621.911.018:66.084:534-8

超音波振動切削に関する研究*

(第2報, 超音波振動切削用刃物台の構造について)

隈 部 淳 一 郎**

Study on Ultrasonic Cutting

(2nd Report, The Mechanism of Tool Rest for Ultrasonic Cutting)

by Junichiro KUMABE

Theoretical formulas for designing an exponential or conical horn for longitudinal or torsional vibration in ultrasonic cutting are established in this report.

Then, the mechanism of the tool post that is much important for developing the fundamental research or effective application to various cutting tools is investigated. And it has been found that the structure of an ultrasonically vibrated cutting tool calculated by these formulas has a style suitable to conventional machine tools and has several nodes. An ultrasonically vibrated cutting tool can be fixed statically on the machine tool by supporting these nodal points.

1. 緒 言

第1報⁽¹⁾において, 切削工具であるバイトを超音波振動させて切削したときの切削現象をのべ, 振動方向は切削方向と同方向にすることを原則とすることなどを明らかにした。

しかしバイトを能率的に振動せしめるためには幾多の準備を必要とする。

振動源としては現在ではフェライト, あるいはニッケル磁歪振動子を用いる以外にないので検討の余地はないが, この振動源に直接バイトなどの切削工具を接着したのでは, 第3報⁽²⁾にのべるごとく振幅が不足して満足な振動切削効果が得られないので, なんとかして振幅を拡大して用いねばならない。またその超音波振動するバイトの振動姿態をさまたげないようにして, 旋盤や形削り盤などの工作機械に取りつけ得るようにしなければならない。

これらの点を十分に検討しておかないと, 基礎的研究や具体化の応用研究を進展せしめることができない。

その参考資料として従来超音波加工装置に使用されている振幅拡大装置がある。それによると指数関数形ホーン, 直線形ホーンが取扱われている。筆者の研究でも同じような振幅拡大具がよさそうに考えられる。

しかしと粒による超音波加工ではもっぱら縦振動が用いられているが, 筆者の創始したバイトを超音波振動させての切削方法は, このバイトのみに限らず, 他の切削工具たとえばドリル, リーマ, タップ, 金のこ刃, ブローチ, フライスカッタ, といしなどの切削工具あるいは研削工具と名のつくすべてに適用されるので, その際に切削方向と同方向に振動させようとする, その振動駆動様式には縦振動のみならず, それぞれの切削工具にしたがってねじり振動または曲げ振動によらねばならない。

そこでこれらを幅広く検討するわけであるが, 検討あるいは解析にあたっては簡単な振動基礎式から展開してゆくに, たとえば縦振動のようにすでに発表されている⁽³⁾内容に重複するところもあるが, いろいろな形状, 材質の切削工具に対する能率的振幅拡大用ホーン的设计要領や, その振動系の取付位置などの超音波振動切削用刃物台構成様式をよりいっそう簡明に設計し, また納得しやすいようにしておくことは, 本切削方法の基礎研究ならびに今後の具体化のための応用研究進捗上きわめてたいせつなことである。

そこで最も基本的な縦振動用ホーンの検討からはじめ, 次にねじり振動用ホーンを解析し, 曲げ振動についてはその都度行なうことにして, 本報では省略した。最後に本報で明らかにした設計要領によって, 第3報において行なう基礎実験装置の具体的寸法を決定し, 実際にバイトにかなりの振幅を与えて切削加工に使用

* 昭和 33 年 10 月 28 日 東京秋期講演大会において講演, 原稿受付 昭和 36 年 2 月 27 日。

** 正員, 東京工業大学(東京都目黒区大岡山 1)。

し得るようになるかどうかを旋削装置を示し、具体的に検討してみることにする。

2. 縦振動を利用するときの切削工具

振動系形状の解析

振動基礎式から展開されて求められる常微分方程式がとけやすいように、指数関数形ホーンおよび直線形ホーンの2種類について検討する。

2.1 指数関数形ホーン 第1図において、①は固有振動数 f の磁わい振動子、②が振幅拡大用ホーンで、③は図示されているようなバイト、あるいはドリル、金のこ刃、ブローチなどの切削工具である。この任意の切削工具に適合する振幅拡大用ホーン形状を決定するのである。

