

超仕上における砥石の切れ味制御*

上田 隆 司** 坂 本 智*** 杉 田 忠 彰**

Control of Cutting Ability in Superfinishing

Takashi UEDA, Satoshi SAKAMOTO and Tadaaki SUGITA

A new method of the superfinishing is investigated, in which the cutting ability of diamond stone is controlled by changing the strength of electrolytic in-process dressing. Water-solution type coolant and metal bonded stone are used to employ the electrolytic dressing. As work materials, a carbon steel S 45 C, a bearing steel SUJ 2 and alumina are used. The results obtained are as follows. It is effective for control of electrolytic dressing to change the operating time of electrolysis or the ratio of on-time to off-time in electric pulse. As the dressing becomes stronger, the cutting ability of stone improves and the metal removal rate becomes larger. As the dressing becomes weaker, the cutting ability of stone is lost and then the surface roughness of workpiece becomes smaller. The cutting ability of stone which has been lost in finishing operation can be regenerated again applying the strong electrolysis. This in-process dressing method makes it possible to obtain the intended finishing performances of metal removal rate and surface roughness, and to finish several work materials of different machinability using a same kind of stone.

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

1. 緒 言

超仕上加工では砥石が切削状態から磨き状態へと変化することにより短時間に優れた加工面を得ることができる。ところが、砥石寿命が短いことから、生産性に重点を置く場合、ダイヤモンドやCBNといった超砥粒砥石が用いられるようになってきている。超砥粒砥石を用いた場合、ボンドによる砥粒保持力が大きいこと、砥粒が摩耗しにくいことなどから、普通砥石のように短時間の間で切削状態から磨き状態へと変化させることはできない。このため砥石は常に切削状態を保つように工夫されており、仕上面粗さを向上させるためには粒度の細かい砥石に交換する必要がある。このとき、砥石の切れ味を加工中にコントロールすることで、加工状態を切削状態から磨き状態へと意図的に変化させることができれば、一つの砥石を荒加工から仕上加工までの広い範囲で使用できる期待が持てる。また、ダイヤモンド砥石は一般に加工材料に合わせて砥粒保持力を選ぶことから、材料が多種類に及ぶとき、異なる結合度の砥石を多数準備する必要がある。ところが、砥石の自生作用をコントロールすることにより、任意の切れ味を砥石に持たせることができれば、わずかな種類の砥石で広い範囲の加工材料をカバーできる可能性もある。さらに、金型のような加工表面の大きな材料を長時間かけて仕上げるとき、加工状態を一定に保つことは難しく、加工を中断してドレスを行わなければならない。しかし、加工抵抗を監視信号として砥石の切れ味を一定にコントロールできれば、長時間の加工が可能となる。

一方、フライスや研削などによる加工ラインに超仕上を組み込む場合、油性加工液の使用が大きな障害となっており、研削液と同じ水溶性加工液を用いることが望まれている。また、廃液処理の面からも水溶性加工液の使用は有利である。ところが、水溶性加工液は浸透性に劣るため、砥石作業面からの切りくず除去能力に劣り、このままでは砥石はすぐに目づまり状態

となって加工が継続できなくなる。著者らはこれまで電解インプロセスドレッシングを併用して、砥石の目づまりを防ぎ、自生作用を適度に促進する方法について詳細に検討し、水溶性加工液の使用が十分可能であることを確かめてきた¹⁾²⁾。

そこで本研究では、超仕上加工に水溶性加工液を用いて電解インプロセスドレッシングを併用することにより、ダイヤモンド砥石に任意の切れ味を持たせ、意図する加工状態をインプロセスで作りながら行う新しい加工法の可能性について検討してみた。

