

研究論文

## 砥石のカオス的回転と遊離砥粒を用いた湿式定圧研削

伊藤俊治\*<sup>1</sup> 山本昌治\*<sup>1</sup>

Grinding by Using Chaotic Rotation of Wheel and Free Abrasive Grains  
under Wet Condition and Constant Pressure

Shunji ITO and Masaharu YAMAMOTO

本研究では、目標回転数をカオティックに変動させる方法と研削液中に遊離砥粒を混合する方法とを併用したうえで、砥石正面を用いた湿式定圧研削の実験を行い、次の結果を得た。実験した条件の中で4800rpm一定では除去体積が最小であるが、砥石の目標回転数の変動は、除去体積を減少させることなく、研削効率を高める効果があった。変動の中でも差分方程式によるカオスは、平均で最も高い研削効率を示し、9900rpm一定の場合より4割ほど高かった。また、#8000の遊離砥粒を研削液に混合することによって、この研削効率を、さらに6割ほど向上できた。

### 1. はじめに

筆者らは、軸付き砥石の正面を用いた湿式定圧研削において、砥石の回転数をカオス的に変動させることによって、砥石の目詰まりを軽減し、研削効率を向上させる方法を提案した<sup>1)</sup>。そこでは、砥石回転数の設定値をローレンツ方程式のz解に従って変動させることによって、研削効率が、最高回転数12000rpm一定の場合の2倍にも達することを、実験により確かめている。以下では、砥石の回転数の設定値を目標回転数と呼ぶ。

本研究では、加工槽内の研削液に遊離砥粒を混合したうえで、砥石をカオス的に回転させることによって、さらに研削効率を向上させる方法を提案する。遊離砥粒を研削液に混合する方法は、山口<sup>2)</sup>、佐藤<sup>3)</sup>、仙波<sup>4)</sup>らによってすでに報告されているが、本研究は、軽荷重条件の定圧研削であること、及びカオス的回転と併用する点で異なる。

実験では、砥石の目標回転数モードとして、一定、カオティック、鋸波を選択した。研削液としては、水道水、WAの混合水道水(#400、#8000)を選び、総除去体積、総消費電力量、研削効率、最終表面粗さに対する目標回転数と研削液の寄与率を求めた。そして、遊離砥粒の混合と砥石のカオス的回転が研削効率に有効であることを確認した。

### 2. 実験方法

試料としてはダイス鋼SKD11を焼入れ焼戻しし、硬度HRC55~57に調質したものをを用いた。そして、ワイヤカット放電加工平面(算術平均粗Ra2.3~2.5 $\mu$ m)を研削加工の対象平面とした。また、すべての実験は砥石の正面を用い、加工が研削液中で行われる完全な湿式状態で行った。

#### 2.1 実験装置

実験装置では、砥石の目標回転数に相当する電圧をパーソナルコンピュータからアンプに出力し、研削モータの回転数を制御した。また、研削モータの印加電圧と電流をデジタルマルチメータを介してパーソナルコンピュータに取込み、研削モータの消費電力量を計算した。試料は、XYテーブル上に設置された25kHzの超音波洗浄槽内に固定され、砥石経路と送り速度が、あらかじめXYテーブル用のNCプログラムで記述される<sup>1)</sup>。

軸付砥石用の研削モータは、直流定格電力21W、無負荷時の最大回転数が12000rpmの高速回転・低トルク型であり、入力電圧対回転数のステップ応答における時定数は約0.3秒である。アンプは直流電圧フィードバック型である。

超音波洗浄槽内の様子を図1に示す。図中、定圧機構は既報<sup>1)</sup>と同様であるが、研削加工によって生ずる振動を防止する目的で以下の工夫をした。(1)アルミニウム薄板により案内用の3つのセラミックスキッド球<sup>1)</sup>を被加工面に適当な力で押えつける。(2)