③、②、①をそれぞれ単独に共振せしめるようにして結合してもよいが、一般的な切削工具③+ホーン②の振動系の固有振動数が、振動源①の固有振動数 f と共振せしめるようにして構成する場合について考える。

まず、 S_1 : ホーンと振動子の接着側のホーン断面積、 S_2 : 振動子側から x なる点の断面積、 S_3 : ホーン先端の面積、 S_4 : バイトの表面積、 E_1 : ホーン材の弾性係数、 E_2 : バイトの弾性係数、 ρ_1 : ホーンの密度、 ρ_2 : バイト材の密度、 c_1 : ホーン材中の音速、 c_2 : バイト材中の音速、 U_1 : ホーンの変位、 U_2 : バイトの変位とすれば、ホーンの縦振動基礎式は衆知のごとくに次のようになる。

第1図 指数関数形縦振動ホーン

$$S \frac{\partial^2 U_1}{\partial t^2} = c_1^2 \frac{\partial}{\partial x} \left(S \frac{\partial U_1}{\partial x} \right)$$

しかるにホーン形状が $S = S_1 e^{-2mx}$ で表わされるものとすれば上式は

$$\frac{\partial^2 U_1}{\partial t^2} + 2mc_1^2 \frac{\partial U_1}{\partial x} - c_1^2 \frac{\partial^2 U_1}{\partial x^2} = 0 \quad \dots\dots (1)$$

このホーンがある固有振動数をもって、ある正規振動形で調和振動をすると仮定して

$$U_1(x, t) = U(x) (A \sin \omega t + B \cos \omega t)$$

で表わされるものとすれば (1) 式は (2) 式となる。

$$c_1^2 \frac{d^2 U}{dx^2} - 2mc_1^2 \frac{dU}{dx} + U\omega^2 = 0 \quad \dots\dots (2)$$

(2) 式の常微分方程式をとけば

$$U_1 = l^{mx} \left\{ A \sin \sqrt{\frac{\omega^2}{c_1^2} - m^2} \cdot x + B \cos \sqrt{\frac{\omega^2}{c_1^2} - m^2} \cdot x \right\} \sin (\omega t + \varphi) \quad \dots\dots (3)$$

一般に直線形形状の切削工具、この場合にはバイトであるが、その変位 U_2 は (3) 式を $m=0$ として求められる (4) 式となる。

すなわち、

$$U_2 = \left(C \sin \frac{\omega}{c_2} x + D \cos \frac{\omega}{c_2} x \right) \sin (\omega t + \varphi) \quad \dots\dots (4)$$

ただし $l \leq x \leq l+a$

この (3)、(4) 式のそれぞれの定数を下記境界条件を入れてとく。

$$x=0 : \quad \frac{\partial U_1}{\partial x} = 0$$

$$x=l : \quad E_1 S_2 \frac{\partial U_1}{\partial x} = E_2 S_3 \frac{\partial U_2}{\partial x}, \quad U_1 = U_2$$

$$x=l+a : \quad \frac{\partial U_2}{\partial x} = 0$$

結果において (5) 式が求められる。

$$\frac{\tan \left(\sqrt{\frac{\omega^2}{c_1^2} - m^2} \cdot l \right) \frac{\omega^2}{c_1^2}}{\frac{\omega}{c_2} \tan \left(\frac{\omega}{c_2} a \right) \left\{ m \tan \left(\sqrt{\frac{\omega^2}{c_1^2} - m^2} \cdot l \right) - \sqrt{\frac{\omega^2}{c_1^2} - m^2} \right\}} = \frac{E_2 S_3}{E_1 S_2} \quad \dots\dots (5)$$