2. 実験方法

2.1 実験装置

実験は砥石に一定の圧力を与えて円筒状加工物の外周面を仕上げる円筒超仕上で行った。図1に実験装置の模式図を示す。本実験装置では従来の超仕上加工に電解インプロセスドレッシングを併用するため、従来の円筒超仕上装置と異なり、角柱状砥石の代わりにリング状砥石④を用いている。リング状砥石のエアカット部を種々の条件下で電解インプロセスドレッシングし、スピードコントロールモータ⑧で超低速回転させることにより、切れ味を調整した砥石を加工に用いることができる。砥石の回転速度は加工物の回転速度に比べて非常に小さく(例えば、3.14:272 (rpm))、従来の超仕上と同等な加工状態が期待できる。円筒状加工物③はワークホルダ②に取り付け、旋盤のチャック①に固定して回転運動を与えている。砥石は切削抵抗測定用動力計⑤を介して加圧アーム⑦により一定圧力で押し付けるとともに振動ユニット⑩により加振する。電解電源⑥には直流パルス電源ECD-91((株)ソディック製)を用いている。

図2に加工物-砥石-電極の配置を示す。図中の矢印は加工物および砥石の回転方向を示す。加工物-砥石間の接触はリング状砥石を用いているため線接触に近い状態となる。このため、小さな砥石押付け力でも砥石圧力は大きくなる。また、従来の円筒超仕上装置に比べ、加工物-砥石間の切りくず排出性に優れている。電極面積は砥石作業面積の1/4とし、砥石-電極間

* 原稿受付 平成8年2月1日

** 正会員 金沢大学工学部(金沢市小立野2-40-20)

*** 学生会員 金沢大学大学院

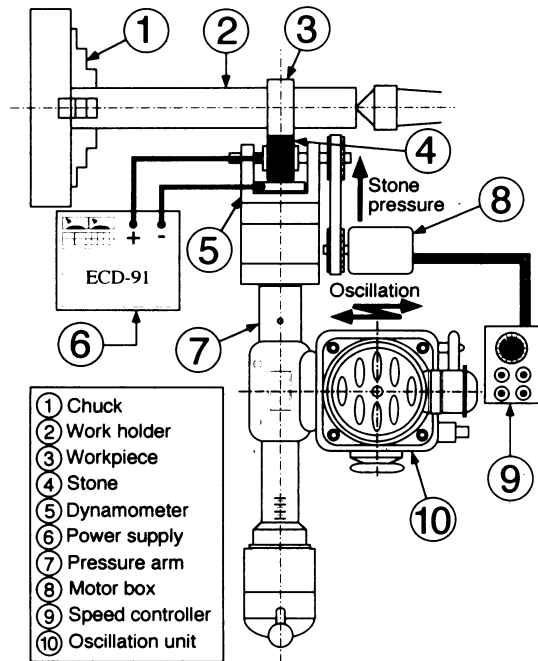


Fig. 1 Schematic illustration of main part of superfinishing machine

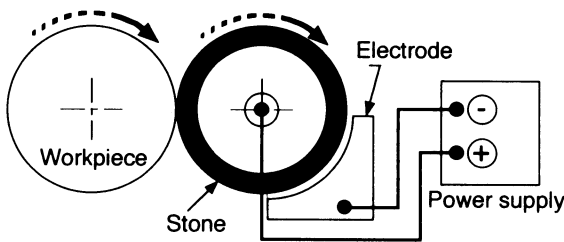


Fig. 2 Experimental setup (Workpiece-Stone-Electrode)

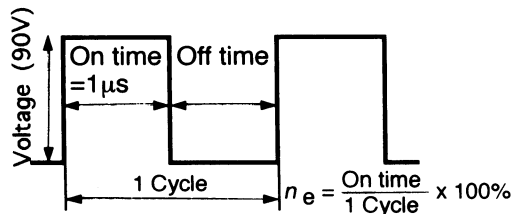


Fig. 3 Definition of pulse

のギャップは1 mmとした。図3に直流パルス電源より供給されるパルス幅（オンタイム，オフタイム）の定義を示す。実験中，印加電圧は90 V一定とした。電解作用の調節には供給電圧パルスのオンタイムを1 μs一定とし，オフタイムの長さを変化させることにより行った。

