

超仕上加工における切削性能のファジィ制御*

坂本 智** 上田 隆 司***

Fuzzy Control of Cutting Ability in Superfinishing
Satoshi SAKAMOTO and Takashi UEDA

Fuzzy control is applied to the superfinishing in order to optimize the cutting ability of the stone. The finishing performance of vitrified bonded WA stone is regarded as the fuzzy goal. At the beginning of cutting, the stone is in the stage of cutting to get high stock removal rate. But the cutting ability is decreasing as the finishing proceeds and is lost at the end of finishing, resulting in getting the smooth surface. A cutting resistance is used to monitor the cutting condition of stone. The cutting ability of stone is controlled by both the stone pressure and the amount of electricity for electrolytic in-process dressing. A water-solution type coolant and metal bonded diamond stone are used. The main results obtained are as follows. Fuzzy control makes it possible to give the optimized cutting ability to the diamond stone. In the first case, it is possible to get the large stock removal following the smooth surface in a limited time. In second case, it is possible to minimize the finishing time in which the finishing performance intended in stock removal and surface roughness is obtained. In third case, it is possible to keep the cutting ability of stone constant for a long time.

Key words: superfinishing, fuzzy control, electrolytic in-process dressing, cutting ability, water-solution type coolant

1. 緒 言

現在、機械加工では高精度・高生産性・低コスト等の生産の合理化を目指し、様々な制御方法が用いられてきている¹⁾。中でも研削加工の分野で多く用いられているのがファジィ制御である²⁾。さらに近年ではニューラルネットワークを利用したファジィ制御なども研削加工に適用されてきている³⁾。

ファジィ制御では他の制御方法とは異なり、複数の制御規則を定め、それら規則の協調により制御を行う。そのため制御対象を数式で表現する必要がなく、制御対象に対する定性的認識があれば比較的簡単に設計可能である⁴⁾。このような理由からも工具にあたる砥粒切れ刃の挙動が複雑で、数式表現が困難な研削加工に対する制御方法としてファジィ制御は非常に有効な制御方法であると言える。

研削加工と異なり、超仕上加工では、加工途中で砥粒切れ刃が切削状態から研磨状態へと変化することによって仕上面粗さの向上を図っている⁵⁾。このため、一般の研削加工以上に砥粒切れ刃の挙動は複雑となり、加工中の砥粒切れ刃の挙動を数式で表現することは非常に困難である。砥粒切れ刃の状態変化が適正でないと、前加工による加工痕が残ったり、砥石作業面の凹凸が加工物表面に転写されたりと、良好な仕上面を得ることが難しくなってくる。さらに、超仕上加工でも、砥石寿命の長いメタルボンド砥石が用いられだしてきており⁶⁾、砥粒切れ刃の状態をコントロールすることは一層困難となってきている。

この問題の解決方法として一般的には粗加工と仕上加工とを分けた2段加工⁵⁾が行われている。しかし、2段加工を行うためには複数の砥石を用意する必要があり、加工途中での砥

石の交換・ドレッシングが必要となるため、効率的な方法であるとはいえない。

そこで本研究では、メタルボンドダイヤモンド砥石を用いた超仕上加工にファジィ制御を取り入れ、砥石作業面の状態をコントロールすることを主な目的とした。WA砥石等の普通砥石を用いた場合と同様、一つの砥石で粗加工から仕上加工までを可能とするような加工特性の制御を試みる。また、意図した加工結果をできるだけ短時間に得るように加工特性の制御を試みる。

