研 究

高周波振動する模型単粒による
微小切削について*

—高周波振動砥石による超仕上の基礎研究—

岡 本 隆** 小 川 昌 平**

On the Small Depth Cutting with a Vibrating Model Grain

—Fundamental Study on High Frequency Vibration Superfinishing—

Takashi OKAMOTO, Shohei OGAWA

The present paper describes on the vibration small depth cutting performed by one model grain for the purpose of analysing the performances of high frequency vibration finishing. In this study, the characteristic phenomena that the grain passes over again the groove already cut and cuts the rising part which was built up at the both sides of groove were analysed, then the cutting resistance and the wear of model grain were measured.

From the analysis about a cutting locus and the experimental results, we can explain the removed volume of work piece and the loss of stone in the high frequency vibration superfinishing and obtain a guide to determine the optimum conditions.

1. 緒 言

砥石に従来の超仕上法で用いられている振動数よりも、はるかに高い周波数の振動を与えて金属材料の表面仕上を行なえば、目づまりが少なく、短時間で良好な仕上面が得られることがすでに指摘されている¹⁾²⁾³⁾。しかし、従来の研究では、振動数を固定し、仕上諸条件をそれぞれ単独に変化し、実験的にこれらの影響を論じているだけで、超仕上で問題になる切削方向角をも含めて、砥石を構成する砥粒の画く軌跡の影響が検討されていない。

そこで筆者らは、模型単粒を用いて微小切込みで振動切削を行なった場合の切削方向投影面積の変化を解析し、ついで工作条件を変化して切削軌跡を変えた実験を行ない、切削抵抗および摩耗量を測定し、さらに実際の砥石を用いて高周波振動超仕上を行ない、仕上量、砥石損耗量および表面あらさを測定して、前記実験の結果と比較した。

2. 実験装置および方法

図1は装置の概略図である。磁歪振動子①の

出力ホーン②の先端にとりつけられた工作物③は垂直方向に振動が与えられ、これらをのせたテーブル④に水平方向の送りが与えられる。単粒⑤はホルダ⑥の先端にとりつけ、振動方向と送り方向の切削抵抗はホルダにはられたひずみゲージ⑦によりシンクロスコープにて測定する。測定系の固有振動数は約50kcである。

被削材はS50Cで研削後に湿式ラッピングを行ない、あらさを約 0.5μ に統一した。模型単粒は焼入したSKH4 ($HRC=61$)を用い、頂角 120° の円すいとした。振動周波数は5, 10 および 20 kc, 振幅は $2\sim 20\mu$, 送り速度は150 mm/s, 切削幅はすべて 40μ にとった。

図1 実験装置の概要

*原稿受付 昭和43年8月10日。昭和43年度春季大会学術講演会(昭和43年4月6日)にて発表。

**正 会 員 京都工芸繊維大学工芸学部(京都市左京区松ヶ崎御所海道町1)。

図2 単粒の切削軌跡および切削抵抗

3. 単粒にかかる切削抵抗

単粒に片振幅 a 、周波数 f の縦振動を与え、送り速度 v で横方向に送ると、単粒の先端は図2のような正弦波形を描き、切削抵抗の作用方向が常に変化する。この場合切削方向角の最大値 $\theta_{\max}$ は

$$\theta_{\max} = \tan^{-1} \frac{2\pi af}{v} \quad (1)$$

以下とくに断らないかぎり、これを切削方向角として表わす。なお、この場合、図2に示すように振動方向切削抵抗 F_v は振動頂点で最小、中心で最大となり、送り方向切削抵抗 F_f は逆に振動頂点で最大、中心で最小となる。

これらの切削抵抗の変化は単純にそれぞれの方向の投影面積の変化から考えられるが、周波数が大きくなると空切削の現象が生じ、また、もり上り部を横切って切削

するなどのため、実際の変化は複雑になる。以下にこれらを解析して考察する。

4. 切込部の空切削についての検討

単粒の先端が正弦波形を描くとき、周波数が大きくなると既切削域を再度工具が通過する現象が起り、この部分で切削方向投影面積（以下投影面積と呼ぶ）が減少し、切削抵抗が低下する。筆者らはこれを空切削と名付けた。これを図3において説明する。単粒先端からある切込深さ h での平断面は半径 r の円で（以下これを単粒半径と呼ぶ）、通常の無振動切削では、この場合投影面積は三角形 $A_2B_2C_2$ である。高周波振動切削で単粒先端が $A \sim A_1 \sim A_2$ の正弦波形を描くとき、図3(a)において切削方向に直角な直径の両端 B, C 点はそれぞれ $B \sim B_1 \sim B_2, C \sim C_1 \sim C_2$ なる包絡線を描いて進む。いま先端が A_2 （位相角 $\pi/2$ ）にある場合、半径 r の円は B_1 点で包絡線と交わるが、 B_1B_2 は既切削域内にあるためこの部分では切削は行なわれず、実際の投影面積は斜線を施した部分に減少する。なお、図3(b)および(c)はそれぞれ位相角が $2/3\pi, \pi$ と進んだ場合で、投影面積が順次変化している様子がわかる。