測定量は切削抵抗接線方向分力（主分力） F_t ，切削抵抗法線方向分力（砥石押付け力） F_n ，仕上面粗さ R_a ，全除去体積 ΣD である。なお，振動方向の分力は小さく無視できる。

2.2 加工条件

表1に加工条件を示す。リング状の砥石を用いた新しい加工法であることから，砥石回転数を1~6 rpm，加工物回転数を80~700 rpm，砥石押付け力を10~110 Nの間で変化させ，砥石切込み深さ \bar{d} が大きく，比加工エネルギー k_s が小さく，かつ仕上面粗さ R_a が小さくなる条件を見出した結果である。

表2に使用した砥石，加工物，加工液を示す。砥石はプロン

Table 1 Experimental conditions

Revolution of stone	3.14 rpm
Revolution of work	272 rpm
Normal force (Stone pressure)	45-50 N
Frequency	907 cpm
Amplitude	1.6 mm

Table 2 Used materials

Stone	SD 4000 M ($\sigma_b=400$ MPa) Ring type ($d=45$ mm, $b=20$ mm, $w=5$ mm)
Workpiece	S 45 C (HV 168) SUJ 2 (HV 772) Al_2O_3 (HV 1580) Cylinder shape ($D=45$ mm)
Coolant	TC-800×50 (25°C) Water-solution type

ズ系メタルをボンドとした#4000のダイヤモンド砥石である。砥粒保持力を間接的に表す抗折力は $\sigma_b=400$ MPaと一般の金属材料の加工に用いられる $\sigma_b=100$ MPaに比べるとはるかに大きくしている³⁾。このまま用いると砥粒保持力が大きすぎるため，すぐに目つぶれを起こす危険があるが，電解ドレッシングでカバーすることになる。

加工物には炭素鋼S 45 C，軸受鋼SUJ 2および常圧焼結の Al_2O_3 を用いた。いずれも円筒状をしており，外径 $D=45$ mm，幅 $B=20$ mmである。

加工液には，電解ドレッシング加工に優れた特性を示す研削液TC-800（日本グリース(株)製）を50倍に希釈して用いた。浸透性を向上するため，多量の界面活性剤を添加している¹⁾。

2.3 データ整理

加工条件の適正，砥石の切削性，加工材料の被削性等を判定するために評価関数“砥石切込み深さ \bar{d} ”，“比加工エネルギー k_s ”を用いる^{4)~6)}。 \bar{d} および k_s は円柱状加工物の半径減少速度 $d(\delta R)/d\tau$ と加工抵抗接線方向分力 F_t を用いることにより次式で表される。 a ：砥石振動の振幅， B ：加工物幅， D ：加工物直径， b ：砥石幅， V_w ：加工物周速度， ω ：砥石振動の角速度， ϵ ： $(B-b)/2$ とすると，

$$\bar{d} = \frac{\pi^2 DB}{V_w} \left\{ \pi b - 2a \cos\left(\sin^{-1} \frac{\epsilon}{a}\right) + \epsilon \left(\pi - 2 \sin^{-1} \frac{\epsilon}{a} \right) \right\}^{-1} \frac{d(\delta R)}{d\tau} \quad (1)$$

$$k_s = \frac{2F_t V_w}{\pi^2 DB} (1+K^2)^{1/2} E(k) \frac{1}{\frac{d(\delta R)}{d\tau}} \quad (2)$$

ただし， $K=aw/V_w$ ， E は第2種楕円積分， $k^2=K^2/(1+K^2)$ である*。

加工実験において円柱状加工物の厚さ減少速度 $d(\delta R)/d\tau$ および加工抵抗接線方向分力 F_t を測定することにより \bar{d} ， k_s を求めることができる。 \bar{d} が大きく k_s が小さい場合，砥石が切れ味の優れた状態にあると判断できる。