この (5) 式にバイト、金のかみ、ブローチ、ドリルなどの切削工具の形状 (a, S_3) および材質 (ρ_2) を代入することによって、希望の振動数 f に能率よく切削工具切刃を振動させ得るホーン長さ l を知ることができる。

また先端に切削工具をつけない場合、すなわちホーンだけで共振せしめる場合には $a=0$ として求められ (5) 式は (6) 式となる。

$$\tan\left(\sqrt{\frac{\omega^2}{c_1^2}-m^2}\cdot l\right)\frac{\omega^2}{c_1^2}=0$$

$$\therefore \sqrt{\frac{\omega^2}{c_1^2}-m^2}\cdot l=n\pi \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここに n は振動節の数である。

次に拡大される比をあらゆる振幅比 R_l について求めると、

(3) 式において $x=0$ とすれば

$$|U_{1x=l}|=|B\sin(\omega t+\varphi)|$$

また $x=l$ とすれば

$$|U_{1x=l}|=|e^{ml}\{A\sin\sqrt{\frac{\omega^2}{c_1^2}-m^2}\cdot l+B\cos\sqrt{\frac{\omega^2}{c_1^2}-m^2}\cdot l\}|$$

$$\therefore R_l=\left|\frac{U_{1x=l}}{U_{1x=0}}\right|=\left|\sqrt{\frac{S_1}{S_2}}\left\{\frac{m}{\sqrt{\frac{\omega^2}{c_1^2}-m^2}}\sin\sqrt{\frac{\omega^2}{c_1^2}-m^2}\cdot l+\cos\sqrt{\frac{\omega^2}{c_1^2}-m^2}\cdot l\right\}\right|$$

ホーン先端の振幅は、上式の関係で表わされるような拡大された振動をする。すなわち図のバイト切刃との振幅比を求めることができる。

このようにして構成されるバイト縦振動系の振動状態に、影響を及ぼさないでそれぞれの工作機械に取付け得る振動節があることがわかる。

その位置は振動子の中点と (7) 式で算出される位置に生ずる。すなわち (3) 式を 0 とおいて求められる。

$$x_n=\frac{\tan^{-1}\frac{1}{m}\sqrt{\frac{\omega^2}{c_1^2}-m^2}}{\sqrt{\frac{\omega^2}{c_1^2}-m^2}}\quad \dots\dots\dots (7)$$

振動子の接着側から (7) 式で算出される x_n の点に振動節が存在する。

このようにして求められる振動節には、どんな形状の取付用ジグを取りつけてもバイト振動系に影響を与えない。すなわち無理な切削抵抗を与えなければ、振動を与えない従来の普通切削もできるという、剛性のある超音波振動切削用刃物台を構成し得ることがわかる。

2.2 直線形ホーン 第2図に示す直線形ホーンの場合の形状決定式を検討する。

b : 頂点 0 からのホーン先端までの距離, l : 頂点 0 からホーンと振動子との接着面までの距離, S_1 : ホーンと振動子の接着側の断面積, S_2 : ホーン先端の断面積, S_3 : 切削工具の断面積, E_1 : ホーン材の弾性係数, E_2 : バイト材の弾性係数, ρ_1 : ホーン材の密度,

ρ_2 : バイトの密度, c_1 : ホーン材中の音速, c_2 : バイト材中の音速, U_1 : ホーンの変位, U_2 : バイトの変位とすれば

$$\frac{S_1}{S}=\left(\frac{l}{x}\right)^2, \quad \frac{d_1}{d}=\frac{l}{x} \quad \dots\dots\dots (8)$$

縦振動の一般基礎式に (8) 式の関係代入して展開すると

$$\frac{\partial^2 U_1}{\partial t^2}-\frac{2}{x}\frac{\partial U_1}{\partial x}-c_1^2\frac{\partial^2 U_1}{\partial x^2}=0 \quad \dots\dots\dots (9)$$

