カオスの回転を用いた湿式定圧研磨*

伊藤 俊治** 成 清 辰 生***

Abrasive Machining under Wet Condition and Constant Pressure using Chaotic Rotation

Shunji ITO and Tatsuo NARIKIYO

The purpose of the study is to propose new abrasive machining under wet condition and constant pressure by using chaos. Rotation of an abrasive motor is statically controlled to become chaotic. The following facts are revealed by experiments: (1) A period 1.06 s of a chaotic rotational change is superior than other periods in removed volume and abrasive efficiency. (2) Chaotic rotation of a period 1.06 s is twice as good as maximum and constant 12000 rpm in abrasive efficiency. (3) A chaotic rotational change is superior than changes generated by a sine wave or a random signal in both of removed volume and abrasive efficiency. (4) Reduced percentage of final surface roughness is 96.5–99.5 %, when a plane (R_a 2.3–2.7 μm) machined by WEDM is selected as a target. (5) Rotational change is not so serious that the influence in surface roughness is within 0.1–0.2 μm (P–V). (6) The best surface roughness is determined by size of grains and is 50–100 nm (P–V), when #120 grains are used under wet condition and constant pressure.

Key words: chaos, abrasive machining, wet condition, constant pressure, abrasive efficiency

1. 緒 言

最近、旋削加工面の断面曲線を力学系の変動曲線と考え、カオス¹⁾解析する報告^{1)~5)}が見受けられ、カオス変動する要因の追求に役立つ可能性がある⁶⁾とされている。また、カオス外乱あるいは制御対象に含まれるカオス性を抑えることにより制御系を安定させようとする2自由度制御系⁷⁾が提案されている。これは、カオスを好ましくないものととらえ、その影響を除去しようとするカオスのネガティブな応用といえる。反対に積極的にカオスをシステムに取り入れるポジティブな応用もある。例えば洗濯機や食器洗い機において汚れ落としの性能を向上させる目的でカオスを導入するなどが知られている。しかし、その効果を定量的に把握するのは難しい。

一方、金型仕上の研磨においては、通常、砥粒径の異なった何種類かの砥石を粒径を下げる順で用いる結果、研磨工程が複数になり自動化を妨げる一因になる。これに対して、砥石端面を用いた湿式定圧研磨は粒径の大きな1種類の砥石を用いるだけで、かなりなめらかな仕上がり面を得ることができるので自動化には都合が良い。しかしながら、短時間で砥石に目づまりが生じ研削効率が低下する欠点があり、何度も目立てする必要がある。

本研究では、軸付砥石の端面を用いた湿式定圧研磨におい

て、目づまりによる研削効率の低下を軽減する目的で、砥石の回転数をカオス的に変動させる方法を提案し、カオスのポジティブな応用例として、その有効性を実験により定量化できたので報告する。

2. 実験方法

試料としては金型鋼SKD11を焼入れ焼きなましし、硬度HRC 56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(中心線平均粗さ R_a 2.3~2.7 μm)を研磨加工の対象平面とした。

2.1 実験装置

主な装置は、研磨モータ、定圧機構、アンプ、デジタルマルチメータ、パーソナルコンピュータ、XYテーブル、アクリル製2リットル容器である。

2.1.1 実験装置の構成

図1に実験装置の構成を示す。パーソナルコンピュータからの指示値により、研磨モータの回転数を静的に制御する。また、研磨モータの印加電圧と電流をデジタルマルチメー

Fig.1 Experimental system

* 原稿受付 平成9年9月19日

** 正 会 員 愛知県工業技術センター(刈谷市一ツ木町西新割)

*** 豊田工業大学(名古屋市天白区久方2-12-1)

Fig. 2 Mechanism for constant pressure

Fig. 3 Rotation of abrasive motor

タ(D.M.M.)を介してパーソナルコンピュータに取り込み、研磨モータの消費電力量を計算する。試料はXYテーブル上に設置されたアクリル製2リットル容器内に固定され、砥石経路と送り速度があらかじめNCプログラムで記述される。