3. 実験結果

3.1 リング状砥石の仕上面への影響

超仕上げでは一般に角柱状の砥石を一定圧力で加工材料に押し

* 本研究の加工条件では $\epsilon=0$ ， $K=0$ より $E(k)=\pi/2$ 。

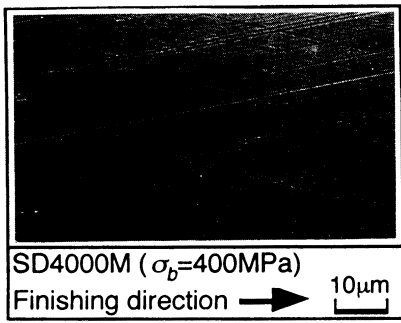


Fig. 4 Example of work surface

付けることによって加工を行う。このとき、砥石は加工物と面接触状態となる。ところが、本研究ではインプロセスで電解ドレッシングを施すため、図2にみるようにリング状の砥石を用いている。砥石は毎分回転程度のゆっくりとした回転しかしないことから、加工面上の砥粒切れ刃の軌跡は従来の角柱状砥石と変わらないと考えられる。ところが、砥石-加工面の接触状態が線接触に近い状態となることから、加工条痕が従来の超仕上と異なる恐れがある。そこで、表1の加工条件のもとで加工した加工物表面を走査電顕で調べた結果が図4である。図より、加工条痕が明りょうに交差して従来と同様の加工面が得られており、リング状の砥石を用いても問題のないことがわかる。

3.2 電解ドレッシングの砥石切れ味への影響

超仕上では一般に砥石圧力によって砥石の切れ味をコントロールしているが、加工量や仕上面粗さを微調整する程度でそのコントロール範囲は狭い。特に、砥石の切れ味を落としていったん磨き状態にしてしまうと、砥石圧力の変化だけで切削状態に戻すことは難しい。磨き状態で砥石圧力を上げれば目つぶれ状態になり、さらに圧力を上げれば砥石の大破砕もしくは破壊に至る危険性もある。

図5は砥石圧力を一定として、電解ドレッシングの強度を変化させて切れ味を制御した結果である。図3に示す電圧パルスのオンタイムの占める比率 n_e を変化させており、 n_e が大きくなるほど電解ドレッシングの強度は強くなる。電解ドレッシングが強くなるに従い \bar{d} が大きくなり、 k_s が小さくなっており、砥石の切れ味が大きく向上していることがわかる。しかも、 \bar{d} と n_e の間にはほぼ直線関係があり、砥石の切れ味制御に電解ドレッシングが適していることがわかる。一方、仕上面粗さも n_e に比例して粗くなるが、上限のあることを示している。なお、 n_e を大きくして電解ドレッシングの強度を強くしすぎると切れ刃砥粒の脱落が起こり、砥石の切れ味は低下することになるため必ずと限界がある。

図6は砥石切れ味の経時変化を調べた結果である。 ΣD は加工による全除去体積を表している。電解ドレッシングの強度を弱くした $n_e=1\%$ と強くした $n_e=33.3\%$ の場合の加工量を比較している。いずれの場合も加工時間の経過とともに加工量は直線的に増大しており、電解をかけることにより砥石がコンスタントな切れ味を持続し続けていることがわかる。

3.3 砥石切れ味の制御方法

先の結果より、電解の強さを大きくすると砥石の切れ味が大きく向上すること、逆に小さくすると切れ味を抑えて仕上面粗さを小さくできることがわかった。そこで、ここでは具体的に加工中に砥石の切れ味を制御する方法を考えてみる。なお、実