2. 実験方法

2.1 ファジィ制御プログラム

図1に実験に用いたファジィ制御プログラムのフローチャートを示す。このプログラムでは大きく分けてプロセスA、プロセスBの二通りの加工を行うことが可能である。プ

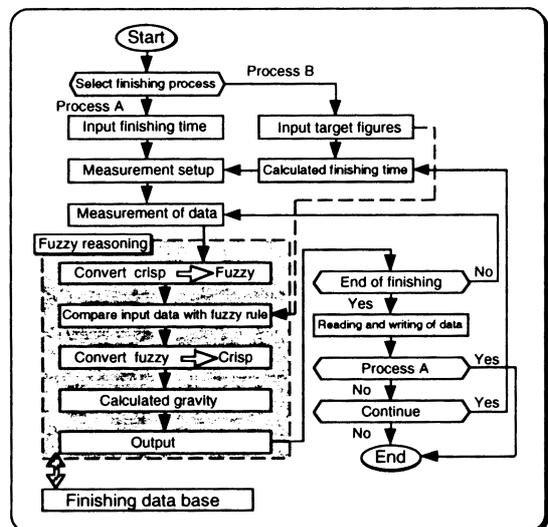


Fig. 1 Flowchart of fuzzy program

*原稿受付 平成9年6月2日

**正会員 鳥取大学工学部 (鳥取市湖山町南4-101)

***正会員 金沢大学工学部 (金沢市小立野2-40-20)

プロセスAはメタルボンドダイヤモンド砥石にW A 砥石に近い加工特性を持たせ、効率良く加工しながら仕上面の向上を狙う制御である。入力された加工時間内で砥石を切削状態から研磨状態へとスムーズに変化させるように砥石押付け力、電解インプロセスドレッシングの電気量の制御を行う。一方、プロセスBは加工目標をできるだけ短時間に実現する制御である。加工目標としては加工量・仕上面粗さをを用いる。所要加工時間は切削工程と研磨工程とに分けて算出し、目標加工量および目標仕上面品位に到達するように砥石押付け力、電解インプロセスドレッシングの電気量の制御を行う。入出力データはデータベースとして取り入れられ、必要によりメンバーシップ関数の補正等に利用される。

砥石の切削能力の変化は切削抵抗（主分力 F_t ）の増減に現れる。主分力 F_t が大きな値を示すときに砥石の切削能力は大きく、目づまり・目つぶれ等により切削能力が低下すると主分力 F_t も小さな値を示す。つまり F_t を監視することで砥石の状態がわかる。

一般にW A 砥石を用いた超仕上加工では粗加工から仕上加工までを一つの砥石で受け持つ。しかし、メタルボンドダイヤモンド砥石は一般のW A 砥石に比べ砥粒保持力が大きく、切削能力のコントロールが難しいため一つの砥石で粗加工から仕上加工までを行うことはできない。そこでW A 砥石の加工時間に伴う切削抵抗（主分力 F_t 、砥石押付け力 F_n ）の変化⁷⁾を基準として、切削抵抗（主分力 F_t 、砥石押付け力 F_n ）との偏差を ΔF_t 、 ΔF_n としてファジィ制御の入力値として用いる。また、加工開始直後からの経過時間も同様に入力値として用い、ファジィ推論を行う。切削抵抗の時間的推移を監視し、ファジィ制御を行うことによって、意図する加工状態を作り出すような砥石押付け力および電解インプロセスドレッシングの電気量を出力する。

表1にファジィ制御プログラムで用いた制御ルールを示す。表中の F_t 、 F_n は切削抵抗を、Timeは加工経過時間を表している。また、MSP、MEDは各々砥石押付け力、電解インプロセスドレッシングの電気量の出力である。実験で用いたファジィプログラムは表1中すべての制御ルールを採用しているわけではなく、加工条件等により適宜選択して推論に用いて

