研削砥石の目立て間寿命判定基準

吉 川 弘 之*

Criterion of Between-Dressing Tool Life of Grinding Wheel

Hiroyuki YOSHIKAWA

Sharp edges of abrasive grains on a grinding wheel produced by dressing action go bad quickly or slowly during grinding, following the nature of wear of the wheel. One must then, dress the wheel surface again to continue the right operation. The interval between two dressings is called the between-dressing tool life of a grinding wheel. In this paper, a criterion of the life is proposed. It was experimentally revealed that the performance of a grinding wheel is mainly dependent on the fractional area of flank wear of abrasive grains to the area of wheel surface. The increase of the area of flank wear produces many ineffective grains which bring about the sudden increase of grinding force, the deterioration of finish and the burning of work surfaces. This fact suggests that the fractional area of the flank wear of abrasive grains can be used for the criterion of the between-dressing life of a grinding wheel.

1. ま え が き

研削砥石を目立てしてから研削作業を続けると、砥石の研削能力はしだいに低下し、再目立てが必要となる。目立てからつぎの目立てまでを研削砥石の目立て間寿命と呼ぶが、その寿命に関する知識を得ることは実際作業にとって重要である。またこの問題は研削中の砥石切れ刃の変化と砥石の研削性能との関係を究明することによって明らかになることであるが、それは従来の理想的切れ刃を仮定した幾何学的研削理論を、現実的な砥粒にもとづいた研削理論へと改修することに寄与すると考えられる。

研削作用の巨視量をとらえた現象論的な研究は、渡辺¹⁾によつてくわしく行なわれた。すなわち研削の形式には正常研削、目つぶれ研削、目こぼれ研削、目つまり研削の四種があり、それは砥石、被削材、研削条件などによつて決定されることを明らかにした。これらの研削の形態は、砥石切れ刃の状態によつてきめられる。たとえば正常研削とは適当に切れ刃が破壊して、常に鋭い切れ刃を保つことにより、砥石が劣化しないような状態と定義される。ところで目つぶれ研削といつても、一般に目立て後しばらくは良好な状態で作業が行なえるものであり、正常研削と言つても永久に目立ての必要がないとは言ひ難い。その意味では、目つぶれ研削、正常研削と言つても厳密な区別はできないとも考えられ、むしろ目立て後どれだけの期間良好な状態で作業が行なえるかと

いう問題の方が实际的である。

定性的に目つぶれ状態と言われる研削状態において、切れ刃の状態がどのように変化して行くかという問題は Peklenik²⁾、津和³⁾、Schwarz⁴⁾が直接観察によつてくわしく研究し、著者⁵⁾は砥石の摩耗特性から解析的に論じた。それらによると目つぶれ状態とは砥石面の砥粒切れ刃の逃げ面摩耗が増大した状態である。切削工具における逃げ面摩耗の増大が切削性能の劣化をもたらすように、砥石においても砥粒の逃げ面摩耗の増大が実用的な使用限界を与えることを Peklenik²⁾は示した。一方牧野⁶⁾は目立て後研削を続けたときの研削状態を、研削抵抗、研削音、仕上げ面あらさなどを追究して検討している。しかしながら砥粒切れ刃の逃げ面が摩耗した状態での研削作用についてはほとんど明らかにされておらずそのため研削を続けたときの諸量の変化を説明することができない。

そこで本報では、仕上げ面の悪化やびびり、焼けなどが主として研削抵抗に支配されることから、砥石の研削作用を研削抵抗で表わすこととし、研削を続けたときの研削抵抗を測定し、その結果と砥石状態との関連を論じる。また、砥石面の状態によつて砥石の研削能力がきめられるという事実にもとづいて、研削砥石の目立て間寿命の判定法を提案する。

2. 実 験

2.1. 実験方法

使用機械は JUNG 平面研削盤、被削材料はクロムモ

* 理化学研究所 正会員

リブデン鋼 (SCM 4) を用いた。砥石は粒度46番, 砥粒率48%のもので砥粒は A (2 A) および WA (4 A), ボンド率を変えることによって結合度を変えた。研削条件はとくにことわらない限り, 砥石周速 2100 m/min, テーブル速度 10 m/min, ストローク当たりの切込み 0.01 mm, 横送りなしの切込み研削である。砥石直径は 225 mm, 研削幅 5 mm, 乾研削によつて実験を行なつた。目立ては先端の鋭いダイヤモンドドレッサで, 切込み 0.02, 0.01, 0.005 mm の順に, 送り 1 mm/sec で行なつた。目立て後一定回数研削を行ない, そのときの研削抵抗および逃げ面摩耗面積を測定した。

