

Studies on Superfinishing Mechanism

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2017-10-03 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/2297/36972

超仕上の加工機構に関する研究*

上田 隆司*¹, 金曾 久佳*², 杉田 忠彰*¹

Studies on Superfinishing Mechanism

Takashi UEDA, Hisayoshi KANESO and Tadaaki SUGITA

Both an evaluating function \bar{d} to present the overall severity of superfinishing conditions and an equation k_s to calculate the specific finishing energy are derived theoretically, assuming that one stick corresponds to a single point tool with a long cutting edge. Some experiments are carried out to confirm the propriety of these results. The k_s - \bar{d} relation calculated from the experimental results is useful in the evaluation of the machinability of work materials and the cutting ability of the stick. Moreover, this relation makes it possible to compare the superfinishing in the production rate and the surface refinement with the honing.

Key Words: Manufacturing Technology, Superfinishing, Evaluating Function, Specific Finishing Energy, Machinability, Cutting Ability, Production Rate, Surface Refinement, Honing

1. 緒 言

近年、超仕上においても加工材料の多様化や生産能率の向上のため、ダイヤモンドやCBNといった超砥粒砥石が使われるようになってきた。ところが、超仕上はホーニング⁽¹⁾⁻⁽⁴⁾と同様、同一砥石面が加工物に接触しながら加工を行うことから切れ刃の摩耗が早く、砥石の切れ味を保つためには切れ刃に適度の自生作用を促す必要がある。このため砥石の損耗が速くなり、研削機構の解析においてなされているような“砥粒は脱落したり摩耗したりせず、切れ刃の形状は変化しない”とする仮定を、そのままこの加工法に適用することはできない。このような場合、個々の砥粒切れ刃に注目することはせず、巨視的に砥石を1個の工具とみなして加工過程をモデル化して扱う解析手法⁽¹⁾⁽²⁾が有効となる。

そこで本研究では、この解析手法を超仕上に適用することにより、加工状態の過酷さを把握するための評価関数を理論的に導出するとともに、加工実験を行い導出した評価関数の有効性を調べてみた。この手法で

導出した評価関数を用いれば、加工条件の過酷さを把握できるだけでなく、加工材料の被削性、砥石の切削性などの判定が可能となり、さらに加工能率・生産性・精度レベルなどの点に関して、ホーニング、研削加工、ベルト研削といった他の加工方法と同一基準で比較することも可能になると考えられる。

使用記号

- a : 砥石振動の振幅 mm
- A : 1回の振動の間に砥石がはく加工物表面積 mm^2
- ΣA : 砥石がはく加工物表面積の総和 mm^2
- b : 砥石幅 mm
- B : 加工物幅 mm
- \bar{d} : 切込み深さ nm
- D : 加工物直径 mm
- δD : 加工物直径減少量 μm
- ΔD : 切削量 mm^3
- $E(k)$: 第二種だ円積分
- F_n : 加工抵抗法線方向分力 N
- F_t : 加工抵抗接線方向分力 N
- $k^2 = K^2/(1+K^2)$
- k_s : 比加工エネルギー J/mm^3

* 原稿受付 平成2年7月11日。

¹ 正員、金沢大学工学部 (〒920 金沢市小立野 2-40-20)。

² 学生員、金沢大学工学部。

k_s : 比加工抵抗 GPa

$K^2 := a\omega/V_w$

l : 砥石長さ mm

L : 砥石が1回の振動の間に動く距離 mm

n : 1s間の砥石の振動数 cps

N : 1min間の砥石の振動数 cpm

P_c : 砥石臨界圧力 MPa

P_n : 砥石圧力 MPa

δR : 加工物半径減少量 μm

$d(\delta R)/d\tau$: 設定切込み深さ(定切込加工) $\mu\text{m/s}$ または、加工物半径減少速度 $\mu\text{m/s}$

T : 砥石振動の周期 s

ω : 砥石振動の角振動数(= $2\pi n$) rad/s

V_w : 工作物周速度(切削速度) m/min

2θ : 交差角 deg

Θ : 最大傾斜角 deg

τ : 加工時間

2. 超仕上理論

振動数 n , 振幅 a で振動する1本の棒状砥石(作業面積 $l \times b$)が直径 D , 幅 B の円筒状の加工物外面を切削速度 V_w で加工している状態を考える。ここで、加工物幅 B , 砥石長さ l , 振幅 a の大小関係により、次のような五つの場合に分けられる。

