研 究

超音波振動研削の研究 (第1報)*

——振動方向と研削量の関係について——

田中 行雄** 矢野 章成** 新家 昇***

Study on Ultrasonic Grinding (1st Report)

——On the Relations between the Vibrational Direction and Stock Removal——

Yukio TANAKA, Akishige YANO, Noboru SHINKE

The effects of vibrational direction in ultrasonic grinding by using the ultrasonically vibrated workpiece were investigated (amplitude : max. 20μ , frequency : 26kc/s , workpiece : austenitic stainless steel).

In this paper, the relations between the stock removal and grinding conditions are described. The main results are as follows.

(1) Regardless of vibrational direction in ultrasonic grinding, the stock removal is larger than that in conventional grinding method.

(2) The experimental relation between the stock removal and normal feeding force is expressed by the equation $V_m \propto P$, where V_m : stock removal in ultrasonic grinding, P : normal feeding force.

(3) The stock removal in ultrasonic grinding is influenced by the speed ratio $\pi af/v_w$ and vibrational direction, where a : amplitude, f : frequency, v_w : rotating speed of grinding wheel.

(4) The critical grinding speed occurs in using the workpiece that vibrates to the grinding direction. Nevertheless, the stock removal at the higher grinding speed than the critical one is larger than that in conventional grinding method.

1. 緒 言

従来から超音波加工法は硬脆材料の穴あけ加工などにかなり用いられていることは周知のとおりであるが、最近では砥石または被削材に超音波振動を与え、研削能率の向上、研削抵抗および研削温度の低下などの効果をねらった超音波振動研削が注目をあびるようになってきた。さて、研削加工に超音波エネルギーを用いる際にまず考慮しなければならないのは、その超音波振動を砥石に与えるか被削材に与えるか、および振動方向をいかなる方向にするかということである。なぜならば、それらによって研削機構が異なってくるからである。超音波振動の振動方向としては研削方向に対して左右方向、同一方向および垂直方向（以下、これらの方向の超音波振動を用いた場合をそれぞれ左右方向振動研削、同一方向振動研削および垂直方向振動研削と称することにする）が考えられるが、多くは左右方向の超音波振動が用いられている^{1), 2)}。一方、Colwell³⁾は砥石半径方向の超音波

振動を被削材に与えて平面研削をおこない種々興味ある結果を報告しているが、振動方向についての検討はやはりおこなっていない。

以上のように、超音波振動研削の研究に関しては数量的には少なくないが、上述の振動方向が研削性能に及ぼす影響についての報告はほとんどないように見受けられる。そこで本報では以上の観点によって、まず、振動方向が研削量に及ぼす影響について検討することにした。

2. 研削距離について

被削材に与える超音波振動の振動方向、振幅、振動数および砥石周速度が変化すれば砥石と被削材の相對運動軌跡が異なり研削長さも変化してくる。したがって、研削量に及ぼす研削条件の影響を正しく握するためには、研削距離が一定になるようにして実験をおこない、考察するのがより妥当だと考えられる。すなわち、左右方向振動研削における砥粒の運動軌跡は超仕上の場合（図1—a）と同様と考えられるので、 f : 被削材振動数、 a : 被削材振幅、 D : 砥石直径、 N : 砥石回転数、 β : 振動子コイルに流れる電流の回転角とすれば、砥粒の平均研削速度 $\bar{v}$ は

*原稿受付 昭和43年5月30日。昭和43年度春季大会学術講演会（昭和43年4月5日）にて発表。

**正会員 関西大学工学部

***学生会員 関西大学大学院（吹田市千里山17）

図1 振動方向と砥粒運動軌跡の関係

$$\bar{v} = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi/2} v \cdot d\beta = \frac{2}{1000} \sqrt{(DN)^2 + (af)^2} \times \int_0^{\pi/2} \sqrt{1 - \sin^2 \theta \cdot \sin^2 \beta} \cdot d\beta$$