研削抵抗は4リング型の抵抗線ひずみ計式動力計により, 水平 (接線), 垂直 (法線) 両分力を測定する。抵抗測定を行なわないばあいの研削は, 電磁チャックに直接取りつけた被削材を研削して動力計の弾性の影響を防止する。

逃げ面摩耗面積の測定は, Peklenik—津和の方法, すなわち光学的な正反射法によつて写真を取り, 印画紙上の逃げ面摩耗部分を切り抜いて重量測定を行なつた。写真の一例を図1に示す。なお砥石周上4カ所を測定して平均した。

図1 正反射法による砥粒逃げ面の記録
砥石 A46N8V, 被削材 SCM 4 (HRC 40)
研削条件 $V=2,100$ m/min, $v=10$ m/min
 $d=0.01$ mm, 研削回数 600 回。

2.2. 研削抵抗

目立て後研削を続けながら, ある回数ごとに研削抵抗を測定すると, 図2, 図3のような結果が得られる。図2は同一の研削条件, 被削材で砥石の結合度を変化させたときの研削抵抗の変化を示し, 図3は同一の砥石で研削条件を変化させたときの結果を示す。図2および図3から一般的に言えることは,

- i) 目立て直後はやや高い研削抵抗を示すがすぐ低下

図2(a) 目立て後研削を続けたときの研削抵抗
垂直分力の変化(結合度によるちがい)
被削材材料 SCM 4 (HRC 30), 研削条件 $V=$
2100m/min, $v=10$ m/min, $d=0.01$ mm,
研削幅 5 mm。

図2(b) 目立て後研削を続けたときの
研削抵抗水平分力の変化(結合度による
ちがい) 条件は図2(a)と同じ。

する。

- ii) その後しばらくは一定値を保つ。

- iii) 結合度がある値より低い, 研削条件がある値よりきびしいばあいを除いて, ある研削回数後に研削抵抗は急増, 水平成分は2~3倍, 垂直成分は7~8倍に増大する。

- iv) 増大後は安定し, その後は変化しない。

- v) 急増する点と仕上げ面の焼けの発生とは一致する。

また結合度の高い方では急増点は早く現われ, 研削条件は軽い方が急増点が早く現われることなどが明らかになったが, それは砥石の摩耗特性と関連した問題としてすでに述べた⁵⁾。

2.3. 逃げ面摩耗面積

前述の方法によつて摩耗面積を研削抵抗と同時に測定すると, 図2に対応するものとして図4が得られる。目

図3 目立て後研削を続けたときの研削抵抗の変化 (研削条件によるちがい)
被削材 SCM 4 (HRC 30), 砥石 A 46 N 8 V,
研削条件 $V=2100$ m/min, v : 変化, $d=0.01$ mm, 研削幅 5 mm. 実線は F_N , 点線は F_T .

図4 目立て研削を続けたときの逃げ面
摩耗面積率の変化. 被削材 SCM 4 (HRC
30), 研削条件図2(a)と同じ。

立て直後の摩耗面積は、本方法によつて測定すると非常に小さい値が得られるのであるが、それは研削中の測定結果とやや異なつた内容を持つていてと考えられる。研削中の摩耗面積は、被削材である金属によつて摩擦を受け、光線をよく反射する。しかし目立て後はダイヤモンドによつて破壊された面であるから摩耗面と異なり、あまり平坦でないと考えられる。その結果、巨視的には平面でも光線を乱反射し、正反射を用いている本測定方法では巨視的な意味での摩耗面より小さい値を与えるであらう。そしてわずかの研削回数で、破壊によつて作られた逃げ面は摩耗をして平滑な面となり光線をよく反射す

るようになる。その結果、逃げ面摩耗面積は初期に急増する様子を示すがその物理的内容は明らかでない。

図4では逃げ面摩耗面積を砥石面にたいする百分率 a で表わしているが、その値は目立て直後を除きはじめゆるやかに増大してある点で急増する。その点は研削抵抗の急増点に対応しているが、急増の程度は研削抵抗よりゆるやかである。