つぎにこのような空切削を生ずる範囲を考える。図3のように座標をとれば、 B および C 点の軌跡は

$$y_B = a \sin \omega t - r \cos \theta, \quad x_B = vt \pm r \sin \theta \quad (2)$$

$$y_C = a \sin \omega t + r \cos \theta, \quad x_C = vt \mp r \sin \theta \quad (2')$$

ただし

$$\theta = \tan^{-1} \frac{2\pi af}{v} \cos \omega t \quad (3)$$

振動頂点および中心における単粒の切込深さでの断面の式は、位相角 $\pi/2$ および π 進む時間を $t_{\pi/2}, t_{\pi}$ として

$$(x - vt_{\pi/2})^2 + (y - a)^2 = r^2 \quad (4)$$

$$(x - vt_{\pi})^2 + y^2 = r^2 \quad (5)$$

(2), (4) 式, (2), (5) 式を同時に満足する点があれば、振動頂点および中心で空切削を生ずることになる。この場

図3 空切削の現象

図4 空切削による切削方向投影面積の変化

合、単粒半径と空切削を開始する位相との関係は(2)式を微分し、 $dx/dt=0$ とおくことにより、

$$r = \frac{v^2 + (a\omega)^2 \cos^2 \omega t}{a\omega^2 \cdot \cos \theta \sin \omega t} \quad (6)$$

また、空切削が終了する位相との関係は $x=v\pi/2$ の位置に B 点がくるときであるから

$$vt_{\pi/2} = vt - r \sin \theta$$

より

$$r = \frac{v(t - t_{\pi/2})}{\sin \theta} \quad (7)$$

さらに(6)式において $\omega t = \pi/2$ として求めた半径 r は空切削を生じない単粒半径 r_0 である。これは(3)式を用いて計算すれば

$$r_0 \leq \frac{v^2}{a\omega^2} \quad (8)$$

図4は振動の各位置での空切削による投影面積の変化を通常の処女切削の場合(図3の三角形 $A_2B_2C_2$) に対する比として示したもので、周波数が大きいほど、また切削方向角が大きいほど空切削の影響が大きくなる。また、同一切削方向角の場合には単粒半径が大きいほど空切削期間は長くなる。

なお、単粒を用い、送りを $5 \sim 150 \text{ mm/s}$ の範囲で切削して抵抗を測定した結果、投影面積にほぼ比例することが認められたので、以下に切削抵抗の大小を論ずる場合、この面積で比較検討することにする。

5. もり上り部切削についての検討

以上に空切削の影響を検討したが、実際にはもり上りを生じた既切削溝をある交差角 α で再度よぎることになる。このとき図5に示すように、単粒は既切削溝と点 P において交わるが、 α は θ_r を図のようにとれば、これは交点に対応する単粒中心 P_0 における切削方向角に等しいから

$$\alpha = 180^\circ - (\theta_r + \theta_{\max}) \quad (9)$$

θ_r はこの点での速度を v_r として交点の座標 x_r が求まれば(3)式より

図5 もり上り部の切削

図6 もり上り部の形状および切削方向

$$\theta_r = \sin^{-1} \frac{v_r t_r - x_r}{r}$$

このようなもり上りを生じた既切削溝を上述のように切削するが、この影響を調べるのに簡易化して、図6のような直線既切削溝を(9)式の交差角 α で切削するものとした。もり上り部を表面あらさ測定機を用いて観察した結果、本実験においては、送り速度に関係なくほぼ同一形状であることが認められたので、以下では近似的に図のような形(切削幅を 40μ に一定にしたとき、もり上り部は高さ 8.5μ 、底辺 14.5μ の三角形)とした。図7はこのような場合の処女切削に対する切込部およびもり上り部の投影面積の変化を別個に計算したものである。さらにこの両者を加えた全体の処女切削に対する投影面積の比が図8で、交差角が大きいほど大きくなっている。

図9はもり上り部を実際に切削して処女切削の場合に対する切削抵抗の増加率を求めたものである。切削方向角が大きいほど、すなわち交差角 α が小さいほど、もり

図7 切込部, もり上り部の切削方向投影面積比

図8 切込部, もり上り部を加え合わせた切削方向投影面積比

図9 切削抵抗増加率の測定結果

上り部の切削抵抗は増加する。図8では投影面積の最大は交差角が小さいほど減少しているが、図9の実際の抵抗測定結果では反対に増加している。これは単位投影面積当りの抵抗が切込部よりもり上り部の方が大きいからで、両方の投影面積を加えただけで、切削抵抗を論ずることは正しくないことがわかる。そこで、もり上り部の単位面積当りの抵抗と処女切削時のそれとの比 t を求め(図10)、もり上り部の投影面積 a_2 に乗じて、切込部投影面積 a_1 との和 $a = a_1 + ta_2$ と切込部の処女切削の場合の面積 a_0 との比を求める。このようにすれば、この値で空切削およびもり上り部切削を含めて処女切削の場合の比として、各条件での抵抗の大小を比較できる。

