超仕上性能の特性値としての臨界圧力とこの圧力における仕上性能に及ぼす砥石仕様の影響*

——超仕上砥石の仕上性能向上に関する研究(第2報)——

松 森 昇** 山 本 明***

Influence of Superfinishing Stone Specification on Critical Stone Pressure and Finishing Characteristics at the Pressure

——Study on the Elevation of Finishing Ability of Superfinishing Stone (2nd Report)——

Noboru MATSUMORI, Akira YAMAMOTO

On the superfinishing stone of fine grain, soft grade and sulphur treated, which have been recently employed to comply with the request for high stock removal together with lowest cost and high quality surface, an efficient utilization of the critical stone pressure P_c is emphasized again in this paper as an important characteristic concerned with actual performance for an advanced selection and manufacture of the well-fitted stone for the object. Chiefly from the finishing data of the bearing steel with stones of WA 3000 V (S) having various structure and hardness, the relations are discussed between stone specification and P_c , stone wear rate W_c/P_c , stock removal T_c or economic ratio T_c/W_c at the pressure of P_c . Consequently, it is proved that the user can almost appoint the right stone which holds excellent performances coincidently in T_c and T_c/W_c by P_c and the Rockwell hardness RH of the stone. In practice, this stone is desirable to be applied at the pressure of (0.8–0.9) P_c , for example, to secure a mirror finished surface of high quality and a stable stock removal. Furthermore, the universality of relationships between stone specification and the above characteristics and the possibility of selecting a fitted stone by the above procedure are checked up with three different examples in grain size, working material or conditions.

1. ま え が き

超仕上加工に対して、特に量産加工では、短時間で鏡面仕上(R_{max} で $0.2\mu m$ 以下)と高精度および高切削量を求めることが要求される。これに沿うものとして、#3000を中心とした微粒で軟結合度の砥石をイオウなどで気孔を充てんした処理砥石が採用されるようになった。

第1報¹⁾では、イオウ処理によって砥石損耗量 W 、切削量 T 、研削比に相当する仕上比 T/W 、臨界圧力 P_c などの仕上性能が大いに向上することを示し、また砥石の品質管理と仕上性能確保のために、管理量として従来の表示値のほかに P_c をつけ加えることが望ましいことを主張した。

P_c は鏡面加工域と切削加工域との転移点に相当する砥石圧力であり、砥石圧力 P_n を増加していくとき P_n - W 曲線の変曲点として見いだされる。 P_c 付近で切削量

T も急増状態に移り、また一般に[†]ここで仕上比はほぼ最大となる¹⁾。そこで、 P_c における諸量に添字 c をつけて表すことにすると、 P_c 、 T_c/W_c および W_c/P_c を鏡面加工における仕上性能を表す特性値として用いることができる。したがって経済的、能率的に加工するには、

- (1) T_c を大きくするために P_c が大きいこと
- (2) W_c/P_c が小さく、 T_c/W_c が大きいこと
- (3) 要求する仕上面性状が得られること

の三つが適当な砥石を選択するための要件となる。ここでは(3)は微粒処理砥石で満足されるものとし、(1)と(2)について考える。

実際では、鏡面を確実に得ることと仕上がり寸法のばらつきを避けるために P_n を P_c より小さく定めるが、量産機で P_n 、最大傾斜角 θ などがセットされている場合、つねに安定した仕上がり状態を確保するためには P_c などの仕上性能が管理された砥石を入手することが必要なことはいうまでもない。また入手した砥石の P_c

* 原稿受付 昭和49年6月3日。昭和49年度精機学会春季大会学術講演会(昭和49年4月7日)にて発表。

** 正 会 員 瑞穂研磨砥石(株)(城陽市寺田)

*** 正 会 員 大阪大学基礎工学部(豊中市待兼山町1)

[†] P_c 以上の砥石圧力において目こぼれ形となるときは仕上比がピークを示す P_n は P_c よりやや低圧側に、目つぶれ形となるときは反対にやや高圧側にある²⁾。

表1 加工条件

加工物・材料	SUJ 2	S 55 C
加工物 寸法 (mm)	外径 45, 内径 22	外径 62, 内径 38
かたさ ($H_R C$)	60	60
砥石振動数 (cpm)	1 140	1 620
振 幅 (mm)	2.1	2.1
平均切削速度 $\bar{v}$ (m/min)	42.8	17.6
最大傾斜角 θ (deg)	10°	33°45'
加工油	硫化脂肪油 5% 添加, 9cSt (30°C)	白灯油 80% 120 マシン油 20%