3. 検 討

3.1. 逃げ面摩耗面積率と研削抵抗との関係

研削抵抗と逃げ面摩耗面積率との関係を見るために図2および図4の結果から対応する点を図示すると、図5および図6が得られる。図5は逃げ面摩耗面積率 a と研削抵抗垂直分力 F_N との関係、図6は水平分力 F_T との関係である。図5、6によると研削抵抗は逃げ面摩耗

図5 a - F 曲線 (垂直成分), 逃げ面摩耗面積率 a と研削抵抗垂直分力 F_N との関係を図2(a)と図4から求めたもの。

図6 a - F 曲線 (水平成分), 逃げ面摩耗面積 a と研削抵抗水平分力 F_T との関係を図2(b)と図4から求めたもの。

面積率 a がある値に達するまではほぼ変化しないことが認められる。そしてある値、このばあいには約 8% になると研削抵抗垂直分力 F_N は面積率 a の増加にたいしてきわめて鋭敏に変化する。一方水平分力 F_T も増加するが、それは a とほぼ比例関係にあつて F_N よりもずつとゆるやかである。両図には 4 種の砥石、すなわち A46I, K, N8V および WA46K8V の砥石の例が示してあるが、ほとんど同一の曲線上にある。この事実は、砥石の結合度による研削特性の差は、砥石面の状態、それも主として砥粒切れ刃の逃げ面摩耗面積によつて決定されるのであつて、逃げ面摩耗の状態さえ等しければ、第一近似としては砥石の結合度によらず研削抵抗などは等しくなることを示しているものと考えられる。

この逃げ面摩耗面積率 a と、研削抵抗垂直分力 F_N との関係を表わす曲線（以下 a - F 曲線と呼ぶ）は、前述したような研削砥石の目立て間寿命や被研削性を定める目的などのために重要である。たとえば仕上げ面にびりりの発生することが許されない作業であれば、この a - F 曲線の急増する点を限界とすればよいから、 a が 8% 以下のところに基準をおいて寿命判定を行なえばよい。

a - F 曲線は、被削材の種類およびその熱処理条件、研削条件などによつて変化すると考えられ、なお厳密には砥粒の種類や切れ刃密度などによつて若干は変化すると考えられる。一例として被削材を熱処理によつて硬度を変えたばあいの例を図 7 に示したが、 a - F 曲線はかなり異なるものが得られる。これらの条件による a - F 曲線の差についての詳細な検討は後報にゆずるが、 a - F 曲

図 7 a - F 曲線の被削材によるちがひ硬度変化の例。被削材 SCM 4, 熱処理によつて硬度を変化。砥石 A46N8V 研削条件 $V=2,100$ m/min, $v=10$ m/min, $d=0.01$ mm, 研削幅 5 mm。

線の定性的な特性を以下に検討する。

3.2. a - F 曲線の検討

図 5 に示した a - F 曲線において、 $a \approx 8\%$ で研削抵抗 F_N が急増することは従来の常識では説明できない。すなわちはじめ鋭い切れ刃だったものが、先端が摩耗して逃げ面摩耗を生じた切れ刃になつたときにも砥石の切れ刃密度が変化しなければ、砥粒 1 個あたりの切削量、いかえれば切削面積は平均的に一定である。ここでたとえば小林と塚田⁷⁾ が詳細に論じたように、砥粒にかかる研削抵抗の垂直分力は、砥粒と金属とが接触している部分の垂直投影面積に比例すると考えると、それは逃げ面摩耗面積にたいしてほとんど直線的に増大するのみで急増点の存在は説明できない。

ところで上述の考え方にはすべての砥粒切れ刃が有効に作用しているという仮定を含んでいる。この仮定には問題がある。すなわち先端が平坦化した砥粒が切削を行なうためにはある垂直荷重が必要であり、それ以下では砥粒下の金属は弾性的な変形を受けるに過ぎず、通常のすべり摩擦現象となることが想像される。