図11は振動中心において計算した a/a_0 を示したもの

図10 交差角ともり上り部切削抵抗比

図11 切削方向角と a/a_0 の関係

図12 切削方向角と振動方向および送り方向投影面積比

である。これより振動方向と送り方向に分けて、処女切削の場合に対する投影面積の比として示したものが図12である。

図 13 振動方向最大切削抵抗測定結果

図 14 送り方向切削抵抗測定結果

6. 切削抵抗の測定結果

図 13, 図 14 は振動方向および送り方向の切削抵抗を測定した結果である。振動方向については、周波数一定の場合、切削方向角の増加すなわち振幅の増加にともない、図 12 に示すように振動方向への投影面積が増加するため抵抗は大きくなる。周波数を変化させても切削方向角が一定であれば、投影面積は同じであるから、抵抗は変化しないはずである。ところが、周波数がきわめて大きくなると、前述の空切削やより上り部切削の影響などがあらわれるため切削抵抗は減少する。送り方向切削抵抗も同様に解析結果と同じ傾向を示している。

7. 単粒の摩耗に対する考察

図 15 は模型単粒の摩耗量を測定したものである。周波数が大きく、切削方向角が小さいほど摩耗量は少ない。同一切削方向角の場合には周波数が増加しても単粒の切削長さは同一であるのに、周波数が増加すると摩耗が少なくなるのは図 4 に示したように空切削期間が長いからである。

図 15 切削方向角と単粒摩耗量

(1) 振動周波数 f 一定 (2) 切削方向角 $\theta_{\max}$ 一定 (3) 振幅 a 一定

図 16 砥粒の切削軌跡

8. 砥石による高周波振動超仕上の実験結果

つぎに実際に砥石 (WA 600 Vit, 結合度 $R_H=50$) を用いて実験を行ない、仕上量、砥石損耗量を測定し、単粒による場合の結果と対比した。実験では砥粒軌跡を図 16 のように変化させた。すなわち

- (1) 振動周波数 f を一定にして、振幅 a 、切削方向角 $\theta_{\max}$ を変化させた場合
- (2) 切削方向角が一定になるように、周波数および振幅を変化させた場合
- (3) 振幅および送り速度を一定にして、周波数および切削方向角を変化させた場合

結果は表 1 のようで、図中の矢印の方向はそれぞれの値が大きくなることを示している。これに図 13 および図

表 1 砥石を用いての実験と単粒実験の比較

砥 粒 軌 跡	(1)	(2)	(3)
振動条件			
周波数 f	→ 定	→	→
振 幅 a	←	←	→ 定
切削方向角 $\theta_{\max}$	←	→ 定	→
砥石実験			
単位時間の切削長さ	←	→ 定	→
工作物仕上量	←	→ 定	→
砥石損耗量	←	←	←
単粒実験			
振動方向切削抵抗	←	←	←
送り方向切削抵抗	→	←	←
摩 耗 量	←	←	←

図 17 砥石による実験結果 (1)

14 に示した単粒での実験結果をあわせ示してある。

図 17 は軌跡 (1) の場合で、振幅を大きくすれば、単位時間での砥粒の切削長さが大になり、仕上量は大きくなる。砥石損耗量も振幅を大にすると増加するが、これは単粒での実験で振幅を大にすると抵抗は大きくなり（送り方向切削抵抗は逆の結果を示すが、この値は小さい）したがって、砥粒の脱落自生が大きいことと、単粒自体の摩耗量の測定結果から理解できる。

図 18 は軌跡 (2) の場合で、砥石の送り速度が一定であれば、振幅に関係なく砥粒の切削長さが等しく、仕上量もほぼ一定になる。しかし、切削長さが等しく、切削方向角も等しければ、周波数が大きいほど空切削の影響が大になり、砥石損耗量は小さくなる。これは単粒による切削抵抗および摩耗量の測定結果からもうかがえる。

軌跡 (3) の場合には切削方向角が大きいほど、すなわち周波数が大きいほど、切削長さが大で、仕上量も大きくなるが、これは前述の結果と同じである。砥石損耗量

図 18 砥石による実験結果 (2)