に対して, いちいち P_n とか θ を変更することのわずらわしさを避けるべきである。砥石メーカとしてもこの要望にこたえようよう努力すべきであろう。

本報では, このような砥石の選択と製造に関する手がかりをうるために, 現在経験的によい性能をもつと考えてよい二, 三の砥石を例にとって P_n , W_c/P_c および T_c/W_c が砥石構造とどんなにかかわりあいをもつかを調べた結果について報告する。

P_c は加工材料, 加工方式および θ などの加工条件によって変化するから, 広範な条件の組合せに対処できるようにある標準条件下での値として規定することが望ましい。これには P_c と関係因子との関係が明らかであることが前提となるが, 最も簡単には, ユーザから望ましい砥石が提供されると標準条件で試験できるのでこの前提を回避できる。

2. 研究の方法

供試砥石としては高精度・高切削量の要求に沿って微粒イオウ処理砥石を対象にすることにした。

実験例は, 超仕上が最も多く応用される二つの場合, すなわちころがり軸受の軌道面仕上とジャーナルの仕上に注目して, 表1に示す二つの条件を選んだ。後者では, 比較のため無処理砥石での実験結果も加える。これらの実験条件で特に異なるのは θ と $\bar{v}$ である。SUJ2の実際における加工条件はこの例よりもさらに極端で, 第1報表1に掲げたように $\theta < 1^\circ$, $\bar{v} \approx 300$ m/min 程度が用いられる。

加工方式はいずれもパイプ状加工物端面の平面プランジカット加工を採用した。砥石は直径 11.2 mm および 10 mm の丸棒である。加工時間は 3 min であるが, この間の切削距離は初期摩耗から定常摩耗に移行したのちの部分にあたる。実験後の反省として, $\bar{v}$ に応じて全切削距離が一定となるように加工時間を定めたほうが適当であったと思われる。 W は損耗厚さ, T は切削厚さをそれぞれ基準面を参考面として測定し, これに作用面積を

乗じて体積で扱う。加工ははじめの前加工状態を一定とするため, WA 320 RH 60 V の砥石を用い $P_n = 8 \text{ kg/cm}^2$ (P_c より大きい) とし切削状態で超仕上した。また, 砥石と加工物の接触状態を一定とするため, 加工前に加工物との間に #120 の研摩布をはさんで運動させドレッシングを行った。

臨界圧力 P_c は P_n - W 曲線を折れた二直線に近似したときの折点として定める。 W と T の測定値はばらつきやすいので, 場合によっては繰返し

実験によって精度を高めた。

3. 砥石仕様の T_c および T_c/W_c への影響 (WA 3000 V(S) による SUJ 2 の加工を例として)

実際の加工において, かなりよい成績を上げているある材種の WA 3000 V(S) 砥石を検討の一例として取り上げ, その構造要素を変化して P_c , W_c/P_c , T_c/W_c との関係調べることにした。イオウ処理によってどのように性能が向上するかは第1報 (特に図6) で述べたので省略する。

砥石仕様は次の二つのシリーズに分かれる。

- (A) かたさを RH 20 に一定し, 結合剤の砥粒に対する重量率 B を 8~18% の 6 段階に変化する。
- (B) B を 8~20% の 4 段階に変化し, それぞれの B % において RH -40, -20, 0, 60 とする。

これらは湿式成形品で, それぞれ目的とする RH 硬度は経験と試行に基づいて気孔剤を適当量混合し, 焼成時にこれを燃焼させて気孔率を変化させることによって得た。表示の RH 硬度はイオウ処理前の測定値で, ± 3 程度で 5 単位の値に丸めたとときの値である。(S) で記号する処理砥石はこれに十分にイオウを含浸させたもので, みかけの気孔率は数 % 程度にまで減少する。この処理後のかたさを RH_s で記号する。表2は実験に用いた(B)シリーズの砥石の処理前の組織である。

$B 20\%$ のものは, いわゆる結合度が高く切削性能がすぐれず, P_c 以上で目つぶれないしは目づまり状態となったので実験結果から除外した。空気中と水中の重量を測定して V_P , V_G を求め, これらを 100% より減じて V_B が求まるが, V_B は 10% 程度の値であって, この測定手続きでは測定精度が落ちる上, そのわずかな変化がかたさと仕上性能の大きな変化に対応するので, 砥石構造要素と仕上性能の関係を調べるときの変数としては精度上ふさわしくない。