このホーンも、ある固有振動数をもって正規振動形で調和振動をすると仮定してやると、(9) 式はつぎのベッセル関数で表わされる形になる。

第2図 直線形縦振動ホーン

$$\frac{d^2 U}{dx^2} + \frac{2}{x} \frac{dU}{dx} + U \frac{\omega^2}{c_1^2} = 0,$$

$$\therefore U_1 = \left\{ \frac{A}{x} \sin\left(\frac{\omega}{c_1} x\right) + \frac{B}{x} \cos\left(\frac{\omega}{c_1} x\right) \right\} \sin(\omega t + \varphi) \quad \dots\dots\dots (10)$$

そして切削工具の変位 U_2 は (11) 式のようになる。

$$U_2 = \left\{ P \sin \frac{\omega}{c_2} x + Q \cos \frac{\omega}{c_2} x \right\} \sin(\omega t + \varphi) \quad \dots\dots\dots (11)$$

この (10), (11) 式に次の境界条件を入れて展開する。

$$x = l \quad : \quad \frac{\partial U_1}{\partial x} = 0$$

$$x = b - a \quad : \quad \frac{\partial U_2}{\partial x} = 0$$

$$x = b \quad : \quad U_1 = U_2$$

$$E_1 S_2 \frac{\partial U_1}{\partial x} = E_2 S_3 \frac{\partial U_2}{\partial x}$$

結果において (12) 式が得られる。

$$\frac{\tan\left\{\frac{\omega}{c_1}(l-b)\right\}\left(b \cdot l \frac{\omega^2}{c_1^2} + 1\right) - \frac{\omega}{c_1}(l-b)}{b \frac{\omega}{c_2} \left\{\tan \frac{\omega}{c_2} a\right\} \left\{\frac{\omega}{c_1} l - \tan \frac{\omega}{c_1}(l-b)\right\}} = \frac{E_2 \cdot S_3}{E_1 \cdot S_1} \quad \dots\dots\dots (12)$$

それぞれの形状の切削工具に対応する振幅拡大用の工作容易なる直線形ホーンが、この (12) 式によって算出される。

先端に切削工具をつけない、すなわちホーンのみの場合には (12) 式中の $a=0$ とおいて求められる。

すなわち

$$\tan \frac{\omega}{c_1}(l-b) = \frac{\frac{\omega}{c_1}(l-b)}{b \frac{\omega^2}{c_1^2} l + 1} \quad \dots\dots\dots (13)$$

この (13) 式によって求めることができる。

振幅比 R_s は (14) 式のようになる。

$$|R_s| = \left| \frac{U_{1x=b}}{U_{1x=l}} \right| = \left| \frac{l}{b} \left[\frac{\sin\left(\frac{\omega}{c_1} b\right) \left\{ \frac{\omega}{c_1} l \cdot \tan\left(\frac{\omega}{c_1} l\right) + 1 \right\} + \cos\left(\frac{\omega}{c_1} b\right) \left\{ \frac{\omega}{c_1} l - \tan\left(\frac{\omega}{c_1} l\right) \right\}}{\sin\left(\frac{\omega}{c_1} l\right) \left\{ \frac{\omega}{c_1} l \cdot \tan\left(\frac{\omega}{c_1} l\right) + 1 \right\} + \cos\left(\frac{\omega}{c_1} l\right) \left\{ \frac{\omega}{c_1} l - \tan\left(\frac{\omega}{c_1} l\right) \right\}} \right] \right| \quad \dots\dots\dots (14)$$