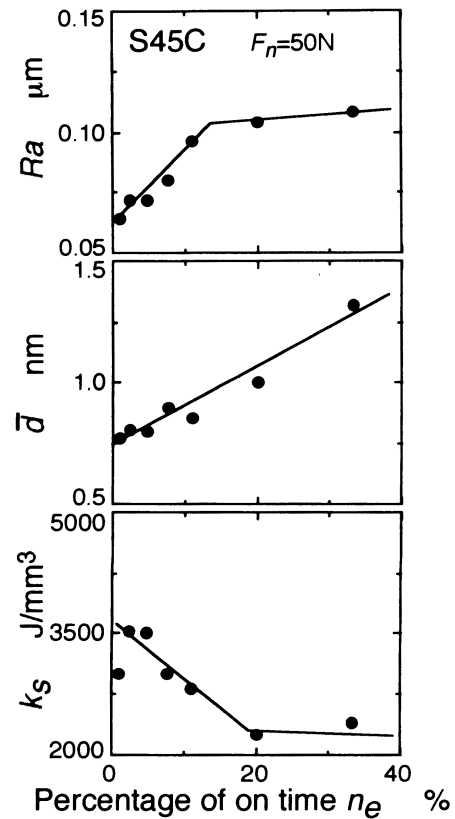


Fig. 5 Influence of percentage of on time on finishing performance

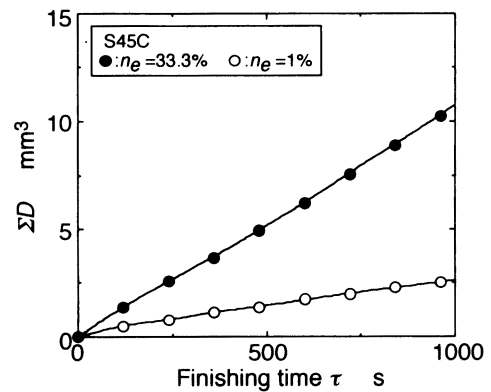


Fig. 6 Comparison of cutting ability

験装置の都合上電圧を大きく変化できないため、ここでは電解時間や比率 n_e を変えることによって電解強度を変化させている。

3.3.1 電解時間による制御

加工開始時から所定の時間 τ_d だけ電解インプロセスドレッシングを行い、それ以後は電解無しで加工を行い、トータルで120秒間の加工を施している。すなわち、電源のオン・オフによる制御で、単純かつ確実な制御方法である。電解時間 $\tau_d=0, 30, 60, 90, 120$ s の5つの場合の加工特性を比較した結果が図7である。 $\tau_d=0$ s は全く電解ドレッシングを施さなかった場合、 $\tau_d=120$ s は加工中電解ドレッシングを続けたことを表している。比率は $n_e=33.3\%$ と一定としている。 τ_d を長くすると \bar{d} は大きくなり、逆に k_s は小さくなっており、砥石の切れ味がコントロールされていることがわかる。また、仕上面粗さも変化領域は狭いながらも τ_d に比例して変化しており、 τ_d の

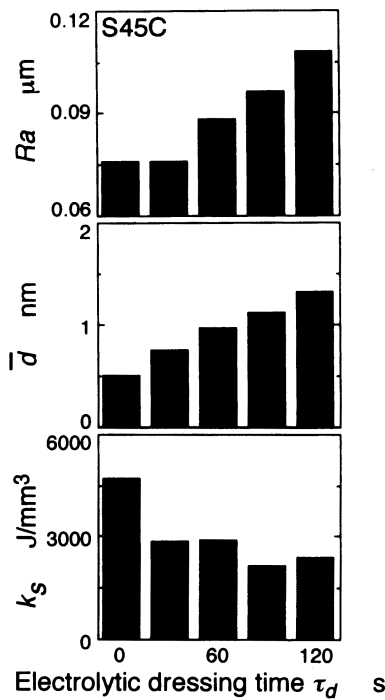


Fig. 7 Influence of electrolytic in-process dressing time on finishing performance

長さで砥石の加工状態を十分制御できるといえる。すなわち、仕上面粗さよりも加工量が要求される場合は、加工開始より加工終了まで電解をかけ、仕上面粗さが重視される場合は所定の時間で電解を弱めれば求める粗さに仕上げることができる。従って、電解時間と加工時間との組合せにより様々な要求にこたえうる加工が可能となる。

ここで、いったん低下してしまった切れ味を回復できるかどうかを調べておく必要がある。そこで、砥石の切れ味の回復程度を調べるため、30秒ごとに電解電源のオン・オフを行い、その影響を調べてみた。比率 $n_e=33.3\%$ と一定としている。得られた切削特性が図8である。電解を止めると \bar{d} が小さくなるが、電解を再開すると \bar{d} は再び増加して元の加工状態に戻っている。仕上面粗さは、振れ幅は小さいものの、オン・オフによって変化している。しかも、加工時間が長くなってもほぼ同様の傾向を示しており、砥石の切れ味が安定した状態でコントロールされていることがわかる。

