超音波スクリー振動による加工法の研究 (第2報)*

—振動子傾斜角の影響—

財満鎮雄** 鈴木康夫*** 加茂 進*** 宇野正美†

Study on Machining by the Use of Ultrasonic Screw Vibration (2nd Report)
—Influences of the Transducer Inclination Angle—

Shigeo ZAIMA, Yasuo SUZUKI, Susumu KAMO and Masami UNO

In the screw vibration, vibration direction at the small end of the horn varies with the transducer inclination angle ϕ , in short, the ratio of torsional velocity component to vertical one changes. So, it is necessary to clear effects of ϕ . Vibration behavior, velocity and stress distribution were calculated and some exponential taper horns were made on the theory in the previous paper, and then effects of ϕ were examined by measuring the velocity or the displacement. In addition, glass drilling experiments were carried out by utilizing the base face of the small end of the horn, and usefulness of the ultrasonic drilling by screw vibration was examined. Following results are obtained: (1) As ϕ increases, the taper constant of the horn decreases, then the total length of the horn should be long. The vibration direction at the small end of the horn is equal to ϕ at the outside part of the horn, and gradually approaches to the vertical direction near the center of the horn. The suitable value of ϕ to generate perfect screw vibration is about 20–30°. (2) The machining rate shows the maximum value when the ratio of amplitude to mean diameter of abrasive grain is about 0.3, that is, the mean grain diameter is about 3–4 times amplitude. Suitable machining pressure in screw vibration is higher than that in longitudinal vibration, and surface roughness becomes somewhat finer. B₄C abrasive grain was recognized somewhat good effect on both machining rate and surface roughness.

Key words: ultrasonic machining, screw vibration, transducer inclination angle, machining rate, machining pressure, abrasive grain

1. 結 言

前報¹⁾において固体指数ホーンのスクリュー振動(縦振動とねじり振動を同じ周波数で共振させた振動であり、ねじの動きに類似した合成振動となる)の解析を行って、1個の磁歪振動子でスクリュー振動が得られること、スクリュー振動には一般に節部が存在しないこと、振動方向はホーン大端より細端へ移るにつれて回転するように変化しながら、同時に振幅も次第に大きくなることなどを明らかにした。

スクリュー振動においては、振動子傾斜角が変化するとそれに応じてホーン細端のスクリュー振動の振動方向が変わる。つまり、スクリュー振動のねじり成分と縦成分の割合が変化するのでそれに対する振動子傾

斜角の影響を明らかにしなければならない。

そこで、本報では振動子傾斜角を変えた場合のスクリュー振動の振動特性、速度分布および応力分布などを前報¹⁾の理論によって求め、それに基づいて指数ホーンを作製して、速度、つまり変位を測定することによって振動子傾斜角の影響を検討した。

また、ホーン細端下面を利用した穴あけ加工を実施して、スクリュー振動方式による超音波加工への適用性を求めてみた。

2. 振動子傾斜角の影響

振動子傾斜角 ϕ (図1) を変えるためには振動子をホーン大端部に対して角度をもって取り付けするための三角形部品が必要であるが、 ϕ を変化させると三角形部品の大きさが変わり、磁歪振動子と三角形部品から成る振動子全体(以下本文では単に振動子という)の振動特性が変化する。つまり、 ϕ が増すと振動子の長さが長くなるため振動子の共振周波数が低くなる。し

* 原稿受付 昭和59年4月19日、昭和58年度信越地方講演会(昭和58年10月1日)にて発表

** 正会員 中部大学工学部(春日井市松本町1200)

*** 正会員 静岡大学工学部(浜松市城北3-5-1)

† 静岡大学工学部

Fig. 1 Experimental equipment used

たがって、その共振周波数を基準にして求めたホーンのテーパ定数は ϕ が増加すると小さくなる。その結果、ホーンの全長が長くなり、ホーンの絞りが緩やかになる。

ϕ を 10° , 20° , 30° と変えた場合のホーン外周部におけるホーン長手方向の速度および応力分布の計算結果は図2のようになる。図において、横軸はホーン細端からの距離を表しているの、振動子の駆動点は、例えば $\phi=10^\circ$ の場合では214.5 mmの位置となる。いずれも2波長共振で、その共振状態は縦振動($\phi=0^\circ$ にあたる)と同様ホーン細端で速度最大、応力零であるが、速度が零となる節部はいずれの ϕ についても存在しない。スクリー振動の実質的な節部に相当する速度の最小位置は ϕ が増すと約12 mmずつホーン大端側へ移動する。