- (1) $l < B, a > (B-l)/2$
- (2) $l < B, a < (B-l)/2$
- (3) $l = B, (l-B)/2 = 0$
- (4) $l > B, a > (l-B)/2$
- (5) $l > B, a < (l-B)/2$

ここでは、もっとも一般的な加工条件と考えられる(1)の場合、すなわち砥石が加工物の幅より短く、かつ振動により正のオーバラン(砥石突出し量)が生じる場合を取り上げて解析することにする。なお、求めた解は他の場合にも簡単に適用することができる。

2.1 砥石平均切込み深さ 図1は砥石が切削す

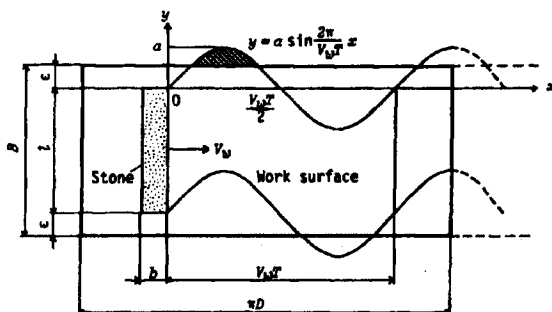


図1 加工時の加工物の展開図

る様子を加工物表面を軸方向に展開して示したものである。図に示すように x 軸, y 軸を定めると砥石の振動は、

$$y = a \sin 2\pi n \tau = a \sin \frac{2\pi n}{V_w} x \quad \dots\dots\dots (1)$$

で表される。($B-l$) / 2 = ϵ とおくと、1回の振動の間に砥石がはく加工物表面積 A は、砥石のオーバランを考慮して

$$A = \frac{V_w}{n\pi} \left\{ \pi l - 2a \cos \left(\sin^{-1} \frac{\epsilon}{a} \right) + \epsilon \left(\pi - 2 \sin^{-1} \frac{\epsilon}{a} \right) \right\} \quad \dots\dots\dots (2)$$

となる。

ところで、砥石と加工材料の接触面積は一定でなく、オーバランのところで小さくなる。そこで、解析を簡単にするため、砥石を平均切れ刃長さ(砥石長さ) $le = A/L$ を持つモデル砥石に置き換え、接触面積が常に一定であるとして扱うことにする。このとき、 L は1回の振動の間に砥石が動く距離であり、第二種円積分 $E(k)$ を用いて次のように表される。

$$L = \frac{4V_w}{\omega} (1+K^2)^{1/2} E(k) \quad \dots\dots\dots (3)$$

ただし、

$$K = \frac{a\omega}{V_w}, k^2 = \frac{K^2}{1+K^2}$$

である。

一方、加工時間 τ の間にモデル砥石がはく全加工物表面積 ΣA は、

$$\Sigma A = n\tau A \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここで、加工時間 τ の間、定常切削状態にあるとすると、砥石は一定の切込み深さ \bar{d} で加工していることになり、($\Sigma A \cdot \bar{d}$) の加工物を切削したことになるから、切削量 ΔD は、

$$\Delta D = \Sigma A \cdot \bar{d} \quad \dots\dots\dots (5)$$

となる。ところが、加工時間 τ の間の加工物半径減少量を δR とすると、この間の切削量 ΔD は、

$$\Delta D = \pi D B \delta R \quad \dots\dots\dots (6)$$

であることから、式(5)、(6)を等置して、

$$\bar{d} = \frac{\pi D B \delta R}{\Sigma A} \quad \dots\dots\dots (7)$$

が得られる。したがって、式(7)に式(4)、(2)を代入すると、

$$\bar{d} = \frac{\pi^2 D B}{V_w} \left\{ \pi l - 2a \cos \left(\sin^{-1} \frac{\epsilon}{a} \right) + \epsilon \left(\pi - 2 \sin^{-1} \frac{\epsilon}{a} \right) \right\}^{-1} \frac{\delta R}{\tau} \quad \dots\dots\dots (8)$$

