振動切削過程における振動と加工雰囲気の影響*

(50 Hz 振動切削の場合)

笹原 弘之^{*1}, 金 桂 紅^{*2}
神 雅彦^{*3}, 村川 正夫^{*3}

Effect of Vibration and Atmosphere in Vibration Cutting Process (On 50 Hz Vibration Cutting)

Hiroyuki SASAHARA^{*4}, Guihong JIN,
Masahiko JIN and Masao MURAKAWA

^{*4} Department of Mechanical Systems Engineering, Tokyo University of Agriculture and Technology,
2-24-16 Nakacho, Koganei-shi, Tokyo, 184-8588 Japan

The effects of cutting atmosphere and the repetition of intermittent contact-uncontact of tool-chip interface on cutting force and chip formation were examined on the case of 50 Hz vibration cutting. To confirm which matter in the air degrades the friction between the rake face of tool and the chip, some vibration cutting have been conducted under the atmosphere with inert nitrogen gas and the air. The resultant data shows that under nitrogen atmosphere, decrease of the friction was observed only the case on the vibration cutting in the air. On the other hand, there were no change on the conventional cutting and the vibration cutting in the nitrogen gas. This means some lubricative layer is made in the intermittent contact and uncontact between tool and the chip. Chip formation process in vibration cutting was also analyzed by Finite Element Method. In the intermittent situation in vibration cutting, loading and unloading are repeated. But no significant difference in chip formation can be observed, the change of frictional state has larger effect to chip forming process.

Key Words: Vibration Cutting, Cutting Force, Chip Formation, Cutting Atmosphere, Lubrication, Finite Element Method

1. 緒 言

超音波振動切削は高硬度材や硬い材料⁽¹⁾,あるいは超精密切削の対象となる軟質金属⁽²⁾や複合材料⁽³⁾などの切削に適用され,その有効性が多く報告されている⁽⁴⁾.超音波振動により断続的な切削となる場合には,工作機械構造あるいは被削材の固有振動数が,超音波振動のそれと比べればかなり低い⁽⁵⁾ため,断続的な切削力をほぼ時間平均した力として作用する⁽⁶⁾と考えられ⁽⁵⁾,加工精度の向上,低剛性の工具⁽⁷⁾や工作物⁽⁸⁾の加工を可能としていると考えられる。

一方,超音波振動切削においては,振動なしの通常切削(以下,慣用切削と呼ぶ)に比べ,せん断角が増大し薄い切りくずが生成する⁽⁹⁾場合があることが報告されている⁽²⁾が,その原因の一つとして,断続的に工具面と切りくずが離れる際に空気中の物質がすくい面に吸着するなどして摩擦を低下させている可能性が考えら

れる⁽⁶⁾.楕円振動切削の原理⁽⁹⁾では,切りくずを工具が上方に引き上げる効果があり,見かけの摩擦成分を低減することが明快であるが,振動方向が1方向である場合は何らかの別な効果が生じていると考えられる.摩擦の低減以外の効果として,超音波の作用による材料の変形特性自体が変化する可能性⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾は古くから議論があるが,詳細なメカニズムは明らかではない。

切削の切りくず生成過程では,被削材のひずみ,ひずみ速度,温度などに関連する変形特性と,すくい面の摩擦特性との両者により変形場が定まる.まず,本報告では,すくい面摩擦の影響を議論するため,振動切削の振動数は50Hzとし,超音波振動の作用による被削材の変形特性の変化は考慮の対象から排除する.これにより,十分な時間分解能をもって断続的な切削力変動を正確に捉えることも可能となる.その際,本報告では大気中および窒素ガス雰囲気中で振動切削実験を行い,すくい面摩擦状態の変化について検討した.また,弾塑性有限要素法による振動切削のシミュレーションを併せて行い,振動と摩擦の影響について解析的に検討したので報告する。

* 原稿受付 2003年8月29日.

^{*1} 正員, 東京農工大学工学部 (〒184-8588 小金井市中町2-24-16).

^{*2} 東京農工大学大学院工学研究科 [現:丸真精機(株)] (〒472-0017 知立市新林町小深田3-1).

^{*3} 正員, 日本工業大学 (〒345-8501 埼玉県南埼玉郡宮代町学園台4-1).