となる。ただし、 θ は最大傾斜角で、 $\tan^{-1}(af/DN)$ で与えられる。したがって、研削時間を τ とすると左右方向振動研削における研削距離 L_c は

$$L_c = \bar{v} \times \tau \quad (1)$$

で与えられる。つぎに、同一方向振動研削(図1-b)の場合には被削材は正弦波形で振動しているから砥石の周速度を $v_w (= \pi DN)$ とすると、砥粒と被削材の相対速度 v_r はつぎのようになる。

$$v_r = \pi af \cos 2\pi f \tau + v_w$$

また、 $v_r = 0$ となる時間 τ_1 は

$$\tau_1 = \frac{1}{2\pi f} \cdot \cos^{-1} \left(\frac{-v_w}{\pi af} \right)$$

したがって、同一方向振動研削における研削距離 L_l は次式により求まる。

$$L_l = 2 \left[\int_0^{\tau_1} v_r \cdot d\tau + \left[\int_{\tau_1}^{1/2f} v_r \cdot d\tau \right] \cdot \tau \right. \\ \left. = \left[\frac{2}{\pi} \left\{ v_c \cdot \sin \left(\cos^{-1} \frac{v_w}{v_c} \right) - v_w \left(\cos^{-1} \frac{v_w}{v_c} \right) \right\} + v_w \right] \cdot \tau \right. \quad (2)$$

ただし、 $v_c = \pi af$

図2 実験装置

ここで、 $v_w \geq v_c$ のとき

$$L_l = v_w \cdot \tau \quad (3)$$

すなわち、砥石周速度 v_w が臨界研削速度 v_c よりも大きくなると研削距離は超音波振動の影響を受けなくなり、無振動研削の場合と同様に砥石周速度で決まる。一方、垂直方向振動研削(図1-c)の研削距離 L_v は左右方向振動研削の場合と同様と考えられる* ので(1)式より求めることができる。

3. 実験装置および実験方法

実験装置は図2に示すようにフライス盤の主軸に取付けたカップ形砥石の研削面に、ホーン先端にねじ止めた被削材を定圧で押付けて研削(プランジカット方式)がおこなえるようにしたものである。超音波ヘッド支持台は玉軸受ガイドで案内されるので、被削材押付圧力は加圧用錘を調整することによって変化できる。また、超音波ヘッドの取付位置を変えることによって左右方向振動研削、同一方向振動研削および垂直方向振動研削がそれぞれおこなえる構造になっている。研削量はダイヤルゲージにより被削材長さの減量で測定した。この際、測定値としては砥石の損耗および研削ヘッド主軸の熱膨張による砥石面の変位を同時に測定することになるが、前者は被削材減量の1%以下(被削材面積にくらべて砥石作用面積を十分大きくした)であり、後者は主軸の空転により十分安定させたのち研削実験に移るから問題はないと考えられる。ただし、無振動研削および垂直方向振動研削の場合には実験装置の構造上被削材重量の減量を測定し、これを被削材長さに換算した。なお、被削材としては18-8不銹鋼(SUS27)を用い、これを図3に示す形状に加工したのち、溶体化処理を施した。実験条件を表1に示す。

4. 実験結果とその考察

超音波振動研削における砥粒と被削材の相対運動は超

* いま簡単のため砥粒と被削材が常に接触の状態にあるものとする。

音波振動の振動方向, 被削材振幅, 振動数 (本報では一定に保った) および砥石周速度によって特徴づけられるので, これら条件と研削能率 (単位研削距離あたりの研削量) の関係を求めた。

4.1 研削距離 L の影響

図4は研削距離が研削能率に及ぼす影響を示したものである。超音波振動研削では被削材振幅 (振幅の影響については4.3で述べる) が小さくてもその研削能率は無振動研削の場合よりも大きい。このように, 超音波振動研削において研削距離 (研削時間) が長くなっても十分研削量が存在し得るのは, 被削材に超音波振動を与えることによって被削材があたかもドレッサの役目を果たしながら研削される結果, 絶えず鋭い砥粒切れ刃で研削がおこなわれているためであり, また砥石に目づまりが起これおらないことを意味するものである。なお, 研削初期に高い研削能率を示すことは砥粒による加工一般についてよく経験されることであるが, 左右方向振動研削および同一方向振動研削の場合にも同様の傾向が認められる。ところが, 垂直方向振動研削の研削能率は逆に研削初期にやや低く, しかも前二者よりも早く安定状態に達している。これらのことは, 砥石作業面に作用する超音波振動の振動方向に起因するものと考えられる。すなわち, Colwell²⁾が砥石作業面に垂直な方向の超音波振動