となる。ここで、 $\tau \rightarrow 0$ とすると

$$\lim_{t \rightarrow 0} \frac{\delta R}{\tau} = \frac{d(\delta R)}{dt}$$

と置き直すことができる。\$d(\delta R)/dt\$ は任意の時刻における加工物の半径減少速度(定切込み加工では切込み速度に相当)であり、式(8)を書き直すと結局砥石切込み深さ \$\bar{d}\$ は

$$\bar{d} = \frac{\pi^2 DB}{V_w} \left\{ \pi l - 2a \cos\left(\sin^{-1} \frac{\epsilon}{a}\right) + \epsilon \left(\pi - 2 \sin^{-1} \frac{\epsilon}{a}\right) \right\}^{-1} \frac{d(\delta R)}{dt} \dots\dots\dots (9)$$

で与えられることになる。

\$\bar{d}\$ は砥石の平均的な切込み深さを表しており、\$d(\delta R)/dt\$ の値の取り方で評価の対象が変わる。定切込み加工の場合、\$d(\delta R)/dt\$ を設定切込み速度と考えると、\$\bar{d}\$ は設定加工条件だけで決まることになり、実験を行うことなく加工条件それぞれの過酷さへの影響を知ることができる。これに対し、\$d(\delta R)/dt\$ を加工実験で求まる加工物半径減少速度と考えると、\$\bar{d}\$ の値の大小により加工条件の過酷さ、砥石の切れ味、加工材料の被削性などを判定できる。

2.2 比加工エネルギーおよび比加工抵抗

(1) 比加工エネルギー

振動数 \$n\$ で振動する砥石は加工時間 \$t\$ の間に距離 \$(\pi r L)\$ を加工することになる。この間、砥石に作用する加工抵抗が \$F_t\$ より、砥石がなす仕事は、

$$F_t \pi r L \dots\dots\dots (10)$$

この間の切削量が \$\Delta D\$ より、単位体積の切りくずを生産するのに必要な比加工エネルギー \$k_s\$ は、

$$k_s = \frac{n F_t r L}{\Delta D} = \frac{n F_t r L}{\pi D B \delta R} \dots\dots\dots (11)$$

となる。\$t \to 0\$ とし、式(3)を代入すると

$$k_s = \frac{2 F_t V_w}{\pi^2 D B} (1 + K^2)^{1/2} E(k) \frac{1}{d(\delta R)/dt} \dots\dots\dots (12)$$

となり、切込み深さ \$\bar{d}\$ のときの比加工エネルギーが求まる。

(2) 比加工抵抗

1本の砥石を1個の工具として扱い、長さ \$l_s (= A/L)\$ の切れ刃が切込み深さ \$\bar{d}\$ で切削していると考えると、切削面積は \$(l_s \cdot \bar{d})\$ となり、このときの比加工抵抗を \$k'_s\$ とすると、切削抵抗 \$F_t\$ は

$$F_t = k'_s \cdot l_s \cdot \bar{d} \dots\dots\dots (13)$$

式(2)、(3)、(9)を代入して整理すると、

$$k'_s = \frac{2 F_t V_w}{\pi^2 D B} (1 + K^2)^{1/2} E(k) \frac{1}{\bar{d}} \dots\dots\dots (14)$$

となり、\$k'_s\$ は \$k_s\$ と同一の式で表されることがわかる。

3. 実験方法

3.1 実験装置、実験条件 実験は棒状砥石に一定の圧力を与えて円筒外面を仕上げる定圧加工法で行った。実験装置の主要部を図2に示す。切削抵抗測定用の動力計⑤に取付けた砥石③を加圧アーム⑥中のばねによって加工物①に押付け一定の圧力を与えると同時に、旋盤の往復台に取付けた振動ユニット⑦によって加振する。加工物①はホルダを介して主軸に取付け、回転運動を与える。

測定量は切削抵抗、切削量、砥石損耗量、および仕上面粗さである。切削抵抗の測定には弾性ブロックにストレングージを貼付した二分力測定用動力計⑤を用い、接線分力(主成分) \$F_t\$、および法線分力 \$F_n\$ (砥石押付け力)を測定した。なお、振動方向の分力は小さく、無視することができる。切削量は加工前後の加工物重量を天秤で測定し、その重量差より求めた。砥石損耗量は砥石作業面と基準面との差を電気マイクロメータで測定することにより求めた⁽⁴⁾。