2.1.2 研磨モータと定圧機構

軸付砥石用の研磨モータは、直流定格電力21W、無負荷時の最大回転数が12000rpmであり、回転数の時定数が約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。また、研磨加工においては軸付砥石の端面を使用し、定圧加工のために図2の機構を設けた。図中、3つのスキッド球は加工平面と砥石回転軸との直角を出すための基準であり、スライドガイドにねじ止めされ、スライドガイドの傾き調節に用いた。さらにスライド円筒は砥石回転軸と平行に研磨モータに固定され、スライドガイドになめらかに挿入される。したがって、砥石端面はつねに加工面と密接し、その研磨荷重は研磨モータとスライド円筒との自重を合わせたものになり、この場合、650gである。また、アルミニウム薄板により、3つのスキッド球を放電加工面に適当な力で押えつける。これによって、スキッド球は安定し、滑らかに放電加工面を滑り、振動のない加工が実現できた。

2.2 研磨方法

2.2.1 砥石回転数の制御

砥石の回転数はパーソナルコンピュータによって静的に制御される。

1) カオスの制御

次式のローレンツ方程式の解を用いて砥石の回転数をカオス的に変動させた。

$$\dot{x} = \sigma(-x + y) \quad (1)$$

$$\dot{y} = -xz + r x - y \quad (2)$$

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

Fig. 4 Path of grindstone

ただし $\sigma = 10$, $r = 28$, $b = 8/3$ である。図3に式(1)～(3)の解 z を用いたカオスの制御の目標回転数を示す。図中、 z の最大値を12000rpm、最小値を4580rpmとし、その間は z に比例するように砥石回転数を制御する。ここで最大最小値は研磨モータの上限、アンプの下限であり、砥石の回転数は実験可能な最大の振幅で変動することになる。また、周期はデータの間引きによって後述する値に設定するが、図3においては代表例として周期1.06秒の場合を表す。

2) 正弦波とランダム制御

カオス的な回転数制御の類似例として、正弦波を目標回転数とする実験と、ランダム値間を直線補間した信号を目標回転数とする実験を行った。両者ともカオスの制御と同様に最大最小回転数はそれぞれ12000rpm、4580rpmである。また、後述するカオスの周期のうち、最も加工性能の良い値を参考にして、正弦波の周期およびランダム値の時間間隔を1秒とした。

2.2.2 砥石経路

XYテーブルによる砥石経路を図4に示す。図中、砥石は直線区間60, 45, 30, 15mmをそれぞれN回往復し、砥石経路はこれらの区間を1次元的に重ね合わせたものである。また、 $A_i - A_i$ ($i=1 \sim 4$)は触針式の表面粗さ計による加工断面の測定箇所であり、 B_i ($i=1 \sim 4$)は表面粗さの測定箇所である。

2.2.3 研磨条件

軸付砥石はアクリル製2リットル容器に張られた水面の下に2/3程度沈められるので、砥石加工端面は完全に水没した湿式状態になる。使用する砥石は、カップ型形状、砥石外径 $\phi 13$ mm、内径 $\phi 6$ mm、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730rpm、バイト台の送り速度0.6mm/sの条件で砥石端面を0.5mm削り取り、砥石を目立てた。また、無負荷時における砥石回転数の条件は下記の8項目である。

- (1) 12000rpm一定(最大回転数)
- (2) 4580rpm一定(最小回転数)
- (3) 回転数範囲4580～12000rpmでカオスの(周期 約0.53秒)
- (4) 回転数範囲4580～12000rpmでカオスの(周期 約1.06秒)
- (5) 回転数範囲4580～12000rpmでカオスの(周期 約1.57秒)

Fig.5 Sectional curves

Fig.6 Removed volume, electric energy and abrasive efficiency under constant 12000 rpm

- (6)回転数範囲4580～12000rpmでカオスの(周期 約3.14秒)
 (7)回転数範囲4580～12000rpmで正弦波(周期 1.0秒)
 (8)回転数範囲4580～12000rpmでランダム(時間間隔1.0秒)

上記において、(3)～(6)は回転数をカオス的に変動させたとき、その周期による研磨性能への影響を検討する目的と最適化を目指して設定する。また、(7)、(8)はそれぞれ正弦波とランダムであり、カオスの類似信号としての比較対象条件である。また、別途、記述しないかぎり、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。

2.3 評価方法

2.3.1 除去体積の評価と研磨時間

未加工面における表面粗さの中心線を基準とする平均加工深さから加工断面積()を計算し、その増加量 C_i を次式で表す。

Fig.7 Removed volume

$$C_i = (A_i - A_{i-1})_{\text{area}} - (A_{i-1} - A_{i-2})_{\text{area}} \quad (4)$$