ホーン先端の振幅、すなわち図のようにしたバイト切刃は、(14) 式の関係で表わされるように拡大された振動をする。

この場合にも、振動子の中点およびこの直線形ホーンにも、それぞれの工作機械に取付を可能ならしめる次の式であらわされる振動節が存在する。すなわち

$$U_1 = \frac{A}{x} \left\{ \sin\left(\frac{\omega}{c_1} x\right) + \frac{\frac{\omega}{c_1} l - \tan\left(\frac{\omega}{c_1} l\right)}{\frac{\omega}{c_1} l \cdot \tan\left(\frac{\omega}{c_1} l\right) + 1} \cos\left(\frac{\omega}{c_1} x\right) \right\} \sin(\omega t + \varphi)$$

この上式を零とおいて求められる (15) 式によって算出される。

$$\therefore x_n = \frac{\frac{\omega}{c_1} l - \tan^{-1} \frac{\omega}{c_1} l}{\frac{\omega}{c_1}} \quad \dots\dots\dots (15)$$

(12) 式によって能率的に振動するように計算されたホーンによって構成される第 2 図に示すバイト縦振動系

を(15)式で計算される直線形ホーンの振動節および磁わい振動子の振動節によって、それぞれの工作機械に対する刃物台に剛性をもたせて取付け得る。このホーンによっても刃物台を構成せしめ得ることがわかる。

3. ねじり振動を利用するときの 切削工具振動系形状の解析

中ぐり用バイト、ドリル、リーマなどの場合には、第3図のようにしてねじり振動を利用して、それぞれの切刃を切削方向と同方向に超音波振動せしめる。この場合にも振幅を拡大して使用する必要がある。そのために縦振動同様、振幅拡大用ホーンを必要とする。

3.1 指数関数形ホーン 第3図において①は切削工具であるバイト、②は振幅拡大用ホーン、③はねじり振動伝達軸、④、⑤はねじり振動を生ぜしめる振動源である縦振動磁わい振動子である。

このホーンにねじり振動を与えるには、この他いろいろの方法があるが、ここでは図のごとき装置の場合を引用して形状決定式を求めていく。

d_1 : ねじり振動伝達軸と接着側のホーン直径, I_{p1} : その慣性極モーメント ($=\pi d_1^4/32$), d : 接着側端面より x なる点のホーン直径, I_p : x なる点の慣性極モーメント, d_2 : ホーン先端の直径, I_{p2} : その慣性極モーメント, I_{p3} : バイトなどの切削工具の慣性極モーメント, ρ_1 : ホーン材の密度, ρ_2 : バイトなどの切削工具の密度, G_1 : ホーン材の横弾性係数, G_2 : バイトなどの切削工具の横弾性係数, s_1 : ホーン材中の音速 ($=\sqrt{G_1/\rho_1}$), s_2 : バイトなどの切削工具材中の音速 ($=\sqrt{G_2/\rho_2}$), a : バイトなどの切削工具材の長さ, l : ホーンの長さ, L : ねじり振動伝達軸の長さ, θ_1 : ホーンの角変位, θ_2 : バイトなどの切削工具の角変位とすれば、ねじり振動の一般基礎式は

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} = \frac{1}{\rho I_p} \frac{\partial}{\partial x} \left(G I_p \frac{\partial \theta}{\partial x} \right)$$

ホーンにおいて、ホーン断面がいま $I_p = I_{p1} e^{-2mx}$ の関係で変化しているとすれば、上式は次のように展開される。

$$\frac{\tan \left(\sqrt{\frac{\omega^2}{s_1^2} - m^2} \cdot l \right) \frac{\omega^2}{s_1^2}}{\frac{\omega}{s_2} \tan \left(\frac{\omega}{s_2} a \right) \left\{ m \tan \left(\sqrt{\frac{\omega^2}{s_1^2} - m^2} \cdot l \right) - \sqrt{\frac{\omega^2}{s_1^2} - m^2} \right\}} = \frac{G_2 \cdot I_{p3}}{G_1 \cdot I_{p1}} \quad (18)$$