実験条件を表1に示す。切削速度 \$V_w\$、振動数 \$N\$ を変化させているが、\$V_w = 40\$ m/min、\$N = 900\$ cpm を標準的な加工条件としている。加工時間は60sであり、加工前に所定の条件で30s前加工を施している。

3.2 実験材料 加工材料には、FC 20 (\$H_v 190\$)、S 45 C (\$H_v 168\$)、および SUJ 2 (\$H_v 770\$) を用いた。形状はいずれも外径 \$D = 45\$ mm、幅 \$B = 20\$ mm である。

使用した超砥粒砥石、および普通砥石を表2に示す。ビトリファイドをボンドとしたダイヤモンド砥石、ボラゾン砥石、メタルをボンドとしたダイヤモンド砥石、およびイオウ処理を施した WA 砥石である。粒度

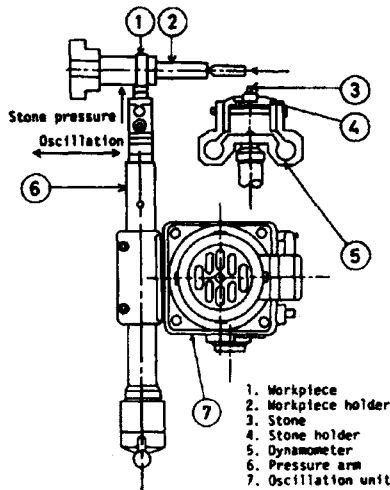


図2 実験装置の概要図

4.2 加工条件の過酷さの判定への適用

(1) 砥石圧力

定圧加工において P_n を大きくすることは定切込み加工において切込み速度 $d(\delta R)/dt$ を大きくすることに相当する。したがって、 P_n の増大は式(15)において砥石切込み深さ \bar{d} を大きくし、加工条件を過酷にすることになる。図5(a)は砥石圧力 P_n を変化させ、FC20をビトリファイドボンドダイヤモンド砥石で加工したときの結果であり、砥石損耗量 ΔS や仕上面粗さ R_a も測定している。 P_n と砥石切込み深さ \bar{d} の間には直線関係があり、砥石圧力に比例して加工状態が過酷になってゆくことがわかる。この間、 k_g はほぼ一定で、安定した切削状態が得られている。ビトリファイドボンド砥石はチップポケットとなる空孔があるため切りくずの除去がたやすいが、それでも P_n を大きくしすぎると、 \bar{d} が減少し逆に k_g が大きくなり、砥石は目つぶれ状態となってしまう。

(2) 切削速度

$d(\delta R)/dt$ を一定と扱える定切込み加工では、切削速度 V_w を大きくすると式(15)より \bar{d} が小さくなり、加工条件の過酷さを緩和させることができる。ところが、定圧加工の場合 $d(\delta R)/dt$ が V_w とともに変化するため、簡単に判定することができない。そこで、砥石圧力 P_n 一定のもとで V_w の影響を調べた結果が図5(b)である。 V_w が大きくなると \bar{d} が減少しており、加工条件の過酷さが緩和されていることがわかる。しかし、振動数を900 cpmと一定にしているため、 V_w を大きくすれば最大傾斜角 θ も変化して小さくなってしまふ。 θ の減少は切れ刃の自生作用を抑制する[図5(b)で砥石損耗量 ΔS の減少として現れている]