Table 1 Fuzzy rules

Fuzzy production rules	
Rule 1. if F_n is "SMALL"	then MSP is "BIG"
Rule 2. if F_n is "MEDIUM"	then MSP is "MEDIUM"
Rule 3. if F_n is "BIG"	then MSP is "SMALL"
Rule 4. if F_t is "SMALL"	then MED is "BIG"
Rule 5. if F_t is "MEDIUM"	then MED is "MEDIUM"
Rule 6. if F_t is "BIG"	then MED is "SMALL"
Rule 7. if F_n is "SMALL" and Time is "SMALL"	then MSP is "BIG"
Rule 8. if F_n is "SMALL" and Time is "MEDIUM"	then MSP is "BIG"
Rule 9. if F_n is "SMALL" and Time is "BIG"	then MSP is "MEDIUM"
Rule 10. if F_n is "MEDIUM" and Time is "SMALL"	then MSP is "BIG"
Rule 11. if F_n is "MEDIUM" and Time is "MEDIUM"	then MSP is "MEDIUM"
Rule 12. if F_n is "MEDIUM" and Time is "BIG"	then MSP is "SMALL"
Rule 13. if F_n is "BIG" and Time is "SMALL"	then MSP is "MEDIUM"
Rule 14. if F_n is "BIG" and Time is "MEDIUM"	then MSP is "SMALL"
Rule 15. if F_n is "BIG" and Time is "BIG"	then MSP is "SMALL"
Rule 16. if F_t is "SMALL" and Time is "SMALL"	then MED is "BIG"
Rule 17. if F_t is "SMALL" and Time is "MEDIUM"	then MED is "BIG"
Rule 18. if F_t is "SMALL" and Time is "BIG"	then MED is "MEDIUM"
Rule 19. if F_t is "MEDIUM" and Time is "SMALL"	then MED is "MEDIUM"
Rule 20. if F_t is "MEDIUM" and Time is "MEDIUM"	then MED is "MEDIUM"
Rule 21. if F_t is "MEDIUM" and Time is "BIG"	then MED is "SMALL"
Rule 22. if F_t is "BIG" and Time is "SMALL"	then MED is "MEDIUM"
Rule 23. if F_t is "BIG" and Time is "MEDIUM"	then MED is "SMALL"
Rule 24. if F_t is "BIG" and Time is "BIG"	then MED is "SMALL"
Rule 25. if Time is "SMALL"	then MSP is "BIG"
Rule 26. if Time is "SMALL"	then MED is "BIG"
Rule 27. if Time is "MEDIUM"	then MSP is "MEDIUM"
Rule 28. if Time is "MEDIUM"	then MED is "MEDIUM"
Rule 29. if Time is "BIG"	then MSP is "SMALL"
Rule 30. if Time is "BIG"	then MED is "SMALL"

いる。推論方法にはファジィ制御で一般的に用いられているmin-max重心法⁴⁾を用いている。図2に入力値(ΔF_t 、 ΔF_n)に対するメンバーシップ関数を示す。 ΔF_t 、 ΔF_n は基準と考える加工抵抗との偏差である。ファジィラベルには Small, Medium, Bigの3つを用いた単純なものである。図3(a)にプロセスAにおける加工時間のメンバーシップ関数を、図3(b)にはプロセスBにおける加工時間のメンバーシップ関数を示す。プロセスBでは加工条件により加工時間を切削工程と研磨工程とに分けて算出するため、プロセスAとは異なる形状を示す。すなわち、Bigをクリスプ集合として定義しており、砥石が切削状態から研磨状態へと変化する時に加工時間はBigに入る。図4に出力に対するメンバーシップ関数を示す。いずれのメンバーシップ関数もメンテナンス性、処理速度等を考慮してできるだけ単純なものを用いている。

ファジィ制御プログラムの動作を確認するため、任意の入力値を与え、その出力を調べた。加工時間は120秒間としている。図5にプロセスAに $\Delta F_t=0$ 、 $\Delta F_n=0$ を与えた場合の、砥石