このことを確認するためにつぎのような実験を行なつた。図 8 に示すような力の測定装置を用い、工具として先端を平坦にしたダイヤモンド円錐台を使用して引かき

図 8 引かき実験装置。ダイヤモンド先端の平坦部の面積を変化して実験を行ない、上下方向の切込みによつて引かき抵抗が変化することをオシログラフに記録。

実験を行なつた。この力の測定装置を平面研削盤の砥石軸台に取付け、金属試片はテーブル上に固定する。ここでテーブルを 1 m/min で送りながら、砥石軸台を下方へ手動で送りつつ、工具と試片とが未接触から接触状態に入り、すべりながらしだいに垂直荷重を増すようにする。このとき垂直、水平方向の力をオシログラフに記録した一例が図 9 である。これから明らかになるように、垂直分力は手送りに従つてほぼ直線的に増加するが、水平分力ははじめ直線的に、そしてある点で急増するのが

わかる。いいかえれば摩擦係数がここで急増する。そしてこの実験で作られた金属試片上の引かききずを観察すると、はじめの摩擦係数の低い部分では表面がこすられているのみであるが、摩擦係数の急増点以後はほり起こされているのが認められる。すなわち摩擦状態から切削状態へと移行するわけである。この結果を垂直荷重にたいする摩擦係数として図示すると図10を得る。同図には先端の平坦部面積の異なる工具の例が示してあるが、平

図9 引かき実験のオシログラフ記録例、記録中、plasticと記した点で引かきみぞのほり起こしが始まる。

図10 引かき実験において、垂直荷重を増加したときの摩擦係数の急増

坦部面積の小さいものは低い垂直荷重において摩擦係数が増大、すなわち切削状態に入り、大きい面積を持つものは切削状態に入るために高い垂直荷重を必要とすることがわかる。そして摩擦状態から切削状態に移行するときの先端接触部における接触圧力は、異なる先端面積のものともほぼ 60 kg/mm^2 である。この 60 kg/mm^2 という値は、試料の硬度 400 kg/mm^2 にくらべて非常に小さい値である。この原因は、一つには実験技術上、円錐上の平坦部とすべり方向との平行度の精度に限度があるために切れ刃を生じることが考えられるが、それを完全にしても硬度測定 of 静的接触とすべりを行なう状態では異なるのは当然考えられることである。

要するにこのような実験から、また剛体ポンチの塑性

体への押し込みの問題などから明らかになるように、砥粒が金属に押し込まれるとき、砥粒の下部の金属を塑性的に変形させるためにはある程度以上の荷重が必要であり、研削の問題としては、砥粒が切れ刃として切削を行なうためには、砥粒研削抵抗の垂直分力がある値以上になることを必要とするものである。

さてこのような点を考慮すると、前述の仮定、全切れ刃が切れ刃として有効に作用しているとするのは、現実と相当ずれていることがわかる。すなわち砥石面上の砥粒切れ刃は、それぞれ異なる逃げ面摩耗面積を持ち、また各砥粒切れ刃は結合剤の橋によつて弾性的に支持され、しかもその支持弾性系の剛性もそれぞれ異なるから、相対的に剛性が低く、また逃げ面摩耗面積の大きいものは巨視的に与えた砥石の切込みによつて、十分大きな垂直荷重を生じることなしに摩擦状態のまま切削を行なわずにすべることになる。このことを図式的に示すと図11ようになる。図は上向き削りの例であるが、このばあい接触の初期では砥石の弾性変形がわずかであるから十分な研削抵抗が発生せず塑性的切込みは行ない得ずに摩擦するだけである。そしてあるていど接触面の内部へ入ると圧力が増大して切削を開始する。このよう

図11 砥粒切れ刃の逃げ面摩耗が増大した砥石の研削状態 (図式的表現)

に全体として考えれば図のように序走部分と切削部分とに分けられ、序走部分の切れ刃は摩擦することによつて研削抵抗は発生するが、有効な切れ刃として作用しないから無効切れ刃と呼ぶことができよう。もちろん実際は前述のように逃げ面摩耗面積や支持系の弾性率などの分布から図11のように序走部分と切削部分とを明瞭に分けることはできない。

このような無効切れ刃が増大すれば、それはまったく切削には寄与せず研削抵抗を発生するのみであるから、全体としての研削抵抗は増大する。しかも図10から明らかなように、摩擦状態では摩擦係数0.2ていどで、切削状態に入ると0.5~1ていどであることが示されている

が、このことは研削抵抗の急増点の前後で研削抵抗の垂直、水平分力の比が0.5から0.2~0.3に変化することを考えると、急増点以前では無効切れ刃がほとんどなく、その後では相当いど無効切れ刃が存在することが推定される。また無効切れ刃が増大すれば、単位体積の被削材を研削するために要するエネルギーが増大するから、研削抵抗の急増点以後で砥石の摩耗が増大するのも説明される。しかしながら、現在までの実験では、逃げ面摩耗面積の増大と無効切れ刃との関係を定量的に論じるための実験結果を得ることはできなかった。