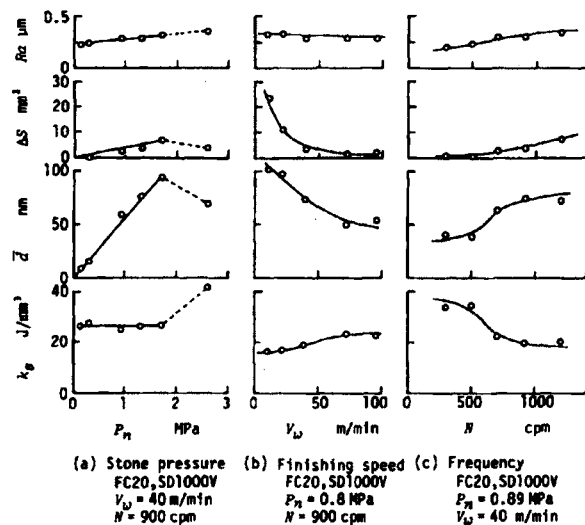


図5 加工条件の影響

ことから過酷さを緩和すると考えればよく、図5(b)の結果の中にはこの影響も含まれていることになる。

(3) 振動数

式(15)に振動数 N が含まれていないことから、 N の加工特性への影響を実験で調べてみた。その結果を図5(c)に示す。

切削速度 V_w を一定としていることから、 N が大きくなれば最大傾斜角 θ は大きくなる。 θ の増大は切れ刃の自生作用を促進する(ΔS の増加)ことから加工条件が過酷になると考えられる。図では N が大きくなれば \bar{d} が大きくなる傾向にあり、この場合も \bar{d} の値で加工状態の過酷さを判定することができる。なお、砥石の切削性の観点から図5(c)をみると、 N が大きくなるに従い、 \bar{d} が大きくなり k_g が減少することから砥石の切れ味が向上するとの見方もできる。

4.3 加工材料の被削性の比較への適用 前節では加工条件の過酷さの判定に砥石切込み深さ \bar{d} を適用してその有効性を確かめたが、ここでは加工材料の被削性の比較に k_g - \bar{d} 線図を適用してみる。図6はSUJ2, S45C, FC20をビトリファイドボンドダイヤモンド砥石で加工したときの、 k_g を \bar{d} で整理した結果である。 k_g が小さく \bar{d} が大きい材料ほど効率よく加工できると判定できることから、図において右下に位置する材料ほど被削性が良く、左上に行くほど被削

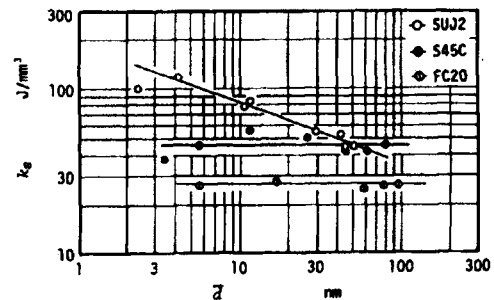


図6 加工材料の被削性の比較

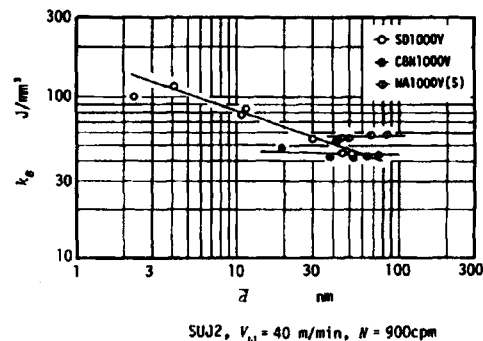


図7 砥粒の異なる砥石の切れ味の比較

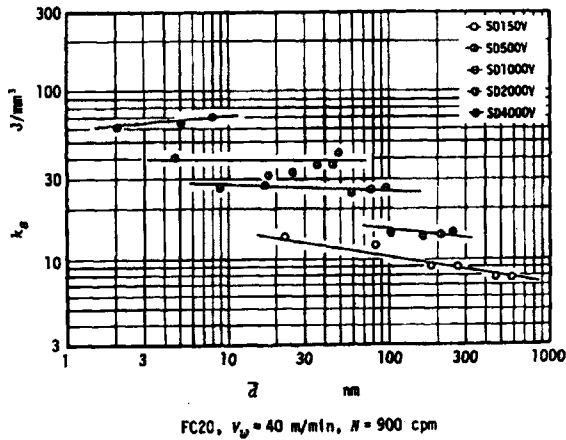


図8 砥石粒度の切れ味への影響

性が悪くなり、FC 20, S 45 C, SUJ 2 の順に被削性が悪くなると判定できる。

4.4 砥石切れ味の比較への適用 k_s - \bar{d} 線図を砥石の切れ味の判定にも適用することができる。図7は加工物 SUJ 2 をダイヤモンド砥石、ボラゾン砥石、および WA 砥石で加工したときの結果である。少ないエネルギーで多量の切りくずを生成できる砥石を切れ味が良いと判定できることから、図において右下にある砥石ほど切れ味が良く、逆に左上にある砥石ほど切れ味が悪くなる。したがって、SUJ 2 に対してはボラゾン砥石の切れ味が最もよく、ダイヤモンド砥石はこの材料の加工に適しないと判断できる。