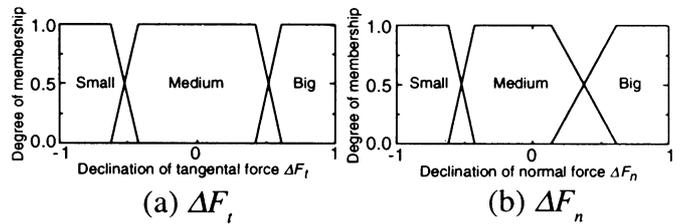


Fig. 2 Membership function for input data

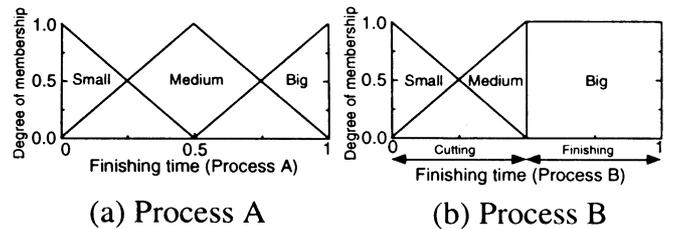


Fig. 3 Membership function for finishing time

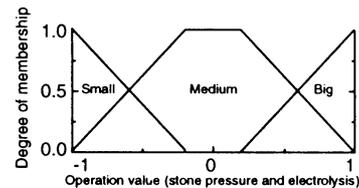


Fig. 4 Membership function for output data

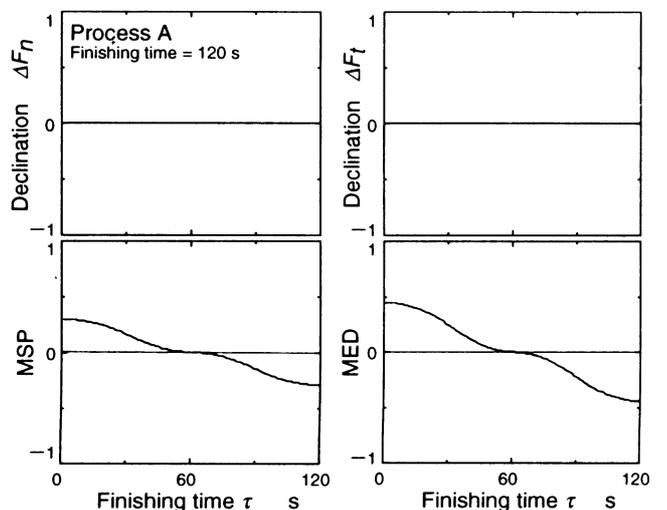


Fig. 5 Output toward invariable finishing resistance

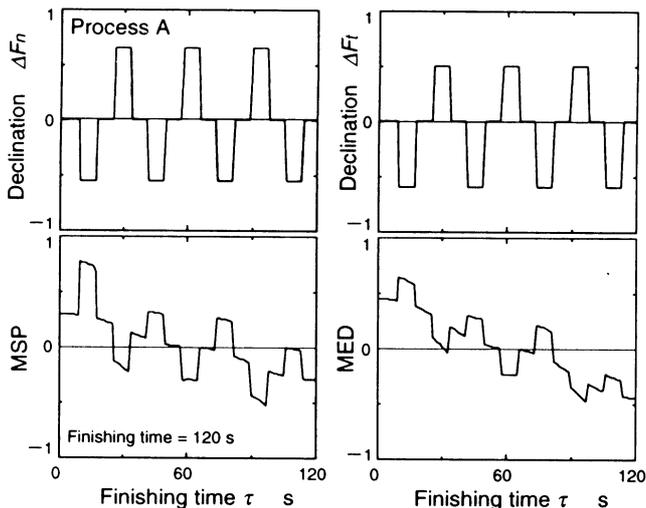


Fig. 6 Output toward variable finishing resistance

押付け力の出力値MSP, 電解インプロセスドレッシングの電気量の出力値 MEDを示す。MSP, MEDはいずれも加工初期に大きく, 加工が進むとともに低下し, ある値に収束している。この変化の様子はW A 砥石の切削抵抗の時間的変化⁷⁾と同様な傾向を示していることがわかる。すなわち加工初期段階では切削状態にあるため F_t は大きい, 加工進行とともに目づまりが生じて切れ味が失われ, F_t は次第に減少して低い値に収束していく。図5より, 定められた時間内でW A 砥石を用いた場合と同様に, メタルボンド砥石を切削状態から研磨状態へと制御することが期待できる。図6は変動入力(基準入力に外乱を加えたもの)を与えた場合の結果である。切削抵抗が変動して安定した加工が行われていない場合, 切削抵抗の変動を抑えるように砥石押付け力・電解ドレッシングの電気量をコントロールしており, プログラムが適切な動作をしていることがわかる。