\*1 機械電子部

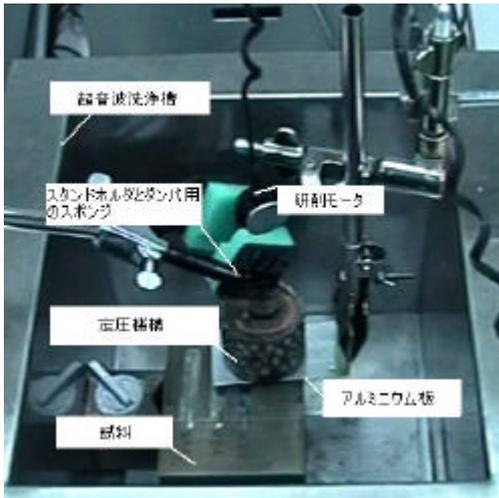


図1 実験装置

研削モータを上部からバネばかりによって約1Nの張力で引く。(3)研削モータ自体を剛性の低いスタンドホルダで挟む。これらによって、振動のない安定した加工が実現できた。また、研削荷重は研削モータとスライド円筒<sup>1)</sup>との自重を合せたものから、バネばかりの引張り張力(約1N)を減算した6.6Nになる。

## 2.2 砥石の目標回転数モード

目標回転数モードとしては、9900rpm一定と4800rpm一定、この節の(1)(2)項で定義する差分方程式カオスとローレンツカオス、及び鋸波の5条件を選択した。また、カオスデータについては、埋め込み次元<sup>5)</sup>を3として、リアプノフ指数<sup>5)</sup>をWolf<sup>6)</sup>の方法により求めた。リアプノフ指数は、データの初期値に対する鋭敏性を表しており、最大リアプノフ指数が正であることはカオスであることの必要条件になる。さらに、埋め込み次元1~5でアトラクタ<sup>5)</sup>のフラクタル次元<sup>7)</sup>を求め、フラクタル次元の飽和値を相関次元<sup>5)</sup>とした。相関次元が非整数であることはカオスであることの必要条件になる。また、カオスは本来、非周期的な現象であるが、ここでは、特定の時間内における時系列データのピークを数え、平均の周期を求めた。研削性能は平均周期によっても影響される<sup>1)</sup>から、回転数を変動させる実験では、実時間の平均周期が共通になるように後述の方法で目標回転数を決定した。

### (1) 差分方程式カオス

次式の差分方程式からカオスデータを求めた<sup>5)</sup>。

$$y(t+1) = k y(t) - f\{y(t)\} + a \quad (1)$$

ここで、 $f(y)$  はロジスティック関数<sup>5)</sup>であり、次式で定義される。

$$f(y) = \frac{1}{1 + \exp(-y/e)} \quad (2)$$

(1)、(2)式におけるパラメータ値によって、解は

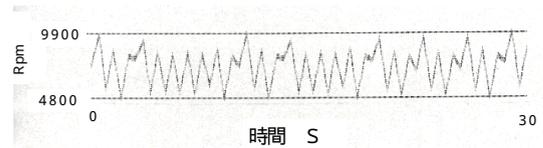


図2 差分方程式カオスの目標回転数



図3 ローレンツカオスの目標回転数

カオティックになったり、ならなかったりすることが知られている。ここでは、例えば、分岐パラメータ $a$ と他のパラメータ、及び初期値 $y(0)$ を以下の様に設定した。

$$a = 0.377, \quad k = 1, \quad e = 0.7, \quad e = 0.02, \quad y(0) = 0$$

また、後述の2.6節で定義される研削効率に対して最適な周期は、既報<sup>1)</sup>において約1秒だから、 $t$ の1整数間隔を0.5秒とし、この差分方程式の時系列解において、特定の時間内での平均周期を1秒に設定した。さらに目標回転数は $y$ の最大・最小値をそれぞれ9900、4800rpmに対応させ、その間を $y$ に比例させて作成した。この目標回転数を図2に示す。同図では、 $y$ のリアプノフ指数、 $y$ の相関次元を併記している。これらから解 $y$ がカオティックになることが裏付けられている。