Fig. 2 Velocity and stress distribution along axial direction of horn

Fig. 3 Velocity and stress distribution along axial direction of horn

前報¹⁾のように振動方向の正負を考え、ねじり振動振幅を x 軸、縦振動振幅を y 軸とすると、ホーン外周部におけるホーン長手方向の速度ベクトルの計算結果は図3のように、ホーン大端より細端へ移るにつれて右上、垂直、左上、水平、右上方向へと回転するように振動方向を変えながら、振幅も次第に大きくなり、ホーン細端で最大となる。ホーン細端における振動方向は ϕ に等しいから、 ϕ が大きくなると、振動方向は次第に水平方向に移り、ねじり成分が多くなる。ホーンの途中における垂直成分(縦成分)および水平成分(ねじり成分)だけとなる位置は ϕ が大きくなるにつれて次第にホーン大端側へ近づく。

応力分布も速度分布と同様にホーン大端より細端へ移るにつれて次第に大きくなり、ホーン細端で零となるが、 ϕ の影響については速度の場合とほとんど同様である。

図3はホーン外周部の振動状況を示したものであるが、穴あけ加工のような場合にはホーン細端面内部の振動状況が重要と

Fig. 4 Velocity distribution along radial direction

なる。そこで、ホーンの中心を0、外周を1として速度分布の計算結果を示すと図4のようになる。縦振動の振幅は中心から外周まで同じ大きさであるが、ねじり振動では中心で零、外周で最大となるから、それらを合成したスクリー振動は外周部でねじり成分が最も多く、その方向は ϕ に等しい。このねじり成分は ϕ の大きいほど多くなる。一方、ホーンの中心に近づくにつれて、次第にねじり成分は減少して、中心部では縦成分だけとなる。

3. 測定結果

ϕ を変えた場合のスクリー振動の振動状況を顕微鏡（100倍）により振幅と方向を測定した結果は図5のようになる。上図はホーン外周部の円周方向角度 0° の位置における長手方向に沿った各部位の振幅と方向を示したもので、速度ベクトルはいずれの ϕ においても、垂直、水平などを経て回転するように変化している。このように円周方向角度（振動子取付位置の方位を基準とする反時計方向の角度） 0° の位置（図1C点）においてはスクリー振動しているが、他の円周部位では不明であるから、ホーン細端外周部における円周方向各部位の速度ベクトルを示すと中図のようになる。 ϕ が 20° と 30° においては振動方向はほぼ平行方向にあるが、 ϕ が 10° では円周方向角度 $90\sim 135^\circ$ 領域において振動方向に多少差異がみられる。これはホーン細端面に直角方向からみたホーン内部の振動状況をみればいっそう明かで、その様子は下図のようになる。 ϕ が 20° と 30° においては振動の中心とホーンの中心がほぼ等しく、振動方向も同じ方向でスクリー振動であるが、 ϕ が 10° では両者の中心がずれており、さらに振動方向にも差異がみられ、スクリー振動がくずれていることが分かる。

ϕ が小さくなるとテーバ定数が大きくなり、ホーン

Fig. 5 Velocity distribution in each directions of horn

の絞りが強くなるため半径方向の振動の影響が現れるものと思われる。また、 ϕ が大きくなると振動子の三角形部品の面積が大きくなるためホーン大端面外周部に振動子を接着することが困難となる。本実験のホーンでは ϕ は 40° 位が限界である。したがって、スクリー振動はホーンの絞りと振動子の大きさによって制約されるから最適な ϕ が存在することになるが、その値は本実験では $20\sim 30^\circ$ 位である。

ホーン外周部におけるホーン長手方向各部位の振幅の測定結果を示すと図6のように、 ϕ が 20° と 30° においては理論値（実線）とほぼ一致しているが、 ϕ が 10° ではホーン細端部近傍における変位が理論値より小さく、スクリー振動がくずれているようである。実験装置にホーンを固定することについての影響はいずれの ϕ にもほとんどないようである。さらに、スクリー振動においては、変位が零となる部位はいずれの ϕ についても観察されなかった。