2.2 実験装置

実験は円筒状加工物の外周面を仕上げる円筒超仕上げで行った。図7に実験装置の模式図を示す。本実験装置では従来の円筒超仕上げ装置とは異なり, 角柱状砥石の代わりにリング状の青銅系メタルボンド砥石④を用いる。砥石④は振動ユニット⑨により加振され, 加圧アーム⑧により加工物に押し付けられている。リング状砥石のエアカット部と対偶する陰電極⑤との間に電界を生じさせ, 電解インプロセスドレッシングを行うことにより, 砥石作業面の状態をコントロールする。また, スピードコントロールモータ⑦によって極低速回転(3.14rpm)させられているため, 常時切れ味を調えた砥石で加工を行うことができる。

2.3 加工条件

表2に主な加工条件を示す。砥石にはリング状の青銅系メタルボンドダイヤモンド砥石(SD4000M:#4000, 抗折強度 $\sigma_b=400\text{MPa}$)を用いた。本実験で用いる砥石は一般の金属材料の加工に用いられる砥石($\sigma_b=100\text{MPa}$)に比べ非常に大きな砥粒保持力を持っている⁸⁾。加工物には円筒状のS45Cを用いた。また, 電解インプロセスドレッシングを行うため, 加工液には水溶性加工液を用いている。表3に使用した加工液の簡単な組成を示す。この加工液は界面活性剤を多量に含有するソリュブルタイプの研削液(50倍希釈:日本グリース(株)製TC-800)である。なお, 加工液温度は常時監視し, 25℃一定

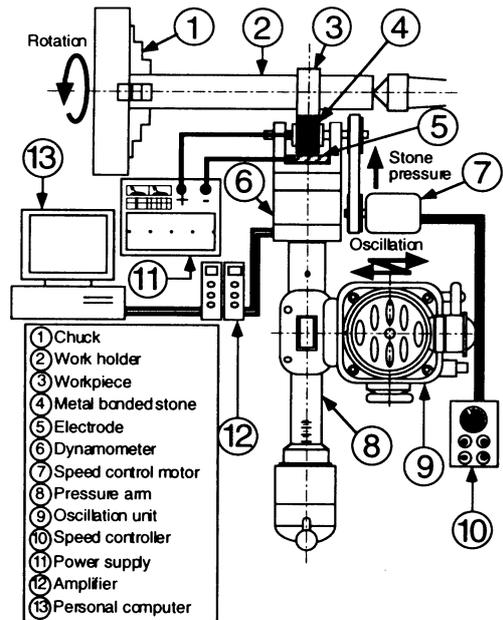


Fig. 7 Schematic illustration of superfinishing machine

Table 2 Main experimental conditions

Stone	SD4000M ($\sigma_b = 400\text{MPa}$)
Workpiece	S45C (HV168)
Coolant	TC-800 X 50 (298K)
Frequency	900 cpm
Amplitude	1.6 mm
Revolution of work	272 rpm
Revolution of sone	3.14 rpm
Initial stone pressure	54 N

Table 3 Characteristics of coolant

Coolant	TC-800
Coolant type (JIS)	W2-1
Fatty acid / its derivative mass %	11
Alkanolamine mass %	13
Surface active agent mass %	30
Rust inhibitor mass %	15
Others mass %	0.5
Water mass %	31.5
pH (X30)	8.7
Surface tension (X30, 10^{-3}N/m)	35.5

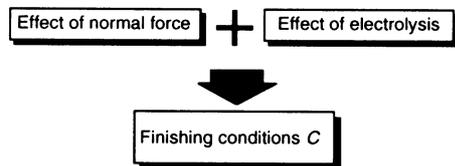


Fig. 8 Relation between finishing conditions and some effects

に保った。電極寸法は砥石作業面積の1/4, 砥石-電極間のギャップは1mmとした。

本研究では図8に示すように砥石押付け力 F_n と電解の電気量を組み合わせて, 加工条件の過酷さを表わしている。Cが大きくなるほど砥石の切削性は増し, 多くの加工量を得ることができる。