E-mail: sasahara@cc.tuat.ac.jp

Fig. 1 Experimental setup for 50Hz vibration cutting

Table 1 Cutting conditions

Tool material	M40 Carbide
Rake angle	20°
Clearance angle	5°
Frequency Hz	50
Amplitude mm	0.21
Work piece material	70%Cu-30%Zn Brass
Length of work piece mm	47
Feed speed mm/min	3000, 300, 120, 60, 30
Depth of cut mm	0.1
Width of cut mm	3.0
Cutting fluid	Dry

2. 工具-切りくず間の断続的接触・分離の影響

図1に示す実験装置により振動周波数50Hzでの振動切削を行った。同装置では、まずモーターの回転運動はタイミングベルトを介して偏心軸の入力側に伝わる。出力側は入力側の回転中心から偏心量4(mm)の円を描きながら回転運動をする。出力側の偏心運動は梁を通してスライドテーブルに伝わり、切削方向と平行な直線運動となる。スライドテーブルのベースはマシンギンセンタのベッドに固定し、主軸頭に圧電型動力計を介して被削材を取り付ける。工具はスライドテーブル上に固定し、テーブル送りにより切削速度を与えて板状被削材端面の二次元切削を行う。

切削条件を表1に示すが、振動の振幅、振動数は一定とし、テーブルの送り速度 V_f を変化させることにより、振動切削時の実切削時間/振動周期の割合および工具-切りくずの離脱距離を変化させた。送り速度 V_f の低下とともに、工具すくい面と切りくず間の離脱距離が大となり、工具と切りくずが離れている時間も長くなる。当然ながら、送り速度 V_f は最大振動速度 $2\pi Af$ よりも小さく設定する。

図2は送り速度 V_f を変化させた場合の切削主分力について、振動切削と慣用切削を比較したものであり、両者の切削開始時刻を一致させて示している。また、同図右側は時間スケールを拡大したものであり、切削力は十分な時間分解能で測定されている。

振動切削ではパルス状の切削力波形となっており、送り速度が300mm/min程度では振動切削での上限値

Fig. 2 Comparison of cutting forces

と慣用切削の切削力とはほぼ一致している。送り速度が低くなるに従い、振動切削における切削力の上限值は低下し、送り速度30mm/minでは慣用切削の場合に比べ75%程度に低下していることがわかる。

その際の、切りくず形状の変化を図3に、切りくず厚さの測定値を図4に示す。送り速度は最大でも3000mm/minと低速であり、切削温度の上昇は少ない。そのため、設定した送り速度域では温度的な影響は小さく、慣用切削で生成した切りくずには、送り速度が変化しても大きな変化はない。一方、振動切削では、送り速度が低下すると切りくずカール半径が小さくなっていくことがわかる。図4の切りくず厚さと同様な傾向が、切りくず厚さの変化にも見られる。慣用切削では送り速度が小さくなるにつれて切りくずは厚くなる傾向があるのに対し、振動切削では切りくずが薄くなっていく。

切削力が低下し、切りくずが薄くなるという変化が、慣用切削で見られる場合には、工具-切りくず間の摩

Fig.3 Comparison of chip shape experimentally obtained

Fig.4 Effect of feed speed on chip thickness

擦の低下が第一に理由として考えられる。上述の振動切削の場合にも、送り速度が低下し、振動1周期中の工具と切りくずが離れている距離と時間が大きくなり、切削距離が短くなるほどその傾向が大きくなることから、工具-切りくず界面に空気中の何らかの物質による潤滑層が作られている可能性が考えられる。しかし、一方で、振動切削では断続的な変形となることが、切りくず生成状態を変化させている可能性もある。次章以降でこれらの点についてさらに検討する。

3. 加工雰囲気による影響

上記のように、空気中での振動切削では切削力が慣用切削より小さくなり、切りくずも慣用切削より薄くなる結果が得られたことに対し、切削雰囲気を不活性ガスである窒素ガス雰囲気として振動切削実験を行い、加工雰囲気によるすくい面摩擦状態や切削力への影響を調べた。図5に示すように、切削部分をビニールケー

Fig.5 Cutting experiment in nitrogen gas atmosphere

(a) 70%Cu-30%Zn brass

(b) S45C steel

Fig.6 Effect of cutting atmosphere on cutting force

Fig.7 Comparison of frictional coefficient

スで覆い、この中の大気を窒素ガスで置換し、さらに毎分1Lで窒素ガスを供給し続けながら切削を行った。ビニールケースの容量は約20Lであり、窒素ガスを供給するパイプは工具に近づけて設置した。被削材として7-3黄銅と炭素鋼S45Cを用いた。基本的な切削条件は表1と同じであるが、送り速度 V_f は7-3黄銅の場合は30mm/min、一方、炭素鋼S45Cの場合は V_f を3000mm/minとした。

