬さ分布により、基本的には刃先前方での滞留、掘り起こし、盛り上がりが規模は小さいものの生じ、切りくず厚さが少々ではあるが増大し始め、非定常な切りくず生成となる。

段階(4)では、盛り上がりなどが切削の進行に伴い若干増大するがそのまま増大しきれず、ある程度盛り上がると塗布剤の存在のため切りくず自由面側からクラックが大きく進入し、一つのセグメントを生成すると同時に前加工面表面が工具のすくい面の方に入り込む。そして段階(3)に戻り、段階(3)、(4)を繰り返す。

3.2 切込みの影響

図4に切込み t_l を $t_l = 5 \sim 50 \mu\text{m}$ ならびに最終前加工切込み $t_L = 5 \sim 100 \mu\text{m}$ と変化させた場合の主分力 F_T と主分力の減少率 R_T を示す。以下、それぞれを t_l, t_L, F_T, R_T と略す。以下すべての結果は、被削材を純Al、塗布剤をオレイン酸、すくい角 α を $\alpha = 0^\circ$ とした場合である。切削速度 V は、この

場合 $V = 5.3 \text{ m/min}$ である。

まず切削抵抗の切込みによる変化を見ていくと、図中○、△などで表される乾式部の主分力と塗布部のそれとは、 $t_L = 50, 60, 70 \mu\text{m}$ の場合の切込みの小さい部分を除き、値に大きな差が現れるものの基本的には切込みの増加とともに放物線状に増大する傾向が認められる。 $t_L = 50 \mu\text{m}$ の $t_l = 5 \mu\text{m}$ や、 $t_L = 60, 70 \mu\text{m}$ の $t_l = 5, 10 \mu\text{m}$ 、 $t_L = 100 \mu\text{m}$ の $t_l = 5 \sim 30 \mu\text{m}$ では、乾式部でさえ値が小さく、塗布部とほとんど変わらない値になっている。乾式部の値が、塗布部の値とほとんど変わらない小さな値から急に大きくなる切込みは、 $t_L = 50 \mu\text{m}$ では $t_l = 10 \mu\text{m}$ 、 $t_L = 60, 70 \mu\text{m}$ では $t_l = 20 \mu\text{m}$ 、 $t_L = 100 \mu\text{m}$ では $t_l = 40 \mu\text{m}$ となり、 t_L の増加につれ増大する。したがってこれらの傾向を反映して、減少率は図4(b)のようになる。減少率 R_T は、上述の乾式部と塗布部の値が近い条件を除き、 t_l の増加とともに減少する傾向にある。この減少の傾向は、塗布効果の機構が、すでに詳述したようにあくまでも前加工面表面での現象に起因するものであり、切込みが増大すれば切削体積に占める表面の割合が減少することに起因する。

図5は、図4に対応する背分力とその減少率である。図からもわかるように背分力ならびにその減少率とも、主分力の傾向とほぼ一致したものとなっている。

3.3 切削予定領域の硬さ分布の減少率に及ぼす影響

図6は、図2の最終前加工を実施した前加工面の深さ方向のマイクロビッカース硬さ分布の中の代表的なものを示す。前加工面の硬さ分布は図2に示すように、深さ $d = 60 \mu\text{m}$ までは複雑な分布を示す。以後深さを d と略す。これらは、大きく分けて三つに分類される。そこで代表的な以下の三つの条件を取り上げて考察していく。

- (1) $t_L = 10, 20 \mu\text{m}$ では、表面の硬さが $d = 50 \mu\text{m}$ までのいずれの硬さよりも高い。この傾向は、 $t_L = 30, 50 \mu\text{m}$ に

Fig. 4 Depth of cut effects on tangential cutting forces and reduction percentage

Fig. 5 Depth of cut effects on normal cutting forces and reduction percentage

も見受けられるが、 $t_L = 50$ μm の場合、表面から $d = 20$ μm までの硬さはほとんど同じであり、(1)と以下の(2)との中間的な硬さ分布になっている。

- (2) $t_L = 60$ μm では、表面の硬さが加工変質層内部の硬さよりも低くなり始める。最高の硬さは $d = 20 \sim 30$ μm で現れている。 $t_L = 70$ μm も同様の分布を示す。
- (3) $t_L = 100$ μm では、表面の硬さが加工変質層内部のそ

れより低く、最高の硬さが $d = 30 \sim 40$ μm で見受けられる。40 μm 以上の深い領域での硬さは、(1)や(2)よりも高くなっている。

以上の分布形態が、図4ならびに図5に示した乾式部ならびに塗布部の切削抵抗、ひいては切削抵抗減少率の特徴ある傾向を呈する原因となる。そこで各々の場合の塗布効果の機構について考察する。

Fig. 6 Microvickers hardness distribution in pre-cut surfaces

(1)の場合、3.1節で述べた塗布効果の機構がそのまま当てはまる。すなわち、いずれの切込みの条件でも表面の硬さが切削予定線上の硬さより高く、このような条件を基に考察した機構なので、そのまま前節の塗布効果の機構が当てはまる。

次に(2)と(3)では、硬さ分布は上述したように異なるものの、塗布効果の発生やその機構は基本的には同じものとなり、 t_L によって切削抵抗減少率は複雑な変化をする。表面の硬さが、切込み予定線上の硬さとほぼ同じ、もしくは切込み予定線上の硬さより低い場合、切削領域の工具刃先側が切りくずのラ