まず, 砥石設計値と組織およびかたさの関係を調べて, 実験データの範囲内でほぼ次のような関係にあるこ

表2 WA 3000 V (S) の組織

B (%)	表示 (RH)	RH _s	組織 (%)		
			V _P	V _G	V _B
8	-40	91	55.1	37.0	7.9
	-20	95	54.4	37.6	8.0
	0	97	52.6	39.0	8.4
	60	104	49.4	40.8	9.8
12	-40	93.5	53.2	37.0	9.8
	-20	96	53.0	37.1	9.9
	0	98.5	51.9	37.8	10.3
	60	105.5	48.5	40.2	11.3
16	-40	95.5	52.8	36.0	11.2
	-20	97.5	51.6	36.5	11.9
	0	100.5	50.3	37.7	12.0
	60	107.5	48.2	39.1	12.7

図1 P_c と RH, RH_s および B との関係

とがわかった。ここで、B と V_B は % で与える。

$$V_B = 4.8 + 0.44 B + 0.22 RH/B \quad (1)$$

$$V_B/V_G = 11 + 1.3 B \quad (2)$$

$$RH_s = 93 + 0.5 B + 0.12 RH \quad (3)$$

かたさは気孔率 V_P を変化させて得ているので、V_B/V_G は式 (2) のように少しずれてほぼ B に比例する。また、表にみるように V_P の減少に伴い RH が大きくなるが、同時にイオウ処理に伴う硬度増も減少する。式 (3) は RH_s と RH の関係を与えており、B も関係する。

次に、加工実験の結果から P_c と砥石構造要素との関係を求めてみる。対象とした変数は設計値 B%, かたさ表示値 RH および RH_s である。この結果は図 1 のようになるが、RH と RH_s は丸められた値であるので、これに注目するとばらつきが多い。これから、 P_c と RH_s が指定された場合、設計値としての B および RH を案内として気孔量を定めうる。

図の関係を整理してみると、近似的に次のような実験式が作れる。

図2 W_c と P_c および B, RH との関係

$$P_c = (6 + 0.2 B) (RH + 130)^{0.28} - 25 \quad (4)$$

RH の代わりに RH_s に注目すると

$$P_c = 2.5 + 0.5 B + 0.61 (RH_s - 100) \quad (5)$$

砥石製品については B は不明であるから、式 (3) と (5) から B を消去して

$$P_c = 1.61 RH_s - 0.12 RH - 151 \quad (6)$$

さて、 P_c における砥石損耗量 W_c の変化を P_c に対して整理してみると図 2 のような関係が得られる。B に注目しても、RH に注目しても砥石構造がある P_c をもつとき W_c は最大になる。ピーク値の左側では P_c が小さいために、右側では砥石が硬く働く (V_P 小, V_B 大, 表 2 参照) ために W_c が減少するのである。B に注目した左図では B が小さいほど、右図でも RH が小さいほどピークを示す P_c は低下する。

$P_n < P_c$ では W はほぼ P_n に比例すると近似できるから、 W_c を砥石の損耗程度を表す特性値として扱えるが、この値は例えば損耗の激しい砥石でも P_c が低ければ小さくなるので、損耗程度を W_c の勾配すなわち損耗率 W_c/P_c (mm³cm²/kg) で表現することにした。この損耗特性値は図 3 のように変化する。この処理によって、前図で極大値をもった曲線群は右下がりの曲線群となり、 P_c および RH が大きいほど損耗率が小さくなることがわかる。これらの曲線群を一つの曲線に収束させることを工夫して、次の実験式が得られた。

$$\frac{W_c}{P_c} = 1.50 - 0.3 \frac{P_c}{(RH + 50)^{0.24}}$$

あるいは

$$W_c = P_c \{1.50 - 0.3 P_c (RH + 50)^{-0.24}\} \quad (7)$$

ただし、上式の成立範囲は $60 \geq RH \geq -40$, $8\% \leq B \leq 20\%$ である。式 (7) は図 3 右図に示す直線である。

また、この式は前図で曲線で示したような変化をする。それぞれの RH 曲線のピーク位置は上式から

$$(P_c)_{wm} = 2.5 (RH + 50)^{0.24}$$

にあることも導ける。

次に、目的とする高切削量に関して T_c の変化をみてみよう。表 2 の砥石群では図 4 のような結果が得られ

図3 W_c の P_c と RH による表現 図4 切削量 T_c と仕上比 T_c/W_c の変化

た。B を一定とした場合、それぞれ砥石構造がある P_c と RH をもつとき T_c が最大となる。上と中の図から、この砥石シリーズでは、 $B=12\%$ 、 $RH \approx -10$ 、 $P_c \approx 7 \text{ kg/cm}^2$ の砥石が最も高切削量を与えることがわかる。