図6に7-3黄銅と炭素鋼S45Cを、空気中および窒素ガス雰囲気中で振動切削した際の切削力の測定結果を示す。いずれの被削材においても、慣用切削の

Fig.8 Effect of vibration and cutting atmosphere on shear angle

場合には空気中でも窒素ガス雰囲気中でも切削力には差は見られない。一方、振動切削の切削力の上限値は、空気中では慣用切削のそれよりも小さくなっているのに対し、窒素ガス雰囲気中では減少が見られず慣用切削のそれとほぼ一致していることがわかる。

図7には、測定値を元に、各時刻における工具面の摩擦分力を垂直分力で除した摩擦係数の変化を示す。被削材は7-3黄銅である。窒素ガス雰囲気中では、振動切削時の摩擦係数は慣用切削の摩擦係数にまで達するが、空気中ではその90%程度までしか上昇しない。窒素ガス雰囲気中では、振動切削により工具-切りくず間に間隙が断続的に生じても、潤滑的な効果は生じていないことが推測される。

このようなすくい面の摩擦状態の変化に対して、切りくず生成状態も変化し、せん断角が変化する。図8に示すように、空気中では明らかに慣用切削より振動切削のせん断角が大きくなるが、窒素ガス雰囲気中では両者にほとんど差は生じないことがわかる。また、7-3黄銅では、両雰囲気中での慣用切削のせん断角は同程度であるが、S45Cの慣用切削の場合では、空気中と窒素ガス雰囲気中でせん断角に差が生じていることから、被削材の材質によっても雰囲気の影響度が異なることが推測される。

以上のように、空気中と窒素ガス雰囲気中での振動切削を比較することにより、切削力低減とせん断角増大の原因の一つに加工雰囲気の影響が存在することを示した。空気中で潤滑作用が生じる原因としては、酸素または水分の吸着層が生じていると考えるのが妥当であると思われる。ただし、以上は50Hzの振動切削における結果であり、数十kHzの超音波振動切削の場合に以上の議論がどこまで適用できるかは検討の余地があると思われる。工具-切りくずの離れている時間も、離れる距離もかなり小さくなるためである。

4. 振動切削のFEMシミュレーション

慣用切削は連続的に変形が生じ切りくずが生成す

Fig.9 Modeling of vibration cutting process

る定常的な過程であるが、振動切削では断続的に切削が行われ、変形域では負荷と除荷が繰り返されつつ切りくずが生成する。また、既述のように慣用切削と振動切削ではすくい面の摩擦状態が異なることが示された。これらは振動切削に特有の切削状態である。そこでここでは、すくい面の摩擦の変化と振動による断続切削の影響について弾塑性有限要素法解析を行い検討した。

4.1 解析モデル 図9(a)に示すような工具が切削方向に振動する振動切削をシミュレーションする。切削シミュレーションは二次元平面ひずみ状態を仮定し、弾塑性有限要素法により行った。上述の実験装置では、工具に $V_f < 2\pi A f$ となるような振幅 A [mm]、周波数 f [Hz]の振動を与え、被削材に送り速度 V_f [mm/sec]を与えて切削しているが、本シミュレーションでは被削材の端面BDEを固定し、次式により剛体工具に振動と送り速度を与えた。

$$V = V_f + 2\pi A f \sin(2\pi f t) \quad (1)$$

弾塑性解析においては切りくず生成過程の大変形に対応するよう有限要素の変形に起因する幾何学的非線形を導入し、塑性変形時の要素における非圧縮性の拘束の緩和を行った。また、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て切りくずを発生させている⁽¹²⁾。この節点分離は次の二つの幾何学的条件が満たされたときに起こることとした。

- 1) 分離予定節点の刃先からの距離が切削厚さの1/50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。