4. 穴あけ加工

穴あけ加工装置は図1に示すようにホーン大端面外周部に振動子を接着し、変位の最も小さい位置に独立

Fig. 6 Velocity distribution along axial direction of horn

気泡スポンジを介して3本のボルトで固定した。さらに、上方への逃げを防止するためにホーン大端面も同様にボルトで固定した。超音波発振機の出力は50 W、振動子は28 kHz フェライト磁歪振動子を用い、穴あけ加工中の振動子の発熱はファンによって空冷した。加工圧力はおもりによって調整し、試料支持系に超音波振動が誘振されるのを防ぐためにすべり案内を用いた。ホーン細端部分を工具として使用したので加工直径は5.2 mmである。砥粒は加工中絶えず破砕されて細くなり加工速度が低下するので、新しい砥粒と交換する必要があるが、30 min 程度では未使用のものとほとんど変わりがなかったので30 minで新しいものと交換するようにした。砥粒の混合比は砥粒1:水2とし、試料面上1~2 mm 水を浸し、加工中絶えず砥粒を供給するようにした。実験に用いた試料は市販の普通板ガラス、砥粒は表1に示すように B_4C 、SiCおよび Al_2O_3 で、その粒度はNo. 100~3 000であるが、種々な形状や大きさのものが混在しているため平均粒径で整理した。SiC砥粒は三角形、長方形、正方形および多角形など種々な形状から成るとともに、その大きさもかなり変化しているが、 B_4C および Al_2O_3 は正方形や多角形のものが比較的多く、大きさもSiCに比べて均一である。

加工速度は砥粒直径が大きくなると増加するが、工具の振幅によっても変化するので、それを考慮して複振幅/平均粒径について示せば図7のようになり、その値が0.3前後の時、つまり複振幅の3~4倍の平均粒径

Table 1 Kinds and mean diameter of abrasive grain

Abrasive grain	No. of grain	Diameter of grain μm			
		Large	Middle	Small	Mean
SiC	100	266	166		216
SiC	150	171	97		134
SiC	220	142	89	34	88
SiC	400	72	49	34	52
Al_2O_3	400	54	37	22	38
B_4C	400	47	33	20	33
SiC	800	32	19	8	20
SiC	2 000	27	16	8	17
SiC	3 000	15	7	4	9

Fig. 7 Influences of amplitude/mean diameter on machining rate

の時に最大加工速度となる。これは表1にみられるように、砥粒は平均粒径よりも小さいものをかなり含んでいるから、これらの砥粒が加工にあずかり、また大きな砥粒も加工中に破砕されて小さくなり²⁾加工に供されるからである。縦振動とスクリー振動では最適加工圧力が異なるので単純には比較できないが、平均粒径が大きい場合は縦振動の加工速度がよい。ホーン先端の振幅はいずれも約30 μm であるから、垂直方向の変位成分はスクリー振動の方が小さいため、砥粒が大きいほど加工速度に差が生じるとと思われる。加工速度は大きさに比例してあるところまでは増加するが、加工面の表面粗さは砥粒が大きくなるほど粗くなるから、両者を考慮してNo. 400を使用することにした。

加工圧力が加工速度に及ぼす影響を ϕ を変えた場合について示すと、図8のようになぜの ϕ についても最適加工圧力が存在し、加工圧力がこの適値よりも高くなっても低くなっても加工速度は低下する。加工圧力が高い場合には試料への砥粒の浸入が困難であり、加工速度は低下する。また加工圧力が低い場合には当然加工速度は低下するが、加工装置のすべり案内

Fig. 8 Relations between machining pressure and machining rate at different ϕ

Fig. 9 Relations between machining pressure and machining rate at different kinds of abrasive grain

の摩擦等によって加工圧力が不安定となることも影響していると思われる。

スクリー振動は縦振動に比べて最適加工圧力が高い。これはスクリー振動においては砥粒に回転運動も加わるため、高い加工圧領域においても試料とホーンのすきまに砥粒が浸入しやすいからである。

スクリー振動の砥粒に加わる回転運動は図4にみられるように、外周部分が最も大きく中心に移るにつれて次第に小さくなるから、 ϕ の大きいほど水平成分が多いため、砥粒を回転させようとする作用は強いと考えられるが、 ϕ が 10° の場合が多少小さい程度である。ホーン細端部下面を利用するような場合にはホーンの中心部分の砥粒の回転運動は ϕ が変化してもその効果は少ないため、加工速度にほとんど影響を及ぼさないとと思われる。

砥粒の種類を変えた場合の加工速度に及ぼす影響を示すと図9のように、加工速度は B_4C 、 SiC 、 Al_2O_3 の順によい。これは砥粒の硬さと関連していると考えられ、滑石を1、ダイヤモンドを15とした改正モース硬さで炭化ほう素は14、炭化けい素は13、結晶酸化アルミニウムおよび炭化タングステン12であるから、

Fig. 10 Relations of mean diameter of abrasive grain and surface roughness at different ϕ