この(18)式によって、それぞれの切削工具を能率的に超音波振動せしめるねじり振動振幅拡大用ホーンの長さ l を算出することができる。

次にねじり振動伝達軸については、すでに周知のごとく G , ρ , I_p が一様であるから次の関係式で求められる。

第3図 指数関数形ねじり振動用ホーン

$$\frac{\partial^2 \theta_1}{\partial t^2} + 2ms_1^2 \frac{\partial \theta_1}{\partial x} - s_1^2 \frac{\partial^2 \theta_1}{\partial x^2} = 0$$

このホーンも縦振動同様に、ある固有振動数をもって、ある正規振動形で調和振動をすると仮定して、その常微分方程式をとくと

$$\theta_1 = e^{mx} \left\{ A \sin \sqrt{\frac{\omega^2}{s_1^2} - m^2} \cdot x + B \cos \sqrt{\frac{\omega^2}{s_1^2} - m^2} \cdot x \right\} \sin(\omega t + \varphi) \quad (16)$$

切削工具の直線部分に対しては $m=0$ として得られる(17)式となる。

$$\theta_2 = \left(C \sin \frac{\omega}{s_2} x + D \cos \frac{\omega}{s_2} x \right) \sin(\omega t + \varphi) \quad \text{ただし } l \leq x \leq l+a \quad (17)$$

この(16), (17)式に境界条件を代入してさらに展開する。

$$x=0 : \quad \frac{\partial \theta_1}{\partial x} = 0$$

$$x=l : \quad G_1 I_{p2} \frac{\partial \theta_1}{\partial x} = G_2 \cdot I_{p3} \frac{\partial \theta_2}{\partial x}$$

$$\theta_1 = \theta_2$$

$$x=l+a : \quad \frac{\partial \theta_2}{\partial x} = 0$$

結果において(18)式が得られる。

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} = \frac{G}{\rho} \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2}$$

両端自由の境界条件を入れて

$$\omega = n \frac{s}{L} \pi$$

一般に $n=1$ を用いることにして

$$L = \frac{1}{2f} \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad \dots\dots\dots (19)$$

所定の振動数 f , 使用する材料が決まれば長さ L が (19) 式によって求められる。

このねじり振動系の取付けに必要な振動節の位置は次のようにして求められる。

すなわち, ホーンについては

$$x_n = \frac{\tan^{-1} \frac{1}{m} \sqrt{\frac{\omega^2}{s_1^2} - m^2}}{\sqrt{\frac{\omega^2}{s_1^2} - m^2}} \quad \dots\dots\dots (20)$$

ねじり振動伝達軸の振動節は全長の中心の位置に生ずる。その位置を端面より x_m とすれば

$$x_m = \frac{1}{4f} \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad \dots\dots\dots (21)$$

このようにして設計される振動系に実際にねじり振動を与えるには, ねじり振動伝達軸の一端外周にその軸外周接線方向に二つの縦振動磁わい振動子を相対して接着し, これに所定の超音波振動所定電流を供給すると, 第3図に示すバイトは円周方向に超音波振動する。

このようにして切刃を超音波振動させ, その振動方向が切削方向と同方向となるように振動節を利用し, それぞれの工作機械に取付けて切削加工を実施することができる。

3・2 直線形ホーン (18) 式と (5) 式とを比べると $\omega/c \rightarrow \omega/s$, $s \rightarrow I_p$, $E \rightarrow G$ の各項が異なるだけで式の配列は一致している。

したがって, ただちに直線形ねじり振動用ホーンの形状決定が求められる。

$$\begin{aligned} & \tan \left\{ \frac{\omega}{s_1} (l-b) \right\} \left\{ b \cdot l \frac{\omega^2}{s_1^2} + 1 \right\} - \frac{\omega}{s_1} (l-b) \\ & b \frac{\omega}{s_2} \left(\tan \frac{\omega}{s_2} a \right) \left\{ \frac{\omega}{s_1} l - \tan \frac{\omega}{s_1} (l-b) \right\} \\ & = \frac{G_2 I_{p2}}{G_1 I_{p1}} \quad \dots\dots\dots (22) \end{aligned}$$

