超音波スクリー振動による加工法の研究

(第4報)*

——超音波振動によるねじ立ての機構——

鈴木 康夫** 加 茂 進** 宇 野 正 美***

Study on Machining by the Use of Ultrasonic Screw Vibration (4th Report)

—Mechanism of Ultrasonic Vibration Tapping—

Yasuo SUZUKI, Susumu KAMO and Masami UNO

Mechanism of ultrasonic vibration tapping and its experimental results were reported in this paper. Mechanism of ultrasonic vibration tapping is similar to that of Piispanen's card model, the experimental result agree with the theoretical one. For the difficult machining pure aluminium (A 1050), cutting torque, cutting ratio, shear angle, deformed layer etc. were investigated using the quickstop device for tapping. The following results were obtained. In vibration tapping, tapping torque was nearly equal to frictional torque when tap was screwed into female screw, the value was about 0.05 Nm. Cutting ratio and shear angle in vibration tapping with kerosene were about three times of those of conventional tapping. Deformed layer of female screw was not recognized in vibration tapping.

Key words ultrasonic screw vibration, tapping mechanism, cutting torque, female screw, cutting ratio, shear angle, deformed layer

1. 緒 言

純アルミニウムのように軟らかい材料をねじ立てする場合、ねじの表面に加工ひずみが発生したり、ねじ山が変形したり、ねじ山にばりが生じるなど精密なねじ立てをすることが難しい。この種の材料はねじ立て時の切削トルクをできるだけ下げることによって変形を防止し、材料を見掛け上硬くして、切削しやすいようにして加工しなければならない。これは、例えば超音波振動によるパルス的な切削力を工具に作用させることで可能となる¹⁾。振動切削では瞬間的に切削を行うため、せん断変形によるせん断面の間隔が縮まり、切削トルクが大幅に減少することになる。一方、セラミックのような硬い材料は材料と工具を個々に振動させることによって、クラックが工具刃先前方に規則的に小刻みに発生して、セラミックを見掛け上軟らかくして切削できるようになる²⁾³⁾。

本報では、超音波振動ねじ立てを実施して、そのね

じ立て特性について検討を行い、さらにねじ立てを急停止して、振動ねじ立て時の切削特性、すなわちせん断角、切削比、ねじ面の加工変質層などを慣用ねじ立てと比較した。

2. 実験方法

タップの切削方向であるリード角方向に一致するような超音波スクリー振動を得るために、振動子はホーン大端の水平面に対して 3.4° (図1において $\phi = 86.6^\circ$) 傾斜した方向に接着した。磁歪振動子の振動数は24.3 kHzで、ホーン細端部分15 mmを切り取り、代わりに長さ15 mmのタップをろう付けした。

ねじ立て時の切削状態を観察するには切削を急停止して断面を観察する必要がある。その方法はあらかじめ2分割した試料を用いた。すなわち、2枚の試料をフライス仕上し、その仕上面をしっかりと接触させてねじで固定し、合わせ面の位置に下穴加工を行い、その試料を実験装置に取り付けてねじ立てを行った。切削の急停止は回転数が毎分4回転と極めて遅いので、単にモータのスイッチを切る方法によった。試料が停止するまでに試料は約 20° 、切削距離にして約1 mm移動するから、必ずしも切削を急停止したことにはな

* 原稿受付 平成2年10月4日。1990年度精密工学会北陸信越地方講演会(平成2年6月1日)にて発表

** 正 会 員 静岡大学工学部(浜松市城北3-5-1)

*** 大同工業大学(名古屋市南区大同町2-21)

Fig. 1 Experimental apparatus

Fig. 2 Cutting model

らないが、切りくず厚さにもほとんど変化がなかったことと、工具は停止するまで振動しているの、切削中の状態を再現していると考えてよい。こうして得られた試料をタップから取り外し、樹脂に埋め込んで観察に供した。