を被削材に与えて平面研削をおこなった結果によると, 砥石の損耗が多く (脱落よりも破砕が多い), 特にドレッシング直後の砥石作業面の変化が著しいと報告していることから, この垂直方向振動研削による場合が最も砥石のドレッシング効果の著しいことが推察できる。なお, 研削後の砥石作業面を顕微鏡にて観察したところ無振動研削で見られるような砥石の目づまりはほとんど認められなかった。この目づまりが起これにくという現象はすでに指摘されており^{2), 5), 6)}, 超音波振動を研削に利用した場合の大きな特徴であろう。以上述べたように研削条件によって研削距離が変化し, かつ研削能率が研削初期においてかなり急激に変化することが明らかになったので, 研削能率と研削諸条件の関係を調べる以下の実験においては, 研削距離が一定になるように研削時間を選び, しかも研削能率がほぼ安定したのちの状態での研削量を測定した。

4.2 被削材押付圧力 P の影響

図5は砥石周速度を一定とし, 被削材押付圧力を $P = 0.4 \sim 3.0 \text{ kg/cm}^2$ の範囲で変化させた場合の研削能率の変化を両対数線図で示したものである。なお, これは砥石周速度を $v_w = 18 \text{ m/min}$ とした場合の結果であるが, 砥石周速度が速い場合においても同様の傾向が認められる。これらの実験値を直線でつらねるとそのこう配はほぼ1となり, 超音波振動研削の研削能率 V_m と被削材押付圧力 P の間には, $V_m \propto P$ の関係が存在すること

表1 実験条件

研削条件	砥石	WA100L _m V
	被削材	SUS27 ($\rho \div 7.93$ $H_V \div 180$)
	被削材振動数	$f = 26 \text{ kc/s}$
	被削材振幅	$a = 0 \sim 20 \mu$
	被削材押付圧力	$P = 0.4 \sim 3.0 \text{ kg/cm}^2$
	砥石周速度	$v_w = 6 \sim 320 \text{ m/min}$
目直し条件	研削液	軽油+マシン油 (4:1) 3ℓ/min
	砥石周速度	320 m/min
	送り速度	0.3 m/min
	切込み	20 μ
目直し条件	切込み回数	2回

図3 被削材の形状

図4 研削距離と研削能率の関係

図5 被削材押付圧力と研削能率の関係

図6 被削材振幅と研削能率の関係

がわかる。田中、井川⁷⁾は砥粒切れ刃が円すい形をなして研削している場合の研削量 V と被削材押付圧力 P の間には $V \propto P$ の関係があり、砥粒切れ刃が球形の場合には $V \propto P^{1.25}$ の関係があると述べていることを考え合わせれば、超音波振動研削における砥粒切れ刃先端は研削能率が安定した時期でも円すい形をなしているものと考えられる。このことは、被削材に与える超音波振動の大きな加速度によって砥粒の微小破砕⁸⁾がおこなわれていることに起因するものである。

4.3 被削材振幅 a の影響

図6は被削材振幅と研削能率の関係を示したものであ

る。左右方向振動研削の研削能率は被削材振幅の増加とともに増しているが、 $a \approx 20\mu$ 付近で若干減少する傾向が認められる。これは砥石周速度、被削材振幅および振動数によって二次的に決まる最大傾斜角が多分に影響しているためと思われる。また、同一方向振動研削の場合にも左右方向振動研削とほぼ同様の傾向を示すが、この場合 $a \approx 20\mu$ 付近で研削能率が低下していないのは、この被削材振幅では同一点研削回数*がほとんど変化しないためである。これらに対し、垂直方向振動研削の研削能率は被削材振幅の増加ともなって減少しており、前二者の場合とは逆の傾向を示している。これは砥粒が被削材に食込む角度（最大食込角 $\phi = \tan^{-1} \pi a f / v_w$ ）が影響しているものと考えられる。なお、これら最大傾斜角、同一点研削回数および最大食込角が研削能率に及ぼす影響については4.5で詳しく述べる。