そして、研磨加工によって取り除かれた除去体積 V_i を次式で定義する。

$$V_i = \sum_{j=1}^i C_j L_j \quad (i = 1 \sim 4) \quad (5)$$

ここで、 L_j は送り量 ($L_1=60\text{mm}$, $L_2=45\text{mm}$, $L_3=30\text{mm}$, $L_4=15\text{mm}$) である。

さらに、加工に要する研磨時間 D_i は次式になる。

$$D_i = 2 N \sum_{j=1}^i L_j / F \quad (i = 1 \sim 4) \quad (6)$$

F : 送り速度

2.3.2 研削効率の評価

研削効率は除去体積を消費電力量で除算した値として定義し、エネルギーが有効に加工に使用されたかを判断する指標とする。

2.3.3 表面粗さの低減率の評価

表面粗さの低減率 E を次式で定義する。

$$E = \{1 - (Ra)_i / (Ra)_w\} \times 100\% \quad (7)$$

($Ra)_i$: B_i ($i=1 \sim 4$) における中心線平均粗さ
 ($Ra)_w$: ワイヤカット放電加工面における中心線平均粗さ

3. 実験結果

3.1 回転数12000rpm一定の実験結果

図5は N を2とした研磨加工後の $A_i - A_{i-1}$ ($i=1 \sim 4$) における断面曲線を示す。図より、 i が大きいほど加工深さが深くなること、及び砥石があまり片当たりしていないことが分かる。

N を1 (送り速度 1.9mm/s)、1、5として、研磨時間 (64, 112, 144, 160), (128, 224, 288, 320), (640, 1120, 1440, 1600) 秒後における除去体積、消費電力量、研削効率を求めた。結果を図6に示す。図より、除去体積は時間経過とともに増加するが、その増加率は急速に低減することが分かる。これは、ワイヤカット放電加工直後の表面性状が研磨によって滑らかになると研削加工しづらくなること、及び砥石の目づまりによると思われる。また、ほぼ時間に比例する消費電力量で除去体積を除算した研削効率は、時間の経過とともに双曲線的に低下し、加工に用いられる有効なエネルギーが大幅に下がることを示している。

3.2 各種回転数の実験結果

(a) Constant 12000 rpm

(b) Chaotic rotation (period 1.06s)

Fig.8 Grindstone after abrasive machining

Fig.9 Electric energy

Nを5として、2.2.3項の8種類の砥石回転条件で加工し、研磨時間 640, 1120, 1440, 1600秒後における除去体積を図7に示す。同図で除去体積の増加率は小さい。このことは640秒以降では研削効果が低下していることを示している。ただし同図から砥石回転条件による違いは認められる。まずカオスの制御の周期として3.14, 1.57, 1.06, 0.53秒のそれぞれを比較すると1.06秒のとき最も除去体積が大きい。切り屑の

Fig.10 Abrasive efficiency

Fig.11 Reduced percentage of surface roughness

排出や付着の軽減を考慮すると周期が短いほど除去体積が大きくなると思われるが研磨モータの応答性（無負荷時の時定数 約0.3秒）から周期0.53秒のときには回転数が追従しない結果と考えられる。また図7において周期1.06秒のカオスによる除去体積曲線は12000rpm一定の約1.2倍であり、4580rpm一定の約1.3倍になる。ここで加工後の砥石端面写真を図8に示す。同図において目づまりは (a)の12000rpm一定で顕著に認められるが、(b)の周期1.06秒のカオスではほとんど見受けられない。このことは、周期1.06秒のカオスが最高回転数12000rpm一定よりも高い除去体積性能を示す理由であると考えられる。

図9に消費電力量の比較を示す。いずれの砥石回転条件でも消費電力量はほぼ単調に増加するが、12000rpm一定のとき最大であり、4580rpm一定のとき最小である。

除去体積を消費電力量で除した研削効率を図10に示す。図において、すべての条件で研削効率は時間とともに減少するが、回転数を周期1.06秒でカオス的に制御した場合、最も研削効率が高く、エネルギーを有効に加工に用いていることが分かる。また正弦波やランダム制御を用いた加工における研削効率は周期1.06秒のカオスよりも1, 2割小さくなっている。これは、正弦波では消費電力量が高くなること及びランダム制御では目づまり低減効果が小さいことが原因と思われる。次に、除去体積の比較的大きかった12000rpm一定は、図10において研削効率が最も低く、周期1.06秒のカオスの場合の約1/2になる。これは目づまりなどの影響から無効にエネルギーが消費された結果と思われる。さらに、図10で4580rpm一定は研削効率において2番目に高く、一見有望だが除去体積において最小であるので、十分に放電加工痕を除去できない欠点がある。