3. 振動切削の機構

切削機構を論ずる場合、一般にせん断面に厚みのない理想的な単一せん断面として取り扱うことが多いが、実際にはある厚みを持つ領域をもっている。図2(a)は慣用切削のモデルで単一せん断面OCを通過する際に瞬間的にすべりが起こるのではなく、せん断領域OABで示すような厚みのある領域を通過する間に変形する。このせん断領域を通過後も、切りくずはすくい面との摩擦によって、すくい面近傍で2次変形域と呼ばれる領域で図に示すように大きく曲げられる。この領域は高速切削や加熱切削を行うことによるすくい面温度の上昇、潤滑油の使用などによって少なくすることはできても、工具のすくい面と切りくずの間の摩擦抵抗を極めて小さくすることは難しい。図2(b)は振動切削のモデルで、Piispanenが考察したように、切削予定面にトランプカードが並んでいるとするモデルと考えると、振動切削では工具の1振動でトラ

ンプ1枚を約2万分の1秒以下の極く短い時間で、瞬間的にせん断面OCに沿ってせん断変形することになる。せん断力をせん断領域の大きさに比例すると考えると、振動切削はカード1枚分を移動するに要する力であるのに対して、慣用切削はカード多数枚を移動する力に相当するから、振動切削の切削力は大幅に減少することになる。銅を慣用切削した場合のせん断領域の平均的な厚さは、0.1~0.2 mmである⁴⁾のに対し、本実験の振動切削では毎分4回転の場合、切削長さ $L = v/f$ (v : 試料の切削速度, f : 工具の振動数) より L は $0.05 \mu\text{m}$ となることからみてもカード1枚分の除去量は極めて小さい。

さらに振動切削ではすくい面は切りくずと接触、分離を交互に繰り返しているから、工具が切りくずと分離している間にすくい面には潤滑油が侵入し、2次変形領域の摩擦力は潤滑作用により極めて小さな値になると考えることができる。このように小さい力で材料をせん断変形させるためには、材料はせん断力が最も小さくなるような方向に変形するのが自然である。この方向はせん断面の長さを短くする方向、すなわちせん断角を大きくする方向である。言い換えれば、切削比が大きくなる方向、すなわち切りくず厚さが薄くなる方向である。このような振動切削モデルは切削力が極めて小さく、すくい面上の摩擦力が非常に小さい切削状態において実現できるものと思われる。

4. 実験結果

上記の振動切削の切削機構を実験によって証明するために、以下の実験を行った。

タップの自進作用を利用したねじ立て方式では、食付き時にある程度の押付け力が必要となる。その影響は図3(左)のように、切削トルクは押付け力約50 N以下では振動ねじ立てのトルクが極めて小さく、慣用ねじ立ての1/20程度である(慣用ねじ立ての押付け力約20 N以下では、タップが試料に食い付かず、したがってねじ立てができない。ここでは、タップと試料の単なる摩擦力が示してある)。これは振動ねじ立て機構に述べたように、タップが毎分2.4万回振動しているために、タップ1刃1振動当たりの除去量は極めて小さくなることと、切りくずとタップは絶えず接触、分離を繰り返して潤滑油がタップのすくい面上に充分に供給されて、タップのすくい面上の切りくずと

Fig. 3 Relationship between cutting torque and frictional torque

(a) Conventional tapping (b) Vibration tapping

Fig. 4 Section through quickstop after conventional and vibration tapping

の摩擦力が極めて小さくなることなどによって、切削トルクが大幅に減少したものと考えることができる。

振動ねじ立てにおけるこの小さな切削トルクの度合いを調べるために、慣用ねじ立てしためねじと振動ねじ立てしためねじについて、タップにめねじを回転させながらねじ込んで、その時のタップとめねじの摩擦トルクを調べると右図のようになる。図より振動ねじ立てにおける切削トルクは、ねじ立ての終了しためねじにタップをねじ込む時の摩擦力和ほとんど同じで、その値は0.05 Nm程度である。言い換えれば、振動ねじ立ての切削トルクは、手でめねじにおねじをねじ込む程度の極めて小さい値であることがわかる。