また、被削材は7-3黄銅を想定しており、その流動応力特性は慣用切削の解析で実績のある次式⁽¹²⁾を使用した。

$$\bar{\sigma} = a \exp\left(\frac{56.7}{\theta}\right) \left(\frac{\dot{\epsilon}}{1000}\right)^{0.024} \left\{ \int_0^{\dot{\epsilon}} \left(\frac{\dot{\epsilon}}{1000}\right)^{0.06} d\epsilon + 0.1062 \right\}^n \quad (\epsilon \leq 1.0)$$

$$\bar{\sigma} = a \exp\left(\frac{56.7}{\theta}\right) \left(\frac{\dot{\epsilon}}{1000}\right)^{0.024} \left\{ \int_0^1 \left(\frac{\dot{\epsilon}}{1000}\right)^{0.06} d\epsilon + 0.1062 \right\}^n + \frac{\epsilon - 1.0}{100} \quad (\epsilon > 1.0) \quad (2)$$

ここで θ は温度(℃), $\dot{\epsilon}$ はひずみ速度(s⁻¹)であり, 定数 $a=691.9$, $n=0.5$ とした. 弾性定数はヤング率 98.01MPa, ポアソン比 0.35 である.

工具すくい面と切りくずの接触面は,

$$\tau_t / \tau_e = 1 - \exp(\lambda \sigma_t / \tau_e) \quad (3)$$

で示される摩擦境界として扱う⁽¹³⁾. σ_t , τ_t はすくい面上の垂直応力と摩擦応力, τ_e は着目点の切りくずのせん断流動応力である. 摩擦特性定数 λ は 0.5, 0.3, 0.1 と相対的に変化させて潤滑状態の変化を模擬した. また, 工具すくい面-切りくず間の接触状態の判定と境界条件の変更は次のようにした.

- 1) 切りくず表面の節点とすくい面との距離が, 切削厚さの 1/100 以下になったら, すくい面に接したと判定し, 上式(3)を満たすすくい面上の摩擦境界節点とする.
- 2) すくい面に接触している摩擦境界節点は, すくい面垂直応力が圧縮でなくなったときすくい面から離脱したと判定し, 自由境界節点とする.

切削条件は, 基本的には前述の実験条件と同じであり, すくい角 20°, 振動周波数 50Hz, 振動振幅 0.21mm, 送り速度 $V_f=3000$ mm/min, 切削厚さ 0.25mm, 切削幅は 1.0mm である.

4・2 解析結果と考察 図 10(a)に慣用切削のシミュレーション結果, 同図(b)に同じ摩擦状態とした振動切削のシミュレーション結果をそれぞれ示す. また, 図 11 に対応するひずみ分布を示す. 切りくずの厚さは一定となり, 切りくず内のひずみはすくい面に平行となっており, 定常状態となっている. しかしながら, 振動の有無により, 有限要素の変形状態にもひずみの状態にも有意な差が生じていない事がわかる.

図 12 に切削初期から定常的な切削状態までの切削力の時間変化を示す. 振動切削では切りくず-工具間が離れるため, 断続的に切削力は 0 にまで低下している. 細かい切削力の上下変動は工具刃先での節点分離に伴う変動であり, 上側包絡線について着目すればよい.

切りくず生成が定常的な状態に達した後, 振動切削の切削力の上限値は慣用切削と同程度であることがわかる. つまり, 振動毎に切削力が 0 にまで低下するような条件下で, 振動により変形の進行と除荷による変形の中断を繰り返すような過渡変形の繰り返しが

(a) Conventional cutting

(b) Vibration cutting

Fig.10 Comparison of deformation ($\lambda = 0.5$)

(a) Conventional cutting (b) Vibration cutting

Fig.11 Strain distribution ($\lambda = 0.5$)

(a) Conventional cutting (b) Vibration cutting

Fig.12 Comparison of simulated cutting forces ($\lambda = 0.5$)

あっても, ほとんど切りくず生成には影響がない. この結果は既述の実験結果とも一致する.

実験においては, 空気中の切削ではすくい面の摩擦が低下する結果が得られているので, それに対応させて摩擦特性定数 λ をより小さく設定した場合のシミュレーション結果を図 13 から 15 に示す. 摩擦特性定数 λ を 0.3, 0.1 と相対的に小さく設定することにより, せん断角は大きくなり, 薄い切りくずが生成し, 切りくず内および仕上げ面層のひずみは小さくなっている. 同様に切削力も小さくなることがわかる. また, 切りくずカールの曲率半径も, 摩擦が低下するほど小さくなっており, 図 3 に示した実験結果と一致する.