4.4 砥石周速度 v_w の影響

超音波振動の振動方向および被削材振幅が変化することによって、砥石周速度が研削能率に及ぼす影響は変わってくる。図7はその状態を示したもので、砥石周速とを高くすることによって必ずしも研削能率の増大をみるに限らず、振動方向および被削材振幅と密接な関係に度あることがわかる。すなわち、左右方向振動研削における研削能率は砥石周速度の増大とともに増すが、その増加の割合は砥石周速度の増加とともに減少する。また、被削材振幅の増大ともなって最大研削能率を得る砥石周速度は高速側へ移行する傾向が認められる。このように、被削材振幅の大きさによって研削能率がよくなる砥石周速度の存在することがわかる。同一方向振動研削の場合にも研削能率は被削材振幅および砥石周速度と密接な関係にある。すなわち、 $a = 5\mu$ の場合には砥石周速度が小さい $v_w = 6\text{ m/min}$ 付近でもまだ研削能率は増加の傾向を示すが、被削材振幅が大きい場合には明らかに減少している。これは砥石周速度が遅く、しかも被削材振幅が大きい場合には研削距離が一定であるにもかかわらず被削材の同一点を研削する回数が多くなるためと思われる。また、この研削様式においては被削材振幅および振動数で決定される臨界研削速度 ($v_c = \pi a f$) の存在することが認められる。しかし、砥石周速度が臨界研削速度を越えた場合でも無振動研削にくらべてはるかに高い

* 同一方向振動研削における砥石1回転について、1個の砥粒が被削材の同一場所を研削する回数

図7 砥石周速度と研削能率の関係

図8 速度比（最大傾斜角）と研削能率の関係

研削能率を有し、しかもその傾向は被削材振幅の大きいほど顕著であることがわかる。一方、垂直方向振動研削の場合には砥石周速度の増大とともに研削能率は増加するが直線的でなく、その増加の割合は砥石周速度の増大とともに減少する傾向を有し、被削材振幅の小さいほど著しい。砥石周速度が低い場合の研削能率が被削材振幅の小さいほど大きくなっているのは、砥石周速度が小さいときには被削材振幅によって砥粒の食込角が非常に大きくなり、しかも無振動研削にくらべて研削速度が大きく変化するためと考えられる。

4.5 速度比 $\pi af/v_w$ の影響

超音波振動の振動方向と速度比によって二次的に決ま

る最大傾斜角、同一点研削回数および最大食込角が研削能率に多分に影響するものと考えられる。すなわち、超音波振動の振動方向が変化することによって速度比が研削能率に及ぼす影響は変わってくる。

4.5.1 左右方向振動研削

図8は左右方向振動研削における速度比と研削能率の関係を示したものである。速度比の増大にともなって研削能率は増加するが直線的でなく、 $\pi af/v_w \approx 3.5$ すなわち最大傾斜角 $\theta \approx 75^\circ$ 付近で最大となり、それ以後は急激に減少している。この

理由は次のように考えられる。すなわち、最大傾斜角が小さい場合には個々の砥粒およびそれぞれの砥粒相互間の運動の多重性が減少し、いわゆる無振動の場合に漸近するために研削能率は低下する。また、最大傾斜角が大きすぎると砥粒の運動の多重性はよくなるが、砥粒相互間の空振り現象が促進される結果、研削能率は減少してくるものと思われる。ただし、 $a=5 \mu$ の場合には $\theta \approx 55^\circ$ 付近で最大の研削能率を示している。これは被削材振幅が小さくても砥石周速度が低いときには最大傾斜角が大きくなるが、この場合、振幅が砥粒押込部の最大直径よりも小さくなるために砥粒の有効な研削作用が減少するためと考えられる。

4.5.2 同方向振動研削

同方向振動研削の研削能率と速度比の関係を図9に示す。図7で説明したように、砥石周速度が臨界研削速度を越えた場合 ($v_w \geq v_c$) の研削能率はほとんど変化しておらず、臨界研削速度の存在することが明らかである。また、臨界研削速度を越えた場合でも無振動研削よりはるかに大きな研削能率が得られる。このことは、砥石周速度が臨界研削速度を越えた場合でも超音波振動による砥石のドレッシング効果が持続されていることを意味するものであろう。砥石周速度が臨界研削速度以内 ($v_w < v_c$) の場合には速度比の増大とともに研削能率は増加しているが、同一点研削回数 $N \approx 3$ 回付近で最大となりそれ以後は減少する傾向が認められる。これは速度比を大きくすればそれだけ超音波振動の振動効果はよくなるのであるが、一方、同一点研削回数が多くなる結果、研削距離が一定であると考え合わせれば研削能率が低下してくるのは当然と思われる。