経済性も重要であるから、仕上比 T_c/W_c を扱った下図を検討してみると、やはり同じく $B=12\%$ 、 $RH \approx -10$ の砥石が最もすぐれることがわかる。これから、高切削

量で最も経済的な砥石構造はほぼ一致することができる。この砥石は図2を見て、 W_c もかなり高く、B 12% シリーズでは最大に近い。 T_c の増大は W_c の増大によって得られるともいえよう。しかし、図3左図にみるように損耗率 W_c/P_c は最大ではない。

実際では、まえがきで述べたように、上述のように T_c と T_c/W_c で判断できる高切削量と経済性のほかに、品質のよい鏡面仕上と特にサイクルタイムを定めて加工するときの取りしろの安定さを要求する。この

ために、 P_c より小さい砥石圧力で使用するのが一般であるが、例えば $(0.8 \sim 0.9) P_c$ によるのもよからう。このとき T の T_c からの低下割合は W のそれよりもやや大きいので、 T/W は T_c/W_c よりやや減少する (1 節の下注の現象に注意)。

実験した砥石シリーズはここで用いた加工条件の下では上述のように RH -10、 $P_c 7 \text{ kg/cm}^2$ の砥石が最適であったが、実際の軸受製造に用いられているような θ が非常に小さい加工条件 (2 節参照) の下では RH -20 ~ -30 のようなもう少し軟らかいものが最適になる。このように加工条件で最適な砥石の仕様は変化するから、まえがきで述べたように、実機で最適な砥石を見つけたのち、その砥石を用いなるべく実際に近い標準条件でその品物を加工して P_c を求め、これを指定および製造上の指標とするのが、最も簡単な管理法であろう。その際、ここで行ったような解析手段がさらによい性能をもつ砥石の発見に役立つと考える。

4. 上で得られた砥石仕様と仕上性能特性値との関係の普遍性の検討

前節で、ある砥石シリーズで SUJ2 を加工する場合を例にとって、砥石仕様を変化してそれと仕上性能特性値 P_c 、 T_c 、 T_c/W_c との関係調べ、これから最適な砥石を発見できることを述べたが、ここで得た関係と砥石選択手段の普遍性を二、三の例について検討してみる。

4.1 粒度を変化した場合

上で用いた RH 20 一定で B を変化した WA 3000 V(S) (A) シリーズに相当する WA 2000 V(S) シリーズの砥石を作り、同条件で SUJ2 を加工し、類似の関係が得られるかどうかを考察した。結合剤材料は (A) シリーズとやや異なり、例えば熱膨張係数はわずかに大きい。この

図5 WA 3000 V(S)とWA 2000 V(S)の仕上性能の比較

- (1) S 55 C-WA 3000 V(S): $B=14\%$, $\theta=33^\circ 45'$, $\bar{v}=17.6$ m/min
- (2) S 55 C-WA 3000 V: $B=14\%$, $\theta=60^\circ 15'$, $\bar{v}=13.1$ m/min
- (3) SUJ 2-WA 3000 V(S): $B=16\%$, $\theta=10^\circ$, $\bar{v}=42.8$ m/min
- (4) SUJ 2-WA 3000 V(S): $B=12\%$, $\theta=10^\circ$, $\bar{v}=42.8$ m/min

図6 仕上特性-砥石仕様曲線の類似性

仕上性能の比較が図5である。どの特性値も似た変化をしている。このRH 20では $B 16\%$ 付近で T_c も T_c/W_c も最大となり、 $P_c=6 \text{ kg/cm}^2$ 程度であることがわかる。二つのシリーズを比較すると、WA 2000のほうが T_c のピーク値は20%ほど大きい、損耗量も大きく、 T_c/W_c はピーク値で30%程度減少する。最適砥石の P_c も20%ほど小さい。最適砥石が B の大きいほうに移り、 W_c も増加するのは主として粒度の影響とみることができよう。