図11に各種回転条件における表面粗さの低減率を示す。ワイヤカット放電加工面の中心線平均粗さは2.3~2.7μmであ

Fig.12 Surface roughness curves

り、その粗さは5往復の研磨加工で93~96%低減され、その後20往復では96.5~99.5%除去される。ここで、周期1.06秒のカオスの制御を用いた場合の表面粗さ曲線を図12に示す。同図から、放電加工痕の深さは砥石の往復回数が上がるにつれて浅くなるが、20往復(B₄)でも約0.6 μ m残ることが分かる。しかし粗さ曲線における基準長さの倍数が5でありR_{tm}は0.3 μ m程度になる。また回転数の加減速による粗さ曲線の乱れは意外に小さく0.1~0.2 μ m程度であった。この測定箇所(B₄)の近辺で最も良好な表面性状を光学式干渉計によって観察した。結果を図13に示す。図では砥粒の走った跡が縦方向に谷となって表れ、そのP-V値は50~100nmであった。砥粒の番手が#120であることを考慮すると、この値はかなり小さく、端面を用いた湿式定圧研磨の効果と思われた。

4. 結 言

砥石端面を用いた湿式定圧研磨において、軸付砥石の回転数をカオスの静的制御する方法を提案し、実験により下記を確認した。

- (1) 実験した範囲内では、周期1.06秒のカオスを用いた研磨が除去体積、研削効率において最も高性能であった。
- (2) 周期1.06秒のカオスを用いた研磨は、研削効率におい

Fig.13 Result measured by interferometer

て最大回転数12000rpm一定の場合の2倍にも達し、目づまりによる研削効率の低下を軽減できた。

- (3) カオスの類似信号として正弦波とランダム信号を用いたそれぞれの研磨よりも、周期1.06秒のカオスは除去体積、研削効率の両面において優れていた。
- (4) ワイヤカット放電加工平面(R_a=2.3~2.7 μ m)を研磨した結果、最終的な表面粗さの低減率はすべての回転条件において96.5~99.5%になった。
- (5) カオスの制御による回転の加減速が表面性状に及ぼす影響は意外に小さく表面粗さにおいてP-V値で0.1~0.2 μ mであった。
- (6) 周期1.06秒のカオスで研磨された最良の表面性状は、主に砥粒の痕跡で決定され、#120の砥石を使用したときP-V値で50~100nmになった。

本研究では、カオスの種類としてローレンツ方程式の解を使用した。このほかにもいろいろな種類があり、必ずしも最適な加工条件を選択しているとはかぎらない。また、カオスを用いると目づまりが軽減される理由には次のようなメカニズムが考えられる。砥石のポケットに入った切り屑が砥石の外周方向へ移動するには、切り屑の運動が複雑であるほど、ポケットからの脱出口を探しやすくなる。また、砥石に付着した切り屑は、回転数の変動により、遊離状態になりやすい。加工槽内の液体の挙動が複雑化し、影響するなどである。しかし、解析するに至らない。今後の重要な検討課題と考える。

参 考 文 献

- 1) 例えば、合原一幸：カオス，サイエンス社，(1990)。
- 2) 長谷川素由，劉 建成，奥田孝一，布引雅之：旋削加工面のカオス挙動に関する研究，精密工学会誌，60，10 (1994) 1460。
- 3) 長谷川素由，奥田孝一，布引雅之，宮元 誠，劉 建成：カオス理論を用いた表面粗さ解析に関する研究，1995年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集，(1995) 643。
- 4) 矢野章成ほか：超精密加工面に関する研究(第1報)，1996年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集，(1996) 529。
- 5) 原 靖ほか：超精密加工面に関する研究(第2報)，1997年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集，(1997) 1025。
- 6) 塚田忠夫：表面キャラクター化の動向，精密工学会誌，61，11 (1995) 1507。
- 7) 亀田敏夫，合原一幸，堀 洋一：2自由度コントローラのカオス力学系への応用，電気学会論文集C編，113，1 (1993) 43。