### (2) ローレンツカオス

次のローレンツ方程式<sup>5)</sup>の解をカオスデータとし求めた。

$$\dot{x} = (-x + y) \quad (3)$$

$$\dot{y} = -xz + Rx - y \quad (4)$$

$$\dot{z} = xy - Bz \quad (5)$$

ここで、

$$R = 10, \quad B = 34, \quad B = 7/3$$

である。初期値 $x_0 = 0, y_0 = 0, z_0 = 0.05$ 、刻み幅0.005秒として、ルンゲ・クッタ法により、式(3)~(5)の解 $z$ を5000個の時系列データとして求めた。ただし、最初の200個は急峻な立上がりとオーバーシュートを示すため削除した。さらに、平均の周期を研削効率に対して最適な1秒にする目的で、時間軸スケールを約1.45倍した。図3に、4800個の解 $z$ を用いたカオス的制御の目標回転数を示す。目標回転数は、差分方程式と同様に $z$ の最大値を9900rpm、最小値を4800rpmとし、



図4 目詰まり

その間を  $z$  に比例させて作成した。また解  $z$  がカオティックであることを示すために、図3においては、 $z$  のリアプノフ指数、 $z$  の相関次元を併記している。

### (3) 鋸波

最大・最小回転数をそれぞれ9900、4800rpmとして周期1秒の鋸波を作成し、これを目標回転数とした。リアプノフ指数は零でありカオティックでない変動の実験例とした。

### 2.3 遊離砥粒

研削液は水道水であり、遊離砥粒なし、遊離砥粒WA#400の2wt%混合溶液、遊離砥粒WA#8000の1wt%混合溶液の3条件を選択した。また、遊離砥粒が加工中に沈殿するのを防止する目的で、超音波洗浄槽内で研削した。

### 2.4 砥石経路<sup>1)</sup>

砥石は直線区間60、45、30、15mmを重なり合うようにそれぞれ2回往復する。従って、2、4、6、8往復区間が15mmづつできる。

### 2.5 研削条件

軸付砥石と試料は超音波洗浄槽に張られた水面の下に配置し、完全な湿式状態とした。使用する砥石は、カップ型形状、砥石外径13mm、内径6mm、砥粒 $Al_2O_3$ 、粒度#120、結合材ビトリファイド、結合度Pである。砥石の目立ては、次の一定の等しい条件で行なった。まず、砥石と単石ダイヤモンドドレッサーをそれぞれ旋盤のチャックとバイト台に設置した。そして、1回の切込み量0.1mm、旋盤主軸の回転数160rpm、バイト台の送り速度0.05mm/revの条件で砥石端面を0.3mm削り取ったのち、スパークアウトを3回行なった。研削実験における砥石の送り速度は低速で安定した加工が得られる0.94mm/sとし、砥石回転数によらず共通とした。