ねじ立てを急停止して得られた切りくず近傍の断面の様子を示すと図4のようになる。図4(a)は慣用ねじ立ての場合で、切りくずは非常に厚く、切削予定面と切りくず自由面との境界部分(弧AB)は図2(a)の弧AC'Bに示したように大きな丸み(半径約200 μm)をもっており、OABとして示されるように厚みはかなり厚く、しかも長さも長い扇形のせん断領域であることを示している。図4(b)は振動切削の場合で、切りくずは非常に薄く、切削予定面と切りくず自由面との境界部分の丸み(半径約20 μm)は非常に小さい。この丸みが小さいことはせん断領域が小さいことに相当し、図2(b)のOCとして示されるような

単一せん断面に近いことを示している。さらに切りくずが薄いことは、せん断面の長さが短いことを表しており、そのことは写真からも明瞭に認められる。このように慣用ねじ立てと振動ねじ立ての切りくず近傍の断面写真を調べると、せん断領域の大きさや切りくず厚さなどを特徴的に示すことができる。この写真一つを例にとってみても、振動ねじ立てのトルクが慣用ねじ立てに比べて大幅に減少することを容易に説明することができる。

通常の切削においては、工具のすくい面と切りくず裏面の接触部分は2つの領域、すなわちすくい面と切りくず裏面がほぼ全面で接触している凝着領域と、すくい面と切りくず裏面が部分的に接触しているすべり領域からなっている。この凝着部分が多いと、すくい面と切りくず裏面の摩擦抵抗が大きくなること、すなわち切りくずが2次変形されて切削抵抗が大きくなることになる。そこで、切りくず裏面の様子を走査電子顕微鏡写真で示すと図5のようになる。左図は慣用ねじ立ての場合で、図の例では工具刃先部分(矢印O)より50~60 μm位までは、すくい面と切りくず裏面がほぼ全面で接触した凝着の跡が明瞭に認められる。この領域は切りくずがすくい面を擦過して、すくい面上の酸化物などを取り除いて、化学的活性の強い新生面である。さらに、この部分ではすくい面上の垂直応力が大きいために、すくい面と切りくず裏面はほぼ全面で接触している。したがって、ねじ立てを急停止して切りくずを工具から分離すると、切りくず裏面全体に凝着痕が残ることになる。その後続く領域では、すくい面上の垂直応力も小さく、潤滑油の侵入も容易であるため、切りくずはすくい面上を単に滑っていることになり、写真にはその条痕が明瞭に認められる。

これに対して振動ねじ立てでは(右図)、毎秒約2

(a) Conventional tapping (b) Vibration tapping

Fig. 5 Scanning electron micrograph of under surface of chip

Fig. 6 Comparisons of chip thickness in each tapping

(a) Conventional tapping (b) Vibration tapping

Fig. 7 Sectional aspect of chip in each tapping

万回の高速で工具と切りくずは接触、分離を繰り返しているため、すくい面近傍に潤滑油が容易に侵入することができ、図にみられるように凝着領域はわずかに認められる程度である。したがって、振動ねじ立てにおいては、すくい面と切りくず裏面の接触領域は、主としてすべり領域からなると考えてよいと思われる。このようにすくい面上の摩擦状況からも、振動ねじ立ての切削トルクが大幅に減少することを容易に説明することができる。

ねじ立てを急停止した試料より、切りくず厚さを求めると図6のようになる。切りくず厚さは慣用ねじ立てでは、200~300 μm となりかなり厚いが、振動ねじ立てでは100 μm 前後と非常に薄くなっている。とくに灯油のような粘性の小さい潤滑油を用いた場合にその傾向は著しい。

タップ1刃が作りだす切りくずの断面形状はほぼ台形であるが、実際のねじ立てでは図7に示すようになり異なった形状となる。左図は慣用ねじ立ての切りくず断面で、その厚さは非常に厚く、その形状は半円形に近い。タップのねじ立てでは、タップのテーパ部分で切削をしているから、本実験のM6、4溝、4山タップの場合、タップ1刃当たりの切込みは約30 μm である。したがって、図の例では、切りくず厚さは約270 μm 、すなわち切込みの約9倍の厚さになっていることになる。一方、振動ねじ立ての切りくず形状は右図のように、切りくず厚さは非常に薄く、比較