以上より, 振動切削過程において工具すくい面と切りくず間の摩擦は影響が大きいことがわかった. 特に, 50Hz 程度の振動切削では, 断続的な切削とな

Fig.13 Effect of frictional characteristic on chip formation

Fig.14 Effect of frictional characteristic on strain distribution

Fig.15 Effect of frictional characteristic on cutting forces

る過渡変形の繰り返しによる、切りくず生成過程や工具－切りくず間に作用する切削力への直接的影響はほとんどなく、それよりも、振動時に工具－切りくず間に加工雰囲気が入ることによる摩擦の低減の方が、切りくず生成にも切削力にも明かな効果として現れることが示された。慣用切削と同様に、振動切削においてもすくい面摩擦の低下がせん断角を大きくし、切削力を低下させると言える。一方、振動数が超音波域まで高い場合についても同様な効果があるものと考えられるが、超音波の作用による材料変形特性自体の変化や、動的な応答あるいはそれ以外の振動切削を特徴づける効果の存在、およびそれらの効果が振動切削の優位性に寄与する割合については更に検討していく予定である。

5. 結 論

振動方向が切削方向である振動切削において、工具－切りくずの断続的な接触・離脱の影響およびすくい面摩擦状態の影響を明らかにするため、50Hzの振動切削実験とFEMシミュレーションを行った。以下に得られた結果を示す。

(1) 振動切削では、送り速度と最大振動速度の比が小

さくなり、工具－切りくずの離脱距離、時間が大きくなると、切削力の最大値は低減し、切りくず厚さは薄くなる。

(2) 窒素ガス雰囲気中、および空気中での振動切削、慣用切削を比較し、空気中での振動切削では摩擦の低下が生じることを示した。

(3) 工具－切りくず間が断続的に接触と離脱を繰り返す振動切削状態を、有限要素法によりシミュレーションした結果、すくい面の摩擦条件が同一である場合、生成する切りくずの状態や振動切削時の切削力の上限値は、慣用切削の場合とほとんど変わらないことを示した。

(4) この結果は実験結果の傾向と一致し、断続的な工具すくい面の接触・離脱および断続的な変形の進行によっては切りくず生成状態には巨視的な変化は表れないこと、工具すくい面の摩擦状態の変化が空気中での振動切削で切削力が低減する有力な原因であることを示した。

文 献

- (1) X. Wang, M. Zhou, J. G.-K. Gan and B. Ngoi: Theoretical and Experimental Studies of Ultraprecision Machining of Brittle Materials with Ultrasonic Vibration, *Int. J. Advanced Manuf. Tech.*, 20 (2002) 99.
- (2) J. Schumutz, E. Brinksmeier, E. Bishoff: Sub-surface Deformation in Vibration Cutting of Copper, *Precision Engineering*, 25 (2001) 218.
- (3) 米澤貴篤, 稲崎一郎: 超音波振動を付与した複合材料の切削加工, *日本機械学会誌(C編)*, 69-682(2003) 1707.
- (4) T. B. Thoe, D. K. Aspinwall, M. L. H. Wise: Review on Ultrasonic Machining, *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, 38, 4 (1998) 239.
- (5) 隈部淳一郎: 精密加工 振動切削・基礎と応用, 実教出版 (1979) 61.
- (6) 鬼鞍宏猷, 大西修: 超音波振動小径穴加工における切削機構, *精密工学会誌*, 64, 11 (1998) 1633.
- (7) M. Jin, T. Kohinata, M. Murakawa: Study on Fabrication of Microrods by Cutting Process, *Proc. IMECE'02*, (CD-ROM)
- (8) 例えば, 笹原弘之, 金桂紅, 神雅彦, 村川正夫: 振動切削のFEMシミュレーション, 2002年度精密工学会春季大会学術講演論文集, (2002) 297.
- (9) 社本英二, 森本洋之, 森脇俊道: 楕円振動切削加工法(第1報)・加工原理と基本特性, *精密工学会誌*, 62, 8 (1996) 1127.
- (10) F. Blaha and B. Langenecker: Deformation von Zink-Kristallen unter Ultraschalleinwirkung, *Die Naturwissenschaften*, 20 (1955) 556.
- (11) 山本昌孝: 超音波が金属の塑性挙動におよぼす効果, 塑性と加工, 11, 11 (1970) 239.
- (12) 笹原弘之, 帯川利之, 白樫高洋: 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), *精密工学会誌*, 60, 12 (1994) 1801.
- (13) 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.