### 2.6 評価方法

既報<sup>1)</sup>と同じ方法で除去体積と消費電力量を求め、除去体積を消費電力量で除算した値を研削効率と定

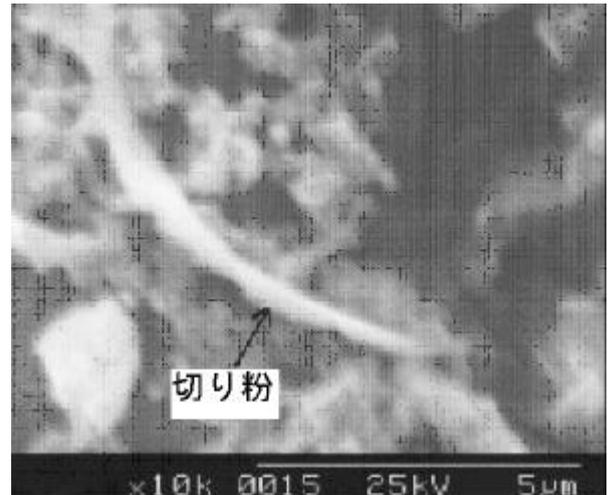


図5 切り粉

義する。そして、加工の評価は、主に研削効率と除去体積によった。

## 3. 実験結果

研削実験は、遊離砥粒の沈殿防止の目的で、超音波洗浄槽内で行うので、実験中に25kHzの超音波振動が加工に直接影響する可能性がある。そこで洗浄槽内に設置した試料表面の変位を静電容量型の変位計で測定した。その結果、振幅約2 $\mu$ m、振動数120Hzの振動が観察されたが、試料には25kHzの超音波振動は見受けられなかった。これは、試料の固定のために用いた台に超音波振動が吸収された結果である。従って、研削実験においては、加工に直接影響する超音波振動はないと考えられた。以下、すべての実験は電源投入状態の超音波洗浄槽内で湿式で行った。また、実験の繰り返し数は1である。

### 3.1 目詰まりと切り屑の観察

遊離砥粒なしおよび9900rpm一定の条件で加工した時、砥石に生じた目詰まりを図4に示す。この目詰まりは研削性能を低下させ、研削効率を下げると考えられる。さらに、切り屑の電子顕微鏡写真を図5に示す。同図から、この切り屑の幅は約1 $\mu$ mであり、長さは約7 $\mu$ mであることがわかる。

### 3.2 WA#8000混合液の実験結果

後に述べるように、最も研削効率を高くしたWA#8000混合液を研削液として用いたときの除去体積、消費電力量、研削効率を図6、7、8に示す。これらを既報<sup>1)</sup>の結果と比較すると、砥石の最高回転数および砥石の往復回数が異なる条件だが、研削時間に対する傾向は良く符合している。