図8は粒度の異なる砥石で FC 20 を加工した場合の k_s - \bar{d} 線図である。粒度 4000 の砥石が左上で粒度 150 の砥石が右下にきており、粗い砥石ほど切れ味がよいと判定することができる。一方、粒径の大きい粒度 150 の砥石では \bar{d} が小さくなると k_s が大きくなる、いわゆる寸法効果が現れているが、粒径が小さくなるに従い寸法効果は小さくなり、粒度 4000 の砥石では逆に \bar{d} が大きくなると k_s が増大する傾向を示している。この原因として、砥粒径が小さい砥石では切込みが大きくなると、ポンドが加工表面と接触する割合が大きくなること、チップポケットの大きさに比べ切削量が多くなり切りくずの排出の際の抵抗が増すこと、などが考えられる。

4.5 ホーニングとの比較 k_s - \bar{d} 線図を用いることにより、異なる加工法と同一基準で比較することが可能となる。図9は同一加工材料 S 45 C を、SD 1000 M 砥石で超仕上げ加工した結果と、SD 150 M 砥石 (3×3×100 mm の角柱状) 4 本で内径約 60 mm、長さ 200

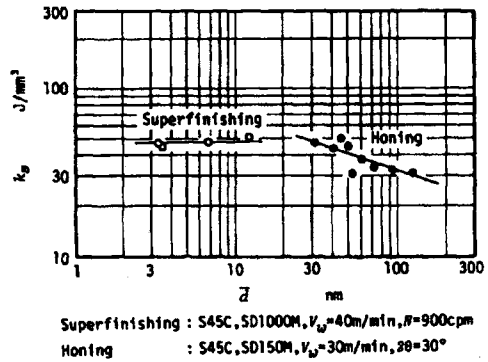


図9 超仕上げ加工とホーニング加工の比較

mm のシリンダ内面を定圧でホーニング加工した結果を比較している。図において、超仕上げのデータが左上に位置することから、この加工法が精密レベル上位の加工法であり、ホーニングは生産性で優ることになる。しかし、粒度が # 1000 と # 150 と大きく異なるにもかかわらず両者の k_s の差は小さく、超仕上げで加える振動が加工能率に大きな効果を及ぼしていることがわかる。

5. 結 言

棒状の砥石を1個の工具とみなして超仕上げの加工過程をモデル化して取扱うことにより、加工状態を把握するための新しい評価関数砥石切込み深さ \bar{d} と比加工抵抗 k_s を導出するとともに、加工実験を行い導出した評価関数の有効性についても検討した。その結果、 \bar{d} は加工条件の過酷さを判定することに適用できるだけでなく、比加工エネルギー k_s と組合せて k_s - \bar{d} 線図を作成すれば、加工材料の被削性や砥石の切れ味を比較することができた。また、精度レベルや加工能率・生産性の違いについてホーニングと同一基準で比較することもできた。

終わりに、砥石の提供を受けた瑞穂研磨砥石(株)に深謝する。

文 献

- (1) 上田・山本, 精密機械, 48-11(1982), 1514.
- (2) Ueda, T., ほか1名, Trans. ASME, J. Eng. Ind., 106-8(1984), 237.
- (3) Ueda, T., ほか1名, Trans. ASME, J. Eng. Ind., 109-8(1987), 179.
- (4) 浅枝, 日本機械学会誌, 55-405(1952), 656.
- (5) 上田・ほか3名, 精密機械, 51-6(1985), 1195.

を#150から#4000まで変化させているが、#1000の砥石を標準砥石として用いている。集中度はビトリファイドボンド砥石で150、メタルボンド砥石で100としている。曲げ強度はボンドの砥粒保持力の大小の目安となり、強度の大きいものほど保持力が大きくなる。形状はいずれの砥石も長さ $l=20$ mm、幅 $b=3$ mm、厚み 3 mm の角柱である。

加工油(40°C, 3.3 cST)には精製鉱物油をベースに硫化油脂(7%)、油脂(5%)、塩素化パラフィン(2%)を添加して用いた。

3.3 超仕上理論の実験への適用 本研究では砥石長さと加工物幅が同じであることから、式(9)に $l=B$ を代入すると、砥石切込み深さ \bar{d} は

$$\bar{d} = \frac{\pi^2 DB}{V_w(\pi l - 2a)} \frac{d(\delta R)}{dt} \dots \dots \dots (15)$$

