

研削砥石刃の実態

大阪大学工学部 津和秀夫

1. はじめに

機械部品に要求せられる精度が高くなるのに連れて、研削作業が一般の機械工場に普及して来た。そして研削作業を合理化して、生産を能率的にすると共に加工精度を一層高めることが、各工場現場で強く要望せられるようになった。

研削作業を合理化することの根底には、研削という加工法の機構を解明して、研削砥石を適正に使用することの必要性が横たわっている。刃物による切削加工が現在のように能率化した蔭には、第一次大戦以降30年間の切削理論の進歩があつたように、今後の研削技術発展の基盤として、研削機構の解明がなくてはならない。

研削は砥石表面に無数と云つてよい程多数に配列した砥粒切刃による高速下の微量切削である。そのためこれらの微細な切刃を調査したり、切くずの排出状態を観察したりすることには甚だ困難を覚える。しかし研削といつても所詮はこれらの切刃が一つ一つ刃物として働いて工作物を削るわけであるから、研削の機構を究明するためには切刃の実態を知る必要がある。

刃物による切削では、工具の形状角度は始めからわかつているし、その摩耗や刃こぼれの状態などは容易に観察したり測定したりすることができる。また一方では切くず生成の状況も比較的容易に調べることができ、被削材の受ける変形や力の加わり方なども詳しく知ることができる。このように切削では工具と被削材の両者をもとに詳細に観察できるので、その機構の追求は可成り進んだ領域まで来ている。

しかし研削では、切くず生成部分を直接観察することは不可能に近いので、その機構追求の手だてとなるものは、工具であるところの研削砥石切刃を詳しく検査すること以外にはない。その切刃がどのような形状を持ち、どのような分布で砥石表面に並んでいるかということと、またその切刃が研削作業を行うことによつてどのように変化するかということを知るのが、研削機構解明の正道として唯一のものである。

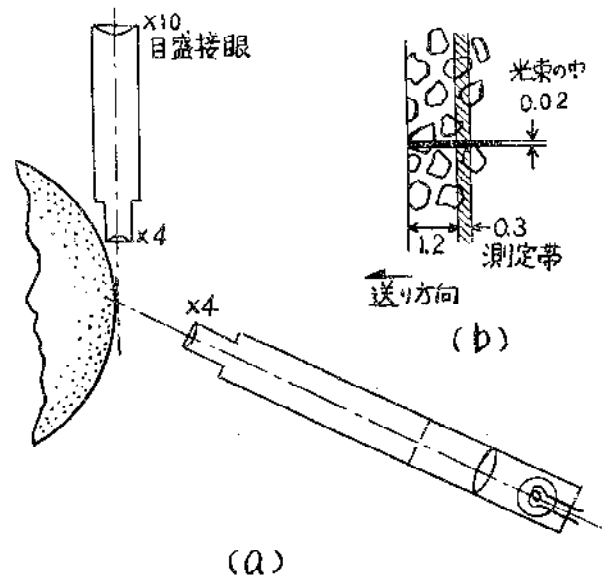
著者はこのような観点から、研削砥石の切刃を観察して来たので、以下に概略を述べよう。

2. 切刃の変化

2.1 マクロ的な切刃の変化

研削砥石の切刃が受ける変化を知るためには、ある着目する特定の砥粒切刃について研削の前後を比較しなくてはならない。そしてこのような切刃の追跡を多数の砥粒について行つて、その平均としての切刃の変化を論じる必要がある。

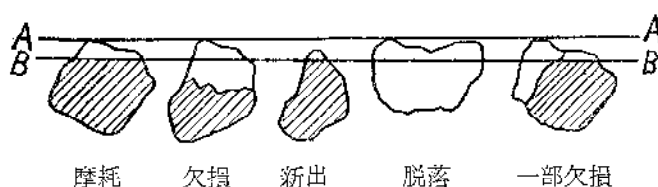
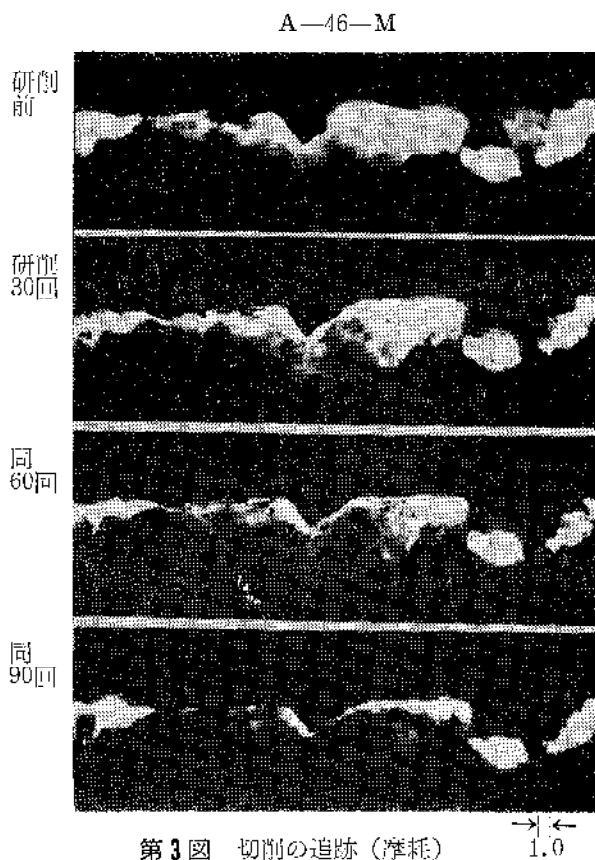
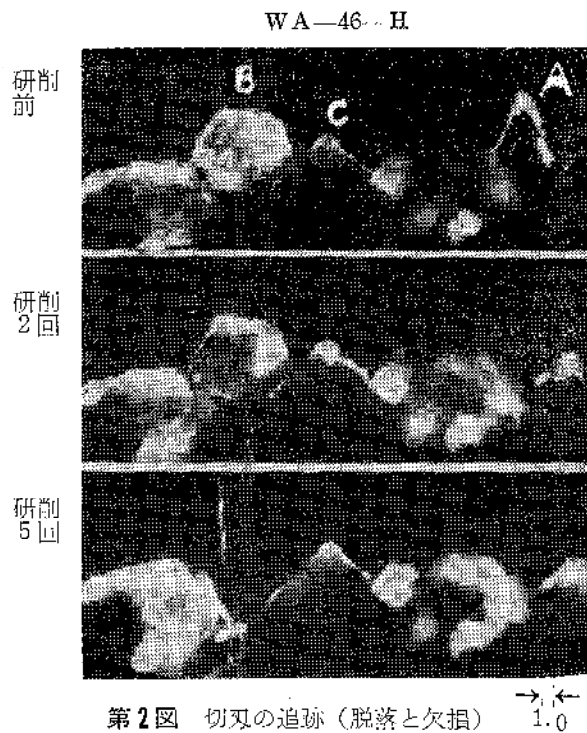
まず研削砥石の切刃を低倍率の顕微鏡観察して、その変化の状況を概略的に知ることとした。しかし砥石作業面上に無数に並ぶ砥粒のうち、着目するものを見出すために、第1図に示す光切断法応用の切刃観測装置を用い