### 3.3 研削実験結果

2章の方法で湿式定圧研削した。加工終了時点での総除去体積を総消費電力量で除算した研削効率を、以

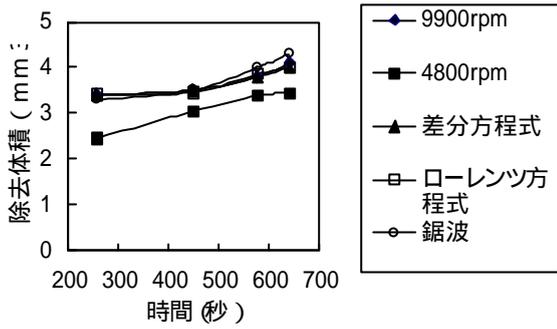


図6 #8000除去体積

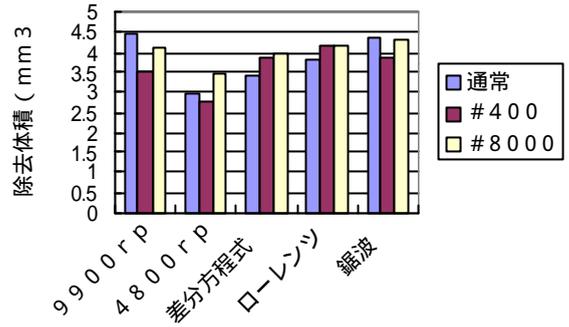


図9 除去体積

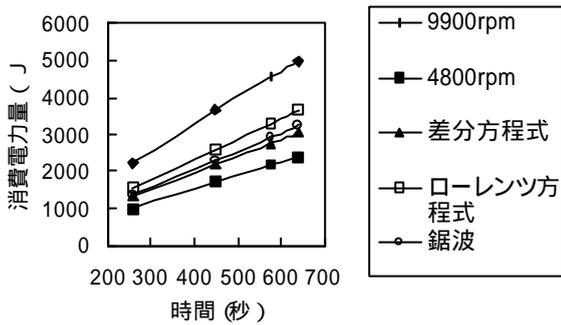


図7 #8000消費電力

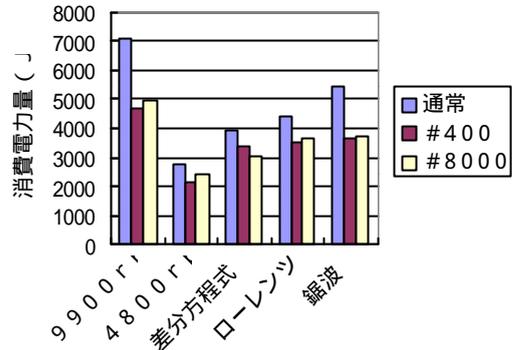


図10 消費電力

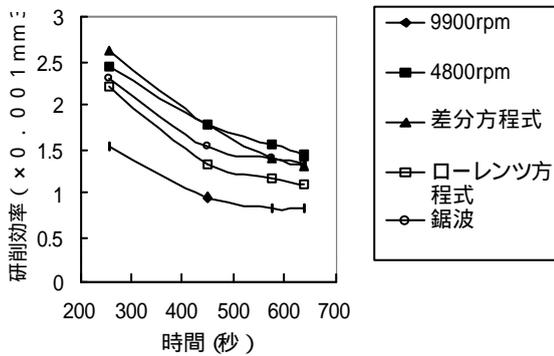


図8 #8000研削効率

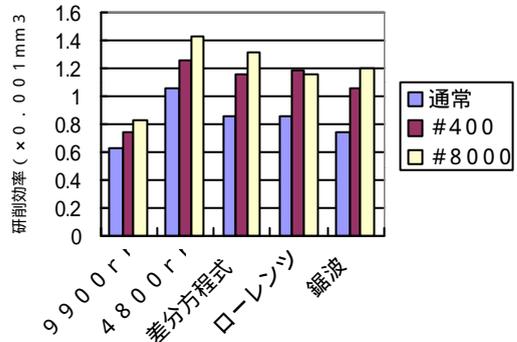


図11 研削効率

下では単に研削効率と呼ぶことにする。

図9は目標回転数5条件、研削液3条件の組み合わせである15実験における総除去体積を示す。同図において、目標回転数については、平均で鋸波のとき最大となり、研削液については、平均でWA#8000の混合溶液のとき最大になった。また、平均で4800rpm一定のとき総除去体積は最小になった。

図10は本実験の総消費電力量を示す。総消費電力量が最大になるのは、平均で目標回転数9900rpm一定、遊離砥粒なしのときである。また遊離砥粒は目詰まりを軽減し<sup>2),3),4)</sup>、消費電力を低下させる効果があり、平均で#400のとき、総消費電力量を最小にした。さら

に、同図は#8000の遊離砥粒もほぼ同等の効果があることを示している。

図11は研削効率を表している。これは投与した単位エネルギーあたりの除去体積を示しており、如何に効率的に研削作業が行われているかを表す指標となる。目標回転数については4800rpm一定のとき最大になるが、図9に示したように4800rpm一定では総除去体積が最小になるので、研削加工としては好ましくない。図11において研削効率を2番目に高くする差分