Fig. 8 Comparisons of cutting ratio in each tapping

Fig. 9 Comparisons of shear angle in each tapping

的台形に近い形をしている。図の例では、その厚さは約60 μm で、切込みの2倍程度である。切りくず厚さは、せん断領域を通過することによって決められるから、定性的にはせん断領域の大きさ、言い換えればせん断面の長さに対応して、切削トルクも変化すると考えてもよいと思われる。そのように考えると、慣用ねじ立てにみられる厚い切りくずは、せん断面の長さが長いので切削トルクが大きくなる。一方、振動ねじ立てにみられる薄い切りくずは、せん断面の長さが短いため切削トルクは小さくなるといえる。このように切りくず厚さからみても、振動ねじ立ての切削トルクが大幅に減少することを容易に説明することができる。

ねじ立てを急停止した試料の切りくず厚さより、切削比を求めると図8のようになる。マシン油潤滑の場合、慣用ねじ立ての切削比は0.1~0.2であるのに対し、振動ねじ立てでは0.2~0.3とかなり大きい。灯油潤滑の場合は振動の効果はさらに大きく、切削比は0.4~0.6にもなる。

せん断面を単一せん断面と仮定して、せん断角を求めると図9のようになる。マシン油潤滑の場合、慣用ねじ立てのせん断角は5~10°であるのに対し、振動ねじ立てでは15~20°とかなり大きい。灯油潤滑では振動ねじ立てのせん断角は20~30°にもなる。このように振動ねじ立てでは、切りくずが薄くなって切削比が大きくなり、その結果せん断角が増大して切削トルクが大幅に減少することになる。

Fig. 10 Relation between vickers hardness and depth from cutting surface

振動ねじ立てにおける仕上面の加工変質層の影響を調べるために、断面の微小硬さ（測定荷重 0.1 N）を求めるると図 10 のようになる。純アルミニウム O 材のような非常に軟らかい材料を慣用ねじ立てする場合、図 9 に示したようにせん断角は非常に小さい。そのためせん断面のせん断ひずみが大きく、図に示すように仕上面近傍にまでその影響が及んで、仕上面の硬さが大きくなる。その硬さ分布は仕上面より深さ方向にいくにつれて次第に減少し、仕上面表面より約 150 μm の位置で母材の硬さと等しくなる。一方、振動ねじ立てではせん断角が大きいので、せん断面のせん断ひずみは小さく、仕上面近傍には加工変質層は認められない。なお、純アルミニウムの H 材はもともとかなり加工硬化しているので、加工変質層は認められなかった。

以上のように振動ねじ立てにおいては、切削トルクが小さい、切削比およびせん断角が大きい、切りくず厚さが薄い、加工変質層がないなどの特徴が分かったが、最終的な製品であるめねじの形状を検討する必要がある。タップによるねじ立てでは、タップ形状がそのままめねじとして転写されるのであるから、タップ形状を基準台形として 2, 3 の検討を試みた。

純アルミニウムのように極めて軟らかい難削材をねじ立てすると、図 11 のようにねじ山がタップの形とは異なった不規則な形状となる。左図は慣用ねじ立ての場合で、めねじの斜面に凹凸が激しく、その谷部分は丸くなって、ねじ山はかなり変形している。さらに、めねじの山にあたる下穴の加工面には盛上がりもみられる。右図は振動ねじ立ての場合で、めねじの斜面は直線的で、その谷部分は鋭利な角部となっているなどタップの形状がかなり正確に転写されている。