ホーン自身の場合には

$$\tan \frac{\omega}{s_1} (l-b) = \frac{\frac{\omega}{s_1} (l-b)}{b \frac{\omega^2}{s_1^2} l + 1} \quad \dots\dots\dots (23)$$

この直線形ホーンの振動節の位置は

$$x_n = \frac{\frac{\omega}{s_1} l - \tan^{-1} \frac{\omega}{s_1} l}{\frac{\omega}{s_1}} \quad \dots\dots\dots (24)$$

この直線形ホーンを使用する場合には, (22), (19) 式によって設計される振動系を (24), (21) 式によって求められる振動節で, それぞれの工作機械に固定して切削加工を行なわせしめ得る。

以上の諸式によって, 切削工具を超音波振動切削に耐え得るように能率的に振動せしめ得る, 刃物台の主要部の形状設計要領が明らかになった。

次にこれらの解析結果を利用して, 希望する振動数に切削工具を振動せしめ得るかどうか具体的に検討する。

4. 解析結果の検討

4・1 超音波ねじり振動ドリル 実吉とともに精機学会で発表した⁽⁴⁾穴あけに関する研究に際して, (18) 式より (21) 式を用いて直径 4 mm, 長さ 40 mm のドリルを振動数 20 000 c/s になるように設計したが, その誤差を $\pm 2\%$ 以内におさめてねじり振動ドリル振動系を構成せしめ, 所定の穴あけ実験を試みる事ができた。

4・2 超音波縦振動バイト 第3報の基礎実験に用いる各バイトに対する刃物台を, 指数関数形ホーンによって構成した結果で検討する。

第1表に高速度鋼完成バイト 2/8 in, 3/8 in, 5/8 in に対する (5) 式, (7) 式を用いての結果を示す。この

第1表 3種類の高速度鋼バイトに対する指数関数形ホーンの計算値例

振動数 kc/s	D ₁ mm	D ₂ mm	l mm	m 1/cm	x _n mm	D _n mm	バイト
10	30	10	254	0.043 2	105.6	19.01	II
20-A	30	10	117	0.094 0	52.1	18.38	II
20-B	30	10	131.2	0.083 8	53.3	19.19	III
20-C	35	15	99.3	0.085 2	53.1	22.22	I
30	30	10	71	0.155	34.1	17.68	II
40	30	10	47.4	0.232	25.1	16.80	II
50	30	10	34.7	0.317	19.6	16.11	II

ホーンに所定のバイトを銀ろう付し、一端に磁わい振動子をハンダづけして第4図のように振動節を固定する。そして金属顕微鏡とストロボライトでバイト切刃の振幅を測定してみる。

その結果は銀ろう付の影響や工作精度などの影響もはいるが、だいたい $\pm 2\%$ くらいの誤差で発振せしめることに成功した。しかし、バイトを研削したり、または肉づけしたりして所定振動数に共振せしめることができた。そのバイト振幅は励振電流を加減して任意に調整できる。第5図にバイトIIを用いたときの励振電流とバイト切刃の振幅との関係を示す。

このバイトの振動波形を電気容量変化を利用して、ブラウン管オシロスコープで観測してみるに、正しく正弦波形であることを確認した。

以上この本報の解析によって各バイトをそれぞれの振動数に振動させ、超音波振動切削を実施し得る体勢

第4図 バイトの振幅測定装置

第5図 励振電流と振幅との関係

をととのえることができるようになった。またこれらの諸式によって他の切削工具に対する具体的装置もいろいろ検討することができるようになった。その二、三の成果についてはすでに発表されている^{(6)・(8)}ところである。