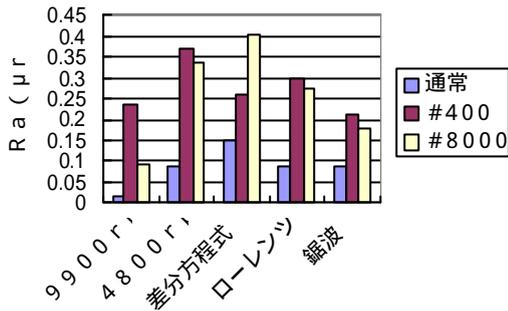


図 12 表面粗さ

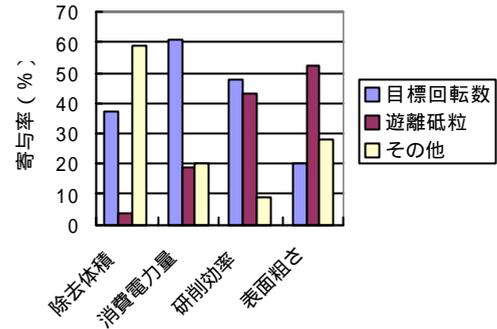


図 13 寄与率

方程式カオスは、総除去体積においても高い値を示しており、有望である。また、研削液としては#8000の遊離砥粒を混合したとき、平均で最も研削効率を高くした。

砥石が8往復する箇所の中央付近の表面粗さを触針式の表面粗さ計で1カ所だけ測定した。図12にこの最終仕上げ面の表面粗さRaを示す。最終表面粗さは平均で9900rpm一定のときと遊離砥粒なしのとき最小になった。一方、遊離砥粒を用いる場合と遊離砥粒なしの場合を比較すると、遊離砥粒を用いると表面粗さを劣化させる方向に働き、平均で#400のとき最終表面粗さを最大にした。また、条件によって表面粗さに、ばらつきがあるのは、放電加工痕を完全には取り除ききれないため、触針の走査箇所加工痕が存在するかどうかによる結果である。

総除去体積、総消費電力量、研削効率、最終表面粗さに対する目標回転数と研削液との寄与率<sup>8)</sup>を図13に示す。これは、図9から図12までのデータから算出した結果である。図13から目標回転数は総消費電力量と研削効率に大きく関与するのに対して、研削液は最終表面粗さと研削効率に影響することがわかる。

#### 4. 考察

##### 4.1 目標回転数の影響

回転数を変動させる方法は、最高回転数9900rpm一定の場合とほぼ同等の除去体積性能を示すとともに、研削効率を高める効果があった。これは、変動により研削液の加工面への出入りを頻繁に行い、冷却作用を向上させ、切れ刃と切り屑、あるいは切り屑同士の溶着を防止し、目詰まりを軽減する結果、少ない消費電力量で除去体積を大きく加工できたものと推察される。一方、目標回転数の変動の中でも、カオティック変動が、さらに有効な理由としては、例えばカオスの混合作用から、切り屑の運動を複雑化し、排出を促進する、及び冷却作用を向上させるなどが推測される。

##### 4.2 研削液中の遊離砥粒の影響

遊離砥粒は表面粗さに影響した。これは研削荷重6.6Nの軽い定圧条件かつ砥石砥粒度#120の粗い研削条件、及び超音波洗浄槽による120Hz、振幅2μmの試料の微振動の影響から、遊離砥粒が作業切れ刃と被加工面との間に食い込みやすいという特殊な事情があり、仕上げ面粗さが劣化したものと考えられる。さらに、遊離砥粒は、結合材ビトリファイドを遊離砥粒の直径と等しい高さだけ削り取り、切れ刃の突き出し量を一定にするとともに<sup>3)</sup>、切れ刃に溶着した切り屑を掻き出すことにより目詰まりを軽減する。これらから消費電力量は抑制され、研削効率が向上したと思われる。

#### 5. 結び

本研究から、軽荷重の定圧研削でも研削液中に遊離砥粒を混合すると消費電力量を抑制し、研削効率を高め得ることを確認した。一方、本実験条件では、遊離砥粒なしの場合と比べ、表面粗さは劣化する欠点も認められた。これは、遊離砥粒の沈殿防止に用いた超音波洗浄槽の影響とも考えられた。

#### 参考文献

- 1) 伊藤、成清：精密工学会誌、64(5)、748(1998)。
- 2) 山口、洞口、佐藤：精密工学会誌、63(2)、238(1997)。
- 3) 佐藤、河田、山口：日本機械学会論文集C編、65(635)、2925(1999)。
- 4) 仙波、大森、佐久間、竹内：日本機械学会論文集C編、62(594)、754(1996)。
- 5) 合原一幸：カオス、サイエンス社(1990)。
- 6) A. Wolf, F. B. Swift, H. L. Swinney and J. A. Vastand: Physica 16 D, 285(1985)。
- 7) 伊藤、塚田、笹島：精密工学会誌、58(5)、865(1992)。
- 8) 田口玄一：実験計画法(上)、丸善(1962)。