これらの様子を模式的に示すと図 12 のようになる。左図はタップの基準台形で、AB 部がめねじの谷、

Fig. 11 Aspect of female screw

Fig. 12 Illustration of deformation of female screw

CD 部がめねじの山、すなわち下穴の加工面、台形 BCDE がめねじの断面を表している。実際にねじ立てしためねじは、右図の実線で示すように大きく変形し下穴の加工面上には盛上がりも生じる。このような不規則な形状の精度を正確に表す因子として、めねじの断面積、基準台形からの偏りの断面積の和（図には +, - で示している）、めねじとタップの間のすきま、めねじ台形の 3 辺の和（ $BC+CD+DE$ に相当する長さ）、めねじのピッチなどが考えられる。このうち、断面積や基準台形からの偏りなどは下穴の加工面上の盛上がりのため、めねじとタップの間のすきまはめねじ斜面の凹凸のため、それぞれめねじの精度に影響を及ぼすので問題がある。それらを実際に測定してみたが、慣用ねじ立てと振動ねじ立ての間の差異は明りょうには認められなかった。それに対し、めねじ 3 辺の和やピッチなどはめねじの精度を比較的良好に表すと考えられる。

まず、めねじ 3 辺の和を示すと図 13 のようになる。図中、基準台形の 3 辺の和は 1.33 mm で短い太い線で示してある。振動ねじ立てでは、その値は基準台形の付近に集中している。これは、めねじの各辺が直線の時、それらの和は基準台形と同じ値になるから、振動ねじ立てにおいては、タップ形状がかなり正しく転写されていることを示していることになる。

次にめねじのピッチを示すと図 14 のようになる。振動ねじ立てではその値は、基準台形のピッチ 1.00 mm 付近に集中している。これは、めねじの斜面に凹凸の少ないほどピッチのばらつきが少ないこと、すなわちタップ形状がかなり正確に転写されていることを

		Sum of three sides of trapezoid mm							
		Dry cutting				Wet cutting			
		Machine oil		Kerosene		Machine oil		Kerosene	
		1.3	1.5	1.3	1.5	1.3	1.5	1.3	1.7
AI050-H24	Conventional tapping								
	Vibration tapping								
AI050-O	Conventional tapping								
	Vibration tapping								

Fig. 13 Comparisons of sum of three sides along trapezoid in each tapping

		Pitch of female screw mm							
		Dry cutting				Wet cutting			
		Machine oil		Kerosene		Machine oil		Kerosene	
		0.8	1.0	0.8	1.0	0.8	1.0	1.2	
AI050-H24	Conventional tapping								
	Vibration tapping								
AI050-O	Conventional tapping								
	Vibration tapping								

Fig. 14 Comparisons of pitch of female screw in each tapping

表していることになる。

5. 結 言

超音波振動によるねじ立て機構を検討した結果をま

とめると次のようになる。

- (1) 振動ねじ立ての切削機構は、Piispanenのカードモデルのようにカードを1枚ずつせん断変形するような機構と考えると、定性的には実験結果と一致している。すなわち、振動ねじ立てのせん断領域は非常に小さい。また、タップのすくい面と切りくず裏面の接触状況は凝着部分はほとんどなく、主としてすべり領域である。
- (2) 振動ねじ立て（灯油潤滑）の切削比（0.4～0.6）は慣用ねじ立て（0.1～0.2）の約3倍である。せん断角も同様に（5～10°）から（20～35°）と大きくなる。また、切りくず厚さは慣用ねじ立ての1/3程度である。切削トルクは極めて小さく、その値はめねじにおねじをねじ込む時の摩擦力度で約0.05 Nmである。また振動ねじ立てしためねじの表面には加工変質層が認められない。
- (3) ねじ山が不規則に変形するようなめねじの精度を正確に表すには、めねじのピッチを用いるのが適している。

参 考 文 献

- 1) 鈴木康夫, 加茂 進, 宇野正美: 超音波スクリー振動による加工法の研究 (第3報), 精密工学会誌, 55, 5 (1989) 853.
- 2) 限部淳一郎, 早乙女辰男, 西本雄二: セラミックスの重畳振動切削, 精密工学会誌, 52, 11 (1986) 1851.
- 3) 限部淳一郎, 西尾彰文, 高山孝司: セラミックスの精密重畳振動ねじ立て, 精密工学会誌, 55, 11 (1989) 1981.
- 4) 中山一雄: 切削加工法, コロナ社, (1978) 103.