4. 結論とまとめ

上述のように、砥石面の単位面積あたりの砥粒切れ刃の逃げ面摩耗面積の総計、すなわち逃げ面摩耗面積率 a が研削中にある値に達すると研削作用が急変するのが認められる。その意味から研削砥石の目立て間寿命の判定基準としては逃げ面摩耗面積率をとるのが適当であると考えられる。しかも、砥石の結合度などによらず、研削抵抗と逃げ面摩耗面積率との関係を表わす曲線 (a - F 曲線) がほとんど一意に定まってしまうことから、この基準は相当普遍性を持つていると考えてよい。しかし、この a - F 曲線はすでに述べたように被削材の種類などによつて異なつた形をとる。故に各被削材、条件などに従つて各 a - F 曲線を求めておく必要がある。その意味では逆にこの曲線を被研削性評価のための一つの要素とすることができる。すなわち被研削性に砥石寿命の長短という項目を考慮するとすれば、砥石面の劣化の速度とともに、この a - F 曲線に関する知識を持つ必要があるわけである。

もちろん上述の意味の砥石寿命のほか、実際作業においてはその作業目的によつてとるべき寿命判定基準が違つてくるのは当然である。たとえば結合度の低過ぎる砥石はここに述べた判定法では長い寿命を持つが、砥石外形の乱れから仕上げ面の劣化が当然起こつてくる。その意味では a - F 曲線による寿命判定は一つの方法に過ぎないが、現在の作業においてはかなりの普遍性を持つものと考えられる。その他の基準については今後研究を進める予定である。

以上の結果を以下にまとめて記す。

1) 平面研削において目立て後研削を続けると、研削抵抗はある時点で急増し、その点で砥石の研削能力はいちじるしく低下し、砥石の寿命が到来する。

2) 研削を続けながら砥粒切れ刃の逃げ面摩耗を測定すると、それはゆるやかに増大し、寿命点からその増大率は増す。

3) 研削抵抗と逃げ面摩耗面積率には一対一の対応があり、その関係は特長的な曲線として表わし得る。それを a - F 曲線と呼ぶ。

4) a - F 曲線の形状から砥石の目立て間寿命を、逃げ面摩耗面積率を基準として決定するのが正当であることが示される。本実験のばあい8%が基準として得られた。

5) a - F 曲線は被削材の種類等によつて変化すると推察される。

6) 逃げ面摩耗面積率がある値を越すと、研削抵抗の垂直分力も水平分力もともに増大するが、とくに垂直分力の増大が顕著であることは、砥石切れ刃のうち無効切れ刃の増大によるものであることが、模型的な実験によつて定性的に示された。

終わりに、研究の方針を御示し下さり、御指導を給つた理化学研究所招聘研究員大越諄博士に心から御礼申し上げます。また佐田登志夫博士をはじめ、理化学研究所大越研究室の方々から有益な御助言を戴きました。実験に当たつては、同研究室の長郷国男氏に負う所大であり、ここに感謝の意を表します。実験に使用した砥石は大阪金剛製砥の渡辺半十氏の御好意によるものです。

(1961, 12月15日受付)

引用文献

- 1) 渡辺半十：研削砥石の研削作用に関する研究，精密機械，18 (1952) No.8, 8.
- 2) J. Peklenik : Untersuchungen über das Verschleisskriterium beim Schleifen, Industrie-Anzeiger, Vol.80, No.27 (1958), 397.
- 3) 津和秀夫：研削における砥粒の挙動について，精密機械，26巻 (1960), 199.
- 4) K. Schwarz : Eine Filmeinrichtung zur Erfassung der Vorgänge in Schleifscheibengefüge, Industrie-Anzeiger Vol. 80, No.92 (1958), 18.
- 5) 吉川弘之：研削砥石の自生機構，機械学会論文集 (投稿中)，昭36-10，東京大会にて講演。
- 6) 牧野秀一ほか：研削砥石の寿命について，機械試験所所報，15 (1961), 1.
- 7) 小林昭，塚田為康：単粒引きに関する研究，精機学会春季大会，1961.4 (東京)，前刷，p.77.