Fig. 11 Relations between machining pressure and surface roughness at different kinds of abrasive grain

ほぼこの硬さの順と対応している。各々の砥粒に対する加工圧力の適用範囲は加工速度と同様、 B_4C 、 SiC 、 Al_2O_3 の順に広い。この最適加工圧力は表1に示した砥粒の大きさに関連していると考えられ、比較的均一な砥粒ほど高い加工圧力まで砥粒が浸入しやすいためであろう。

SiC 砥粒を粒度No. 100~3 000まで変えた場合、平均粒径と表面粗さの関係を示すと図10のようになる。ガラス底面の表面粗さはスクリー振動の方が縦振動より多少よいが、この底面は砥粒の衝撃破壊による微少なクラックであるから、縦方向変位の大きい縦振動の方が表面も多少悪くなったものと思われる。 ϕ が表面粗さに及ぼす影響はほとんどみられないが、この底面においては ϕ の違いによる砥粒の回転運動はホーン細端面外周部分を除いては比較的少ないためであろう。円筒面粗さは底面のそれに比べるとかなり小さい。これはホーン底面と円筒面との交線部にあたるホーン外周部分で作られた穴側壁部の粗さの山の部分がホーン円筒部に浸入した砥粒によって振動ラッピング³⁾のように破壊されて表面粗さが小さくなるためと考えられる。この山の部分は砥粒の極くわずかの運動によって破壊されるから、 ϕ の影響や縦振動との差はほとんど

Abrasive grain : SiC No. 400 , Material : Glass

Fig. 12 SEM of glass on plane surface

ど生じないと思われる。

粒度 No. 400 で砥粒の種類を変えた場合は図 11 のように円筒面粗さには差異はほとんどみられないが、底面の表面粗さは B_4C がよい、 B_4C においては砥粒直径が比較的均一であるが、SiC や Al_2O_3 では大きな砥粒によるクラックが表面粗さを大きくしているからである。

ガラスに穴あけした底面の SEM 写真は図 12 に示すように、砥粒によって生じた互いに隣接する多数のクラックから成る貝殻状の表面である。縦振動ではそれら多数のクレータ中に大規模な破壊面がみられ、それら凹凸部分の表面形状が表面粗さ曲線と対応している。スクリー振動では多数のクレータが隣接した表面形状でその粗さ曲線も小さくなっている。円筒面には大きなクレータはほとんどみられないが、これは円筒部分に浸入した砥粒が、すでに不規則に作られている凹凸部分の山の部分を破壊するために表面粗さがよくなると思われる。

5. 結 言

振動子傾斜角を変えた場合の振動特性とホーン細端

部下面を利用した超音波穴あけ加工を実施した結果をまとめると以下のようである。

- (1) 振動子傾斜角 ϕ が大きくなると振動子が長くなり、共振周波数が低くなる。それに応じてホーンのテーパ定数が小さくなり、ホーンの全長が長くなる。
- (2) ホーン細端外周部における振動方向は ϕ が大きくなると次第に水平方向に近づく。ホーン細端部内部における振動方向は外周部で ϕ に等しく、中心に移るにつれて垂直方向へ近づき、中心部では縦成分だけとなる。
- (3) ϕ が小さくなると半径方向の振動の影響が現れ、 ϕ が大きくなるとホーン大端面外周部に振動子を接着することが難しくなることから、スクリー振動となる ϕ の最適値は $20 \sim 30^\circ$ 位である。

- (4) スクリュー振動の加工速度は縦振動とほとんど同じであるが、加工速度が大きくなる最適加工圧力は縦振動に比べて高い。スクリー振動の加工速度は ϕ が 20° と 30° において大きい。
- (5) 底面の表面粗さはスクリー振動の方が縦振動より幾分良いが、円筒面粗さはほとんど差がない。
- (6) スクリュー振動、縦振動のいずれにおいても、複振幅/平均粒径の比が 0.3 前後の時、つまり平均粒径が複振幅の 3~4 倍の時、加工速度が最大となる。

参 考 文 献

- 1) 財満鎮雄, 宇野正美, 加茂 進: 超音波スクリー振動による加工法の研究(第1報), 精密機械, 49, 5(1983)661.
- 2) 花岡忠昭, 樋口静一, 守友貞雄: ガラスの砥粒切断における砥粒供給時期に関する一考察, 精密機械, 48, 7(1982)111.
- 3) 限部淳一郎, 進村武男: 精密振動ラッピングの研究, 精密機械, 43, 3(1977)293.