3.3.2 比率 n_e による制御

比率 n_e を変化させることで、加工進行に伴う砥石の切れ味の変化具合を調べた結果が図9である。 $n_e=33.3\%$ の電解ドレスをかけた状態から始め、 $n_e=11.1\%$ 、 2.4% 、 0% と減少させているが、電解ドレスの効果を下げることによって、 \bar{d} が減少し k_s が大きくなって砥石の切れ味は抑えられ、仕上面粗さが向上している。ところが、 $n_e=50\%$ の電解ドレスをかけると、 \bar{d} が大きくなって k_s が小さくなっており、砥石の切れ味を磨き状態から簡単に回復できる。従って、比率 n_e をコントロールすることによっても砥石切れ味を十分制御できるといえる。

3.4 SUJ2 への適用

図10に加工材料にSUJ2を用いて比率 n_e の砥石切れ味への影響を調べた結果を示す。図5と同様、 n_e を大きくして電解ドレッシングの強度を強めるに従い \bar{d} が直線的に大きくなり、 k_s が減少していることから、 n_e により切れ味をコントロールできることがわかる。すなわち、同一砥石を用いても電

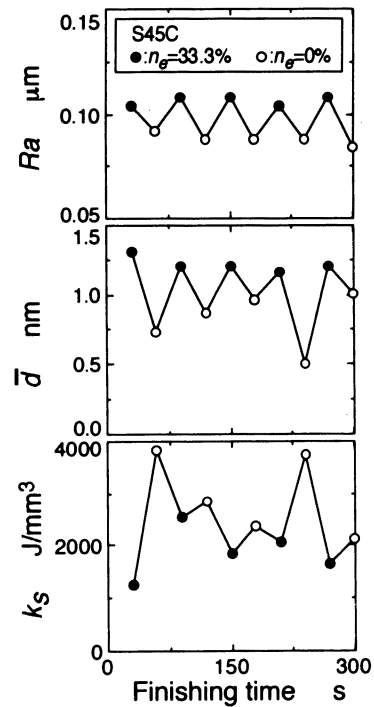


Fig. 8 Control of finishing performance by switching of power supply

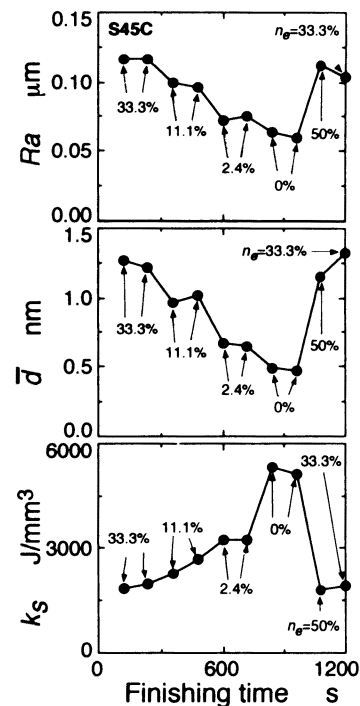


Fig. 9 Effect of electrolysis dressing

解の強さを変えることで異なる加工材料の加工にも対応できる可能性が十分あることがわかる。しかし、この材料の場合、仕上面粗さに対しては大きな変化はなく、粗さに対する制御は難しいといえる。

3.5 Al_2O_3 への適用

図11に加工材料に Al_2O_3 を用いて比率 n_e の砥石切れ味への影響を調べた結果を示す。図5, 10と同様、 n_e を大きくして電解ドレッシングの強度を強めるに従い \bar{d} が直線的に大きくなり、 k_s が減少していることから、 n_e により切れ味をコント