*これらの量は次元が異なるため, 基準押付け力(ここでは50N)に対する F_n の割合, 及び一定時間内でどれだけの時間電気を流したかの割合をそれぞれ算出し, それらを加えている。

3. 実験結果

3.1 加工時間入力型制御（プロセスA）

加工特性を制御するにあたり、加工条件によって決められた時間内にどれだけの加工量・仕上面粗さが得られるのかあらかじめ調べておく必要がある。そこで加工物に S45C を用い、加工時間を120秒間として実験結果より加工制御範囲を調べてみた。その結果を図 9 に示す。図より加工条件 C を変化させることによって加工量 $\Delta D=0.45\sim 2.00\text{mm}^3$ 、仕上面粗さ $Ra=0.06\sim 0.11\mu\text{m}$ までの範囲内でコントロールが可能であることがわかる。したがって加工始めに加工条件 C が過酷になるように設定し、加工後半で C を緩やかな条件に設定することにより、多くの加工量を得ながらも優れた加工面を得るといった相反する要求にこたえることが可能となる。

図10に (I) 電解インプロセスドレッシングを行わない場合、(II) 加工時間中終始電解インプロセスドレッシングを行った場合、(III) プロセスAにより加工特性を制御した場合の切削抵抗 F_t の比較を示す。I, II の場合は砥石押付け力は54N一定としている。図よりIの場合、加工時間の経過とともに砥石は目づまり状態となり、切削抵抗は減少している。一方、終始電解インプロセスドレッシングを行ったIIの場合、 F_t は変動しながらも加工終了までほぼ一定値を保っている。これらに対し、プロセスAにより制御したIIIの場合、加工始めに大きな値を示し、次第に電解ドレッシングを全く行