となり、比加工エネルギー k_s は式(12)で与えられる。 \bar{d} , k_s の値を求めるためには加工実験により $d(\delta R)/dt$, および F_t を求めなければならない。

4. 実験結果及び検討

4.1 加工形態の分類 定圧加工では砥石圧力によって加工状態が大きく変化する⁽⁴⁾。図3(a)はS45Cをメタルボンドダイヤモンド砥石で加工したときの切削抵抗 F_t の時間的変化を測定した結果である。図より砥石圧力 P_n が小さいとき F_t は一定であるが、砥石圧力が大きくなると F_t が大きく渡うながら低下している。砥石保持力が大きく空孔のないメタルボンド砥石では砥石圧力を大きくし過ぎると、切削量が增大して切りくず除去が難しくなり、次第に目つぶれ状態に近づき不安定な加工状態となっていくと考えられる。

ところが、WA砥石で代表される普通砥石ではこれと異なった傾向を示す。図3(b)はSUJ2をWA砥石で加工したときの F_t の時間的変化である。砥石圧

力が小さい(砥石臨界圧力 P_c 以下)とき、加工進行とともに F_t は急速に減少しており、切れ刃の自生作用が低く、WA砥石は目つぶれ状態になって切れ味が低下している。砥石圧力が大きくなり臨界圧力を越えた圧力になると、 F_t はほぼ一定で安定した切削状態が得られている。

したがって、砥石圧力の加工形態への影響は超砥粒砥石と普通砥石で異なり、超砥粒砥石では砥石圧力を大きくした場合に不安定な加工状態を生じる恐れのあることがわかる。

図4は F_t と加工物半径減少量 δR の関係を調べた結果であり、SUJ2をボラゾン砥石で加工している。 F_t はゆっくりと減少する傾向を示しているもののほぼ一定とみなすことができ、その間 δR は単調に増加している。すなわち、切削抵抗 F_t を監視していれば砥石の加工状態を把握することができ、 F_t が一定であれば加工物半径減少速度 $d(\delta R)/dt$ が一定となる加工状態にあるとみなしてよいことがわかる。

したがって以後の実験では、生産能率の向上、形状精度の改善、加工変質層の除去、加工の自動化などの観点から、安定した切削が行われている状態を基本的な超仕上の加工状態と考え、 F_t が一定となる状態を扱うことにする。

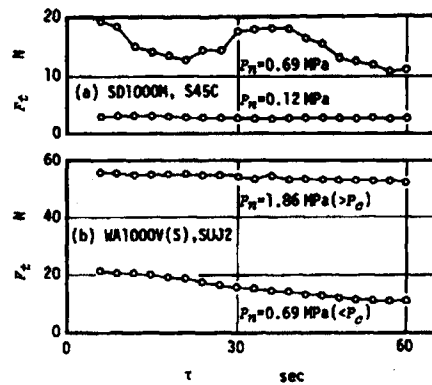
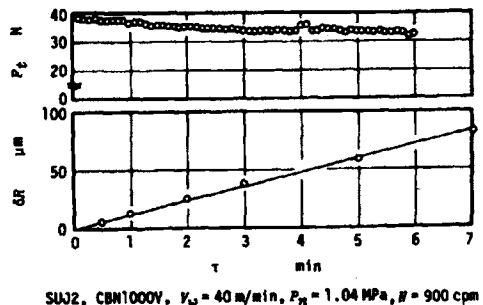


図3 加工抵抗による加工形態の分類



SUJ2, CBN1000V, $V_w = 40$ m/min, $P_n = 1.04$ MPa, $\nu = 900$ cpm

図4 加工抵抗による切削状態の把握

表1 加工条件

Finishing speed	V_w	m/min	10~100
Frequency	ν	cpm	300~1200
Amplitude	a	mm	1.6

表2 使用砥石

Stick	Grain	Bond	Grain size	Concentration	Bending strength MPa
SD1000M	SD	Metal	#1000	100	92
SD150V ~ SD4000V	SD	Vitrified	#500~#4000	150	50~70
CBN1000V	CBN	Vitrified	#1000	150	51
WA1000V(S)	WA	Vitrified	#1000	$V_c=38\%$	---