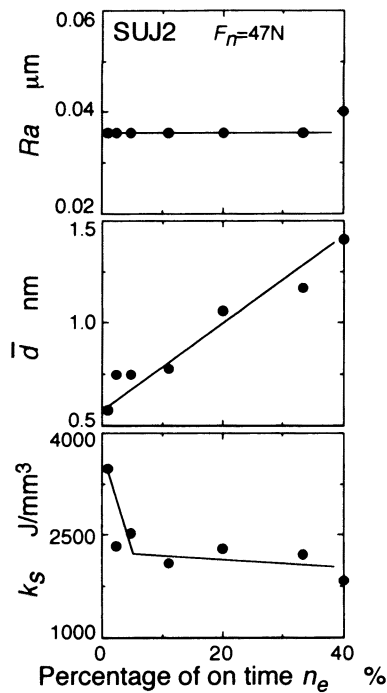


Fig. 10 Influence of percentage of on time (SUJ2)

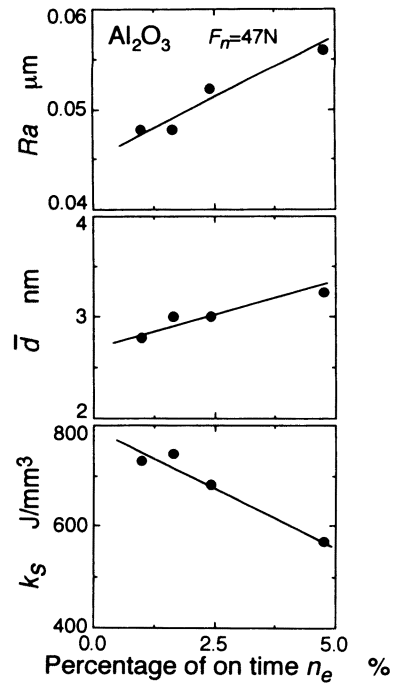
ロールできることがわかる。また、砥石の切れ味の増加と共に仕上面粗さ R_a も増加しており、粗さの制御も可能であることがわかる。

Al_2O_3 は S 45 C, SUJ 2 などの金属材料に比べ、砥石の目づまりが生じにくいことから、微少な電解を行うことでドレス効果は得られる。同一砥石を用いても電解の強さを変えることで炭素鋼 S 45 C, 軸受鋼 SUJ 2 および Al_2O_3 セラミックスのように多種多様な材料の加工にも対応できる可能性が十分あることがわかる。

4. 結 論

円筒超仕上に電解インプロセスドレッシングを併用し、その電流量を調整することにより砥石の切れ味の制御を試みた結果、以下のような結論を得た。

- (1) 電解インプロセスドレッシングを併用することにより、種々の加工状態を意図的に作り出すことが可能であり、容易に所定の加工量、仕上面粗さを得ることが可能である。
- (2) 電解の強度は電解時間およびオンタイムの比率で容易に調整可能である。
- (3) 一度失われた砥石の切れ味も電解インプロセスドレッシングを行うことにより、加工を中断することなく加工当

Fig. 11 Influence of percentage of on time (Al_2O_3)

初の切れ味に回復可能である。

- (4) 電解の強さで砥石の切れ味をコントロールすることにより、被削性の異なる種々の加工材料を同一砥石で加工できる可能性がある。

終わりに、本研究の遂行に当たり、実験材料等の提供を受けた日本グリース(株)、(株)ミズホに深く感謝します。

参 考 文 献

- 1) 上田隆司, 坂本 智, 杉田忠彰: 水溶性加工液による超仕上, 精密工学会誌, 62, 2 (1996) 252.
- 2) 上田隆司, 坂本 智, 杉田忠彰: 超仕上における砥石の切れ味制御, 1995年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, (1995) 165.
- 3) 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.
- 4) T. Ueda and A. Yamamoto: An Analytical Investigation of the Honing Mechanism, Trans. ASME, J. Eng. Ind., 106, Aug. (1984) 237.
- 5) 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.
- 6) 上田隆司, 山本 明: ホーニング機構に関する一考察, 精密機械, 48, 11 (1982) 1514.