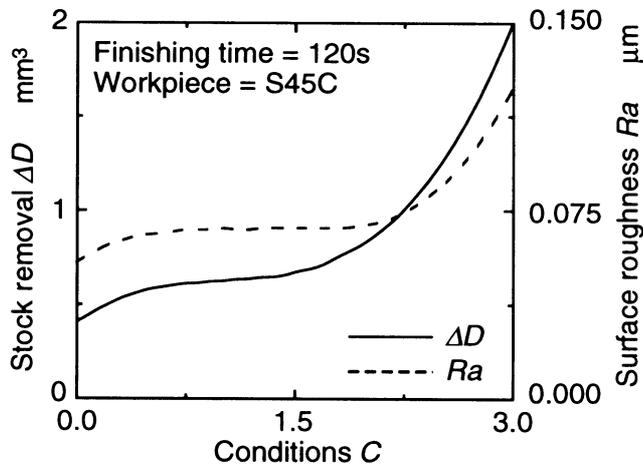


Fig. 9 Range of fuzzy control

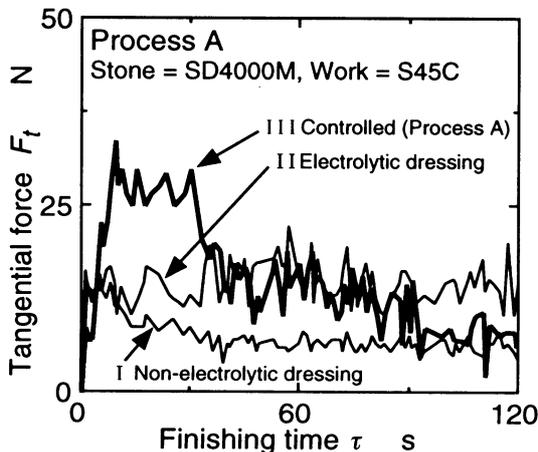


Fig. 10 Comparison of finishing resistance

わなかったIの場合に近づいている。加工始めに条件Cを過酷にすることにより、加工量を重視し、終盤でCを小さくし、仕上面重視の加工へと変化していることがわかる。図11にこの時の加工結果を示す。電解インプロセスドレッシングを全く行わないIの場合、切削工程が短く、砥石はすぐに研磨工程へと入るため仕上面粗さは良好だが加工量は少ない。一方、終始電解インプロセスドレッシングを行ったIIの場合、砥石は常に切削工程にあるため加工量は大きくなるものの仕上面粗さは悪い。これに対しプロセスAにより加工特性を制御したIIIでは多くの加工量を得ながらも、仕上面粗さも良好といった結果を得ており、加工特性の制御効果が現れていることがわかる。制御を行うことにより、W A 砥石を用いた場合と同様、粗加工から仕上げ加工までを同一砥石で行うことができる可能性のあることがわかる。

3.2 加工目標値入力型制御（プロセスB）

プロセスBでは目標とする加工量および仕上面粗さ等の加工目標値を入力することによって所要加工時間を切削工程と研磨工程とに分けて算出し、加工目標値を得るように砥石押付け力、電解インプロセスドレッシングの電気量をコントロールする。表 4 に設定した目標加工量および仕上面粗さの一例を示す。必要に応じてこの条件は様々に変化させることができる。加工回数は1回である。表4の目標値に対する加工結果を図12に示す。図12よりA, B, Cいずれも目標加工量および仕上面粗さを得ており、プロセスBの制御が適切であることがわかる。

同様の加工を連続して行うことができるかを調べるために、加工目標値を表4のBとして連続10回の加工を行った。この時の切削抵抗を図13に示す。連続した加工を行っても切削抵抗 F_t は加工回数によらずほぼ同様な傾向を示している。加工始めに大きく、終了時には小さくなっており、同じ切削性能が繰り返し得られていることがわかる。このため、図14にみられるように、連続した加工を行ってもほぼ目標の加工

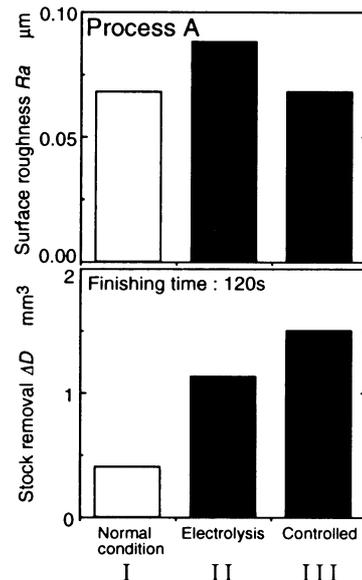


Fig. 11 Comparison of finishing performance

Table 4 Finishing aim

	Stock removal	Surface roughness
A	1 mm ³	0.076μm and over
B	1 mm ³	0.060-0.064μm
C	2 mm ³	0.060-0.064μm