メラ部になる領域より加工硬化が大きい。切込みが小さい場合、大きい場合よりも工具すくい面上の垂直荷重ならびに摩擦力が小さくなると考えられるため切りくずが流動しやすく、図3で示した刃先滞留層は形成されないと考えられる。その結果掘り起こし作用、盛り上がりが生じなく、それゆえ羽根ぼうき状切りくずは生成されず、乾式部の切削抵抗は過大にならない。したがって塗布効果が現われる余地は少ない。

一方、切込みが大きい場合、小さい場合よりも工具すくい面上の垂直荷重ならびに摩擦力が大きくなると考えられるため、図3で示した刃先滞留層が形成されやすくなると考えられる。その結果掘り起こし作用、盛り上がりが生じ、ついには羽根ぼうき状切りくずとなり、乾式部の切削抵抗は過大になる。そして塗布効果が現れる。

3.4 切削速度の影響

図7に切削主分力ならびに減少率に及ぼす切削速度の影響を示す。なお、 t_L は一定の30 μm である。図からわかるように $t_L \leq 100 \mu m$ では、切削速度の増加とともに乾式部の主分力は小さくなり、一方塗布部のそれは、切削速度による値の差はなく、切削速度による影響はないと言ってよい。また、乾式部に比べれば相対的に値は小さく、 t_L によって変動はあるものの、変化が小さいものになっている。さらに切削速度が高いほど、乾式部と塗布部の主分力が一致する t_L が $100 \rightarrow 70 \rightarrow 50 \mu m$ と小さい値になっていく。

他方、減少率は前報の結果と同様に、塗布部の主分力が t_L の値にかかわらず大きく変動しないので、乾式部の主分力の変化に合わせて変動する。したがって図7(a), (b)からもわかるように両者の変化傾向はよく対応している。

図8に切削背分力ならびに減少率に及ぼす切削速度の影響

(1) Tangential cutting forces

(2) Reduction percentage in F_T Depth of cut $t_L = 30 \mu m$ Fig. 7 Cutting speed effects on tangential cutting forces and reduction percentage in F_T

Fig. 8 Cutting speed effects on normal cutting forces and reduction percentage in F_N

を示す。基本的には主分力の場合と同じ傾向を示す。すなわち、塗布部の背分力は V や t_L が変化しても大きく変動しないのに対し、乾式部の背分力は $t_L \leq 100 \mu\text{m}$ では V や t_L に対応して変化し、それに連動して減少率が変化する。切削速度の上昇による変形領域の狭小化ならびに被削材の軟化、さらにひずみ速度の上昇が被削材の変形挙動を剛完全塑性体化すること、また被削材が十分変形する時間もなく工具が移動し、切削が進むことなどが影響し、これらの傾向になったものと考えられる。

4. 結 論

塗布効果の機構をより詳しく明らかにするため、切込みや切削速度の影響の調査をし、より幅の広い切削条件下で成立する塗布効果の機構を検討した結果、以下のことが明らかとなった。

- (1) 塗布効果発生の条件は、加工硬化能が十分にある切削予定領域の切削で、すくい面摩擦の増大→刃先滞留層の発生→変形領域の拡大→掘り起こし作用の発生→切りくず自由面側の根元の盛り上がり発生→せん断面での微小クラック開口面間での摩擦増大→せん断面上の垂直応力の増大→切りくず流出が困難になる場合であり、塗布効果は、前加工面表面に塗布剤が存在すれば微小クラック開口面間での過大な摩擦が低減されるモデルで説明できる。
- (2) 切込みの影響は、前加工面表面と切削予定線上の硬さの差、ならびに切削予定領域の最高硬さの位置によ

て、3種類に分類されるが、塗布効果の機構は2種類となる。

- (3) 切削速度の影響は、乾式部の切削抵抗に顕著に現れ、切削速度が高いほど塗布効果が現れる最終前加工切込みの範囲が小さくなり、また乾式部の切削抵抗が小さくなるため、切削抵抗減少率が小さくなる。

謝 辞

実験実施時に岡山理科大学工学部機械工学科金枝研究室に在籍し、協力された当時の学部学生餅一樹、桜木要、国岡敏明氏に、ここで深く感謝する。

参 考 文 献

- 1) 金枝敏明, 河坂博文: 軟質金属切削における塗布効果 (第1報) - 発生条件と塗布剤の境界潤滑特性の影響, 精密工学会誌, **61**, 5 (1995) 702.
- 2) 金枝敏明, 中村達哉: 塗布効果に関する研究 (第5報) - 特殊せん断実験による塗布効果の機構解明, 1992年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (1992) 557.
- 3) 榊田勝実, 渡部善次郎, 益子正己: 被削材表面環境の切削現象に及ぼす影響 (第1報) - 銅の切削における切削力, 切削比, 仕上げ面粗さについて, 日本機械学会論文集 (第3部), **38**, 316 (1972) 3246.
- 4) 金枝敏明, 中村達哉: 切削の塗布効果に関する研究 (第6報) - 前加工面の硬度分布再検討による機構解明, 1993年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, (1993) 706.
- 5) 財満敏雄, 岡崎忠雄: アルミニウム合金の切削過渡特性について, 日本機械学会論文集 (第3部), **33**, 248 (1967) 641.
- 6) 大島郁也, 石渡秋二, 鈴木正光: 切削油剤のレピンダー効果について, 茨城大学工学部研究集報, **23** (1975) 17.