は周波数が小さく、切削方向角が小であるほど大きい。これも単粒の場合の結果からあきらかである。

9. 結 論

高周波振動超仕上の基礎研究として、模型単粒を用いて微小切込で振動切削を行なって検討した。まず、工作条件を変化した場合について、空切削およびより上り部の切削などを考慮して切削方向投影面積の変化を解析し、さらに切削試験を行なって切削抵抗および摩耗量を測定した。ついで実際の砥石を用いて超仕上を行ない、仕上量および砥石損耗量などを調べた。これらの結果を要約するとつぎのようである。

(1) 高周波振動超仕上では既切削溝を砥粒が再度通過する空切削の現象があらわれ、これは周波数一定ならば、切削方向角を大にするほど、また、切削方向角一定ならば、周波数が大きいほど顕著である。

(2) 同時により上り部を再切削し、周波数や切削方向角が大きいほど、その影響が大になり、空切削による切削方向投影面積の減少がある程度補なわれる。しかし、全体的には空切削の影響が大きく、切削方向投影面積は同一切削方向角では、周波数の大きいほど小さくなる。

(3) 単粒切削の場合の最大切削抵抗は、上の解析結果とほぼ合致した傾向を示し、また、単粒の摩耗量についても同様な結果が得られた。切削抵抗が大きいことは、砥石における砥粒の脱落、欠損を誘起することになり、砥石損耗量に対する工作条件の影響が明らかになった。

(4) 実際の砥石を用いて超仕上を行なった場合の工作物仕上量、砥石損耗量などは、単粒での解析および実験結果と一致した傾向を示した。

(5) 高周波振動超仕上を行なう場合には、周波数を一定に押えるならば、振幅を大きくするほど仕上量は大き

くなり、また振幅を一定にするならば、周波数を大きくするほど能率はよいことがわかる。

文 献

1)] J. Peacock: Ultrasonics ups Grinding Efficiency.

Amer. Machinist, 105, 6 (1961) 124.

2) 隈部淳一郎: 超音波振動といしによる内面研削に関する研究, 日本機械学会論文集, 27, 181 (1961) 1412.

3) 田中義信, 矢野章成: 超音波振動砥石による精密仕上げの研究, 精密機械, 29, 3 (1963) 232.

情 報

日本防錆技協「ばく露センター」設置

日本防錆技術協会（東京都港区機械振興会館内、会長井上春成）は鉄鋼や塗料、プラスチックなど、あらゆる材料の大気暴露試験を実施するためこのほど「ばく露センター」（仮称）を設置することを決めた。近く設置のための準備委員会をつくり、本年度中にセンターの規模、設置場所、設備機器などを決め、45年度に建設、46年度から試験業務を開始する予定である。わが国の大気暴露試験は、試験方法もほとんど規格化されていないなど欧米諸国に比べ大きく遅れているが、同センターが完成すれば、日本にも国際的に認められた試験場が誕生することになるので、輸出振興にも大きく貢献するものと期待されている。大気暴露試験は耐候性調査研究の基本的手法として、各種金属材料、それらに表面処理を施した材料、非金属材料、それらを組合せた材料などを試験体に、広範囲な分野で実施されている。しかし、わが国では金属、プラスチック、繊維などの各種材料について大気暴露試験方法が、規格化されていないばかりか、国が認定し、標準とする大気暴露試験場もないのが現状である。このため各企業はそれぞれ勝手な方法で独自に試験を行っており、さきに同協会が行なったアンケート調査でも、暴露角度は企業によってマチマチといった結果が出ている。このことは暴露試験地の選定、試験体の寸法、評価方法などについても同様で、同協会ではいか

にバラバラに行なわれているかがこの調査ではっきりしたとしているほどである。このためわが国の耐候性、耐食性試験は国際的に信用がなく、企業は製品を輸出する場合、試験片や実物を国際的に信用のある欧米の試験所に送ってテストしてもらっている。自動車業界はこの試験に年間数 1000 万円を支払っているといわれるし、プラントなどは信用ある暴露試験データがないために国際入札に敗れたニガイ経験も数多いという。そこで同協会ではこうした遅れを取りもどすため、国が認定し、標準とする国際的規模の大気暴露試験場を建設することになったものである。とりあえず今年度は設置のための準備委員会を早急に発足させ、建設場所の選定をはじめ、センターの規模、設備機器などを決定する。同委員会は鉄鋼、塗料、造船、橋りょう、車両、電気、化学など関係企業と国公立試験研究機関、学界などの専門家約 30 人で構成し、海外調査団も派遣して今年度中に結論を出す。この暴露センターは協会案によると、資金約 4 億円で、敷地 10 万平方メートルに、暴露舌だけでも 500 舌は並べるといふ大規模なものである。45 年度に建設し、46 年度から業務をはじめる予定である。建設場所は海岸に面したところで、温度変化の多い、関東地方の国有地を選ぶことにしているが、将来は全国に数カ所の支所を設けたいとしている。

（40頁へつづく）