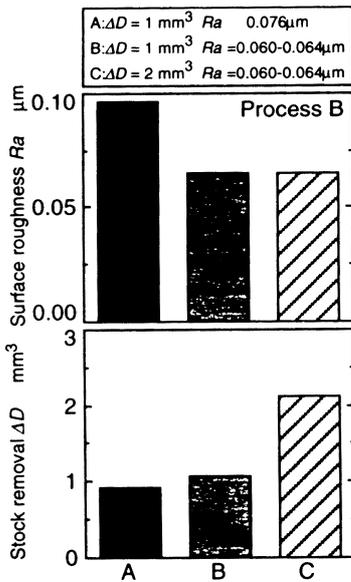


Fig. 12 Results of finishing performance

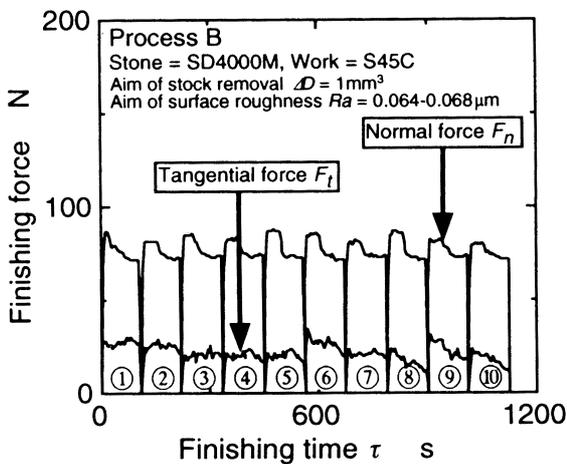


Fig. 13 Finishing resistance of Process B

量を得ることができている。また、仕上面粗さも連続加工回数によらず、ほぼ目標通りの値を得ている。

プロセスBにより加工を中断して機械的ドレッシングを行うことなく砥石の切削性能を切削状態→研磨状態→切削状態→研磨状態・・・と連続的に変化させることが可能となり、金型のような加工表面の大きな部材に対する長時間加工も効率よく行うことができる。

4. 結 言

メタルボンドダイヤモンド砥石を用いた超仕上加工にファジー制御を適用し、普通砥石の切削能力の推移を基本として砥石の切削性能のコントロールを試みた結果、以下のような結論を得た。

- (1) ファジー制御を行うことにより、砥石の切削性能を切削状態から研磨状態へと意図的に変化させることが可能であり、粗加工から仕上加工までを同一砥石で加工可能である。
- (2) 加工時間入力型の制御では、より多くの加工量を得ながらも、より良好な仕上面を得るといった相反する要求

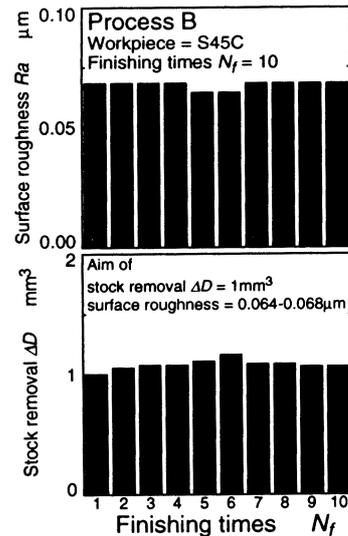


Fig. 14 Finishing performance of Process B

にこたえることができる。

- (3) 加工目標値入力型の制御では要求した加工量・仕上面品位に合うよう、電解ドレッシングの電流量、砥石押付け力、加工時間をコントロールすることができる。
- (4) 同一加工量・仕上面品位の加工を連続して行った場合でも、機械的ドレッシング無しに連続的な加工サイクルを実現させることが可能である。

終わりに、実験材料の提供を受けた(株)ミズホ、(株)日本グリースに感謝します。

参 考 文 献

- 1) 例えば、佐久田 茂，足立幹雄，小川 潔，上田勝宣：超精密位置制御に関する研究（第1報）－粗・微動の連動制御－，精密工学会誌，57，12（1991）2133。
- 2) 例えば、中島利勝，塚本真也，村上大介，倉田勝弘：ファジー・インプロセス制御研削加工－研削加工プロセスの知的自動化に関する研究（第1報）－，精密工学会誌，58，2（1992）313。
- 3) 例えば、中島利勝，塚本真也，村上大介，安田浩隆：ニューロ&ファジー・インプロセス制御研削加工－研削加工プロセスの知的自動化に関する研究（第3報）－，精密工学会誌，59，8（1993）1313。
- 4) 例えば、日本ファジー学会編：ファジー制御，日刊工業新聞社，（1993）4。
- 5) 例えば、河村未久，矢野章成，樋口誠宏，杉田忠彰：研削加工と砥粒加工，共立出版，（1984）182。
- 6) 松森 昇：超砥粒による精密砥粒加工技術，機械の研究，42，4（1990）482。
- 7) 例えば、上田隆司，金曾久佳，杉田忠彰：超仕上の加工機構に関する研究，日本機械学会論文集C編，57，538（1991）2154。
- 8) 上田隆司，花見真司，平野 聡，山本 明：ファインセラミックスのホーニング加工－ダイヤモンド砥石の結合剤が切削性能に及ぼす影響，精密機械，51，6（1982）1195。