4.2 S 55 C の場合

ジャーナルの加工を例にとる。一般に $\theta=30^\circ \sim 60^\circ$ 程度が実用されているが、高精度加工を目的として、一例をWA 3000 V(S)を使用して表1に示す加工条件($\theta \approx 34^\circ$)で加工する場合にとり、これを無処理砥石の場合とも比較した。ただし後者は外径52.8 mm、内径37.1

mmの加工物を $\theta=60^\circ 15'$, $\bar{v}=13.1$ m/minで加工している。

この結果および前節のSUJ 2の場合との比較は図6のようである。四つの加工例の比較に当たって注意すべき砥石の特徴と加工条件は図に付記してある。 θ と $\bar{v}$ が異なっているが、一般に θ が大きくなるに伴い、 W_c と T_c が増加し、 P_c が減少することを考慮すべきである。また、加工時間はいずれも3 minであるが、 $\bar{v}$ が異なるので切削長さが異なり、 W_c と T_c を直接比較できないことにも注意がいる。したがって、ここで注目するのは関係曲線の類似性である。

図において、同様のイオウ処理砥石を用い、加工材料と加工条件が異なる(1)と(3)の場合を比較して、 P_c , W_c/P_c および T_c/W_c の関係曲線はいずれも類似の変化をしていることが認められる。 θ と $\bar{v}$ の違いを考慮する

と、材料の加工性については、SUJ 2 (記号 (3)) よりも S55 C (記号 (1)) のほうが全体的に P_c がやや大きく、また W_c/P_c に差がないのに仕上比 T_c/W_c が大きくて、はるかに加工性がまさるのが目立つ。

S55 C の場合、ここで用いた B 15% 砥石シリーズではこの加工条件の下で、RH 20, $P_c=11.5 \text{ kg/cm}^2$ 程度の仕様が高切削量・経済性の立場から最適であることがわかる。もし、SUJ 2 と同じ加工条件をとるときはかたさはもう少し軟らかいのがよからう。

S55 C の無処理砥石による加工 (記号 (2)) の例では、RH > 60 の場合の実験がないのが残念であるが、この場合も類似の関係曲線をもつと考えてよからう。この砥石シリーズの最適仕様は RH 60 付近にある。しかし、処理砥石 (1) に比べて、仕上比は約 1/3 に近く、損耗率も大きく、加工能率と経済性がかなり落ちる。

S55 C の加工に用いた処理砥石の RH_s は 87 から 105 まで変化しているが、参考として RH_s に対して P_c および W_c/P_c をプロットしてみると、図に記号 (1)* で示したような変化をする。このかたさの増加はイオウ充てんによるものであるから、無処理で同数のかたさをもつ場合よりも当然 P_c は小さく、損耗率は大きい。

上で、(1) の場合には RH 20, (2) の場合には RH 60 が最適砥石と判断されたが、これらのかたさは現場で経験的に最適砥石として推奨されるかたさとほぼ一致する。

5. 結 論

得られた主な結果をまとめると次のようである。】

- (1) 砥石圧力 P_n に対する 損耗量 W , 切削量 T の変化と、臨界圧力 P_c 付近で仕上比 T/W がほぼ最大になることを考えて、 P_c における損耗率 W_c/P_c と

仕上比 T_c/W_c を仕上性能特性値として採用できる。高切削量で経済的な砥石は P_c と T_c/W_c が大きく W_c/P_c が小さい、したがって T_c と T_c/W_c が最大であることを目安として適当仕様のものを探せばよい。

- (2) 例えば 結合剤量 B と 気孔剤量 を変化させた WA 3000 V(S) 砥石シリーズで SUJ 2 を加工する場合、RH 硬度と P_c が変化するが、 T_c と T_c/W_c をそれぞれ最大にする砥石仕様はほぼ一致する。 T_c したがって能率の増大は W_c の増大を伴うが、損耗量 W_c/P_c はそれほど大きくない。
- (3) 上で得られた仕上性能特性値と砥石仕様との関係の類似性、最適砥石選択手段の妥当性を、さらに砥石・加工材料・加工条件を変化した 3 例について検討を行って確認した。
- (4) SUJ 2 の加工例において、粒度を #3000 から #2000 に変えると、 T_c は大きくなるが W_c も増大して仕上比は低下する。 P_c は低くなり、最適仕様の砥石の B はやや大きいほうに移る。
- (5) S55 C は SUJ 2 よりもはるかに加工性がよく、ここで扱った砥石シリーズでは最適仕様のものは仕上比が 15 に達する。これは SUJ 2 の場合の約 2 倍である。S55 C の加工において、無処理砥石は処理砥石に比べ仕上性能は大きく劣り、仕上比は 1/2 以下である。

文 献

- 1) 松森 昇, 山本 明: 超仕上性能の特性値としての臨界圧力について, 精密機械, 40, 10 (1974) 852.
- 2) 松森 昇, 山本 明: マルテンサイト系ステンレス鋼の超仕上加工, 精密機械, 40, 7 (1974) 598.