図9 速度比(同一点研削回数)と研削能率の関係

4.5.3 垂直方向振動研削

垂直方向振動研削の場合には図10に示すように速度比が小さくなるにしたがって研削能率は増大し、最大食込角 $\phi \approx 10^\circ$ 付近ではほぼ最大の研削能率を示している。この最大食込角が小さいほど研削能率のよくなることについては、たとえば谷口⁹⁾は黄銅、アルミニウム、鉛などの塑性材料を噴射加工した場合、噴射角度を小さくした方が加工能率がよくなると報告していることから考えれば——もちろん遊離砥粒と固定砥粒の相違はあるが——本実験に用いたステンレス鋼のような塑性材料は食込角を小さくして、なるべく被削材表面に平行な方向から研削せしめた方が研削能率が大きくなるものと推察される。

以上述べたように、速度比を大きくすることによって必ずしも研削能率の増大をみるとは限らず、超音波振動の振動方向(研削様式)によってそれぞれ異なった傾向を示すことがわかる。したがって研削能率のみの観点からいえば、速度比が比較的大きい場合には左右方向振動研削が適し、逆に速度比が小さいときには垂直方向振動研削が有利であるといえる。

なお、超音波振動の振動方向(研削様式)によって仕上面あらさ、砥石の損耗状態、仕上面の耐磨耗性などの諸特性に興味深いものがあるが、これらについては別報で明らかにしたいと思う。

5. 総 括

以上、超音波振動研削における振動方向(研削様式)と研削能率の関係を調べた結果を要約すると次のようである。

- 1) いずれの方向の超音波振動研削においても無振動研削よりも大きな研削能率が得られる。
- 2) 超音波振動の振動方向に関係なく、研削能率 V_m と被削材押付圧力 P の間には $V_m \propto P$ の関係が存

図10 速度比(最大食込角)と研削能率の関係

在する。

- 3) 超音波振動研削の研削能率は振動方向と速度比に大きく影響される。すなわち、左右方向振動研削についていえば最大傾斜角 $\Theta \approx 75^\circ$ (被削材振幅が 10μ 以上の場合) で、同一方向振動研削の場合には同一点研削回数 $N \approx 3$ 回でそれぞれ最大の研削能率が得られる。また、垂直方向振動研削においては最大食込角 $\phi \approx 10^\circ$ 付近で研削能率はほぼ最大となる。
- 4) 同一方向振動研削においては臨界研削速度が認められる。しかし、砥石周速度が臨界研削速度を越えた場合でも無振動研削にくらべてはるかに高い研削能率が得られる。
- 5) 研削能率のみの観点からいえば、速度比が比較的大きい場合には左右方向振動研削が適し、逆に速度比が小さいときには垂直方向振動研削が有利であるといえる。

おわりに、本実験の遂行にあたり種々便宜をいただいた大阪金剛製砥(株)に感謝の意を表します。

文 献

- 1) 隈部, 伊藤: 超音波砥石による内面研削に関する研究(第2報), 日本機械学会論文集, 27, 181 (1961) 1412.
- 2) 田中, 矢野: 超音波振動砥石による精密仕上げの研究(第1報), 精密機械, 29, 3 (1963) 232.
- 3) L.V. Colwell: The Effects of High-Frequency Vibrations in Grinding, Trans. ASME, 78, 4 (1956) 837.
- 4) 松井: 平面の超仕上に関する研究(第1報), 精密機械, 22, 7(1956) 309.
- 5) J. Peacock: Ultrasonics ups Grinding Efficiency., Amer. Machinist, 105, 6 (1961) 124.
- 6) 田中, 津和, 矢野: 超音波振動砥石による精密仕上げの研究(第3報), 精密機械, 31, 4 (1965) 307.
- 7) 田中, 井川: ダイヤモンド砥石による研削に関する研究(第1報), 精密機械, 26, 3 (1960) 149.
- 8) 矢野: 超音波振動砥石の砥粒切れ刃の挙動について, 砥粒加工, 4, 9 (1967) 327.
- 9) 谷口, 金丸, 池赤: 液体ホーニングによる脆性物質の加工に就て, 山梨大学工学部研究報告, 6 (1955) 51.