最後に本報計算結果によって第3報に用いる旋削実験装置の刃物台の具体的構造を示す。

第6図がその側面図で、第7図は第6図の水そう②

20 000 c/s 用水そうに固定したバイト振動系

30 000 c/s 用水そうに固定したバイト振動系

第6図 20 000 c/s, 30 000 c/s 用バイト振動系および取付装置の具体例

第7図 旋削実験装置

の詳細寸法を記載したものである。この各寸法でわかるように振動数 20 000 c/s, 30 000 c/s, 40 000 c/s の刃物台の大きさは、4 ft 旋盤に対して適当な使いやす形状を有する。

5. む す び

本研究で超音波振動切削の具体的実施装置の主要部を解析した。そして振動数が高いので振動系全体の構造が小さくなり、しかもその振動系を固定に便利な振動節が存在し、これを利用して静的に固定したり、また回転せしめることも可能な、従来の工作機械に対し

ても、また新しく工作機械を製作する場合でもいずれも均衡のとれた刃物台となり得ることを確認した。

文 献

- (1) 隈部, 益子, 機械学会論文集, **24**, 138 (昭 33-2), 109.
- (2) 隈部, 本論文集 1396 ページ.
- (3) 谷口, 超音波加工法, 精密工学講座Ⅱ-6 (昭 33), 日刊工業新聞社.
- (4) 実吉, 隈部, 精機学会創立 25 周年記念学術講演会前刷, 講演番号 222 (昭 33-10).
- (5) 隈部, 機械学会論文集, **25**, 154 (昭 34-6), 479.
- (6) 隈部, 高橋, 機械学会論文集, **25**, 154 (昭 34-6), 472.
- (7) 隈部, 機械学会論文集, **26**, 166 (昭 35-6), 827.
- (8) 隈部, 本論文集 1414 ページ.

621.911.018:66.084:534-8

超 音 波 振 動 切 削 に 関 す る 研 究*

(第3報, 超音波振動切削機構の解析)

隈 部 淳 一 郎**

Study on Ultrasonic Cutting

(3rd Report, An Analysis of the Mechanism of Ultrasonic Cutting)

by Junichiro KUMABE

The cutting mechanism in ultrasonic cutting is considered in this report and the main results are as follows :

- 1) Amplitude and frequency have relations with the cutting speed and the critical cutting speed $V_c = 0.376 af$ m/min (a : amplitude micron, f : frequency kirocycle).
- 2) Cutting time t_c in one cycle is very short. (for example $t_c = 10^{-6}$ s)
- 3) Cutting length l_T in one cycle is V/f . (for example $l_T = 0.08$ micron)
- 4) And at a cutting speed lower than this critical cutting speed, the cutting tool is separated from the chip in each cycle and is cooled by air or can be lubricated exactly by using the usual lubricant without special cutting fluid.

1. 緒 言

第1報⁽¹⁾において明らかにされた超音波振動切削の円滑な実施のためには、第2報⁽²⁾のいかにして能率的に切削工具を振動せしめるかという、刃物台の構造に関する研究に引続き、本切削法の切削機構を明らかにしておかなければならない。

しかしながら、振動させない普通の切削加工においてさえ、いまだにその決め手ともいふべき理論的解明

がなされていないとき、この切削機構をいずれの方向から、いかなる手段によって解析していったらよいのか全然見当がつかなかったため、その解析への糸口をつかむための基礎実験を進めた結果、それらの分析、検討、吟味によって超音波振動切削の機構をある程度解明し、この切削法を具体的に発展せしめるための必要な諸事項を明らかにすることができた。

ここに、本切削機構を解明するにいたった代表的な基礎実験と、それらに基いて解析した本切削機構を説明し、その振動数、振幅がどのような関係を有するか、また本機構解析の結果明らかにされた本切削法の特徴について詳述する。

* 昭和 33 年 11 月 6 日 宇部臨時大会講演会において講演、原稿受付 昭和 36 年 2 月 27 日。

** 正員、東京工業大学(東京都目黒区大岡山 1)。