第1図 砥粒切刃観測装置の原理

た。これでは砥粒切刃の輪郭をはつきりと見るために、光切断用の光束を砥石表面に当てて、これを接線方向から40倍の顕微鏡観察している。砥石はホルダと共に研削盤主軸より外して、光学割出台に取り付け、切刃の円周上の位置を正確に読みとるようにしている。また切刃の砥石軸方向の位置は顕微鏡に設けた目盛接眼によつて測定を行う。このようにして両座標上の砥粒切刃の位置を精密にプロットして置けば、研削後に再び同一切刃を見付け出すことはさして困難ではない。

第2図はこの方法で焼入工具鋼を研削した砥石切刃の追跡結果である。図の砥粒でAのように尖つたものはすぐ欠損しているし、またBのように強固に結合されていないものは脱落してしまう。またCの砥粒は作業面より



も遙かに下の方にあるために、A、Bの砥粒切刃が消失した後も切刃となることはない。

このように欠損や脱落を起す砥粒切刃は全体では比較的数が少なくて、大部分の砥粒切刃は第3図に示すように摩耗作用を受けて、切刃が平らになっている。

上の方法によつて多数の切刃について追跡を行つた結果、研削作業によつて砥粒の受ける変化としては、第4図に総括されるもののあることがわかつた。摩耗量はせいぜい0.02mm位であり、欠損の量は0.1mmあるいはそれ以上の程度のものであることと、摩耗作用を受ける切刃が大部分であるということのために、研削後の作業面上にならぶ切刃は総べて摩耗した砥粒となる。すなわち最初の作業面A Aは摩耗量だけ後退してB Bとなる。その間に始め切刃とならなかつた砥粒が新出して切刃を持つこととなる。

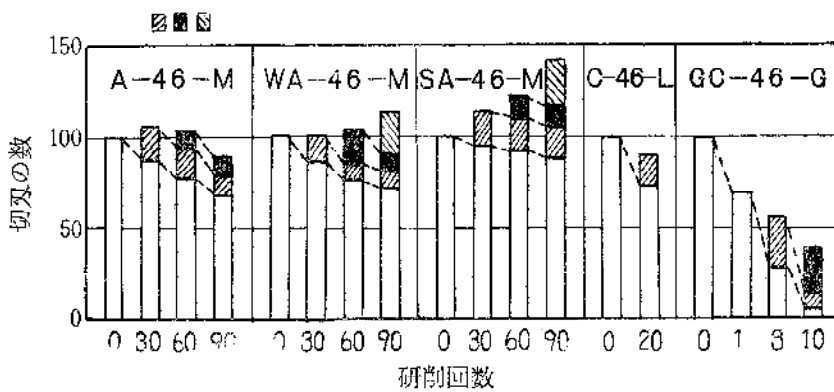
このような切刃の変化は研削作業の条件や砥石の性能に応じて、ある一定の割合で起るものである。第1表はこれらの変化の起る割合の概略値を示すものである。一般の研削作業では摩耗する切刃がほとんど大部分を占めているが、結合度の小さいGC砥石による超硬合金の研削では欠損や脱落を行う砥粒が多くて、摩耗を受ける砥粒切刃は甚だ少くなる。

第1表 切刃の挙動の割合

	一般研削作業	超硬研削作業
欠 損	5 ~ 20%	50 ~ 60%
脱 落	5 ~ 15	10 ~ 20
一部欠損	20 ~ 30	10 ~ 20
摩 耗	60 ~ 70	10 ~ 20
新 出	10 ~ 20	30 ~ 40

このような砥石の性能の変化は切刃の数の上にもあらわれる。最初に砥石表面上に100個の切刃を含む面積をとり、この面積内の切刃数が研削によつてどう変わるかを調べた結果が第5図である。図は切刃を追跡して、その結果から求めたもので、A砥石について説明すれば、研削30回(砥粒の切削長さ90m)で最初の100個は16個の脱落や欠損砥粒により84個となるが、摩耗による作業面の後退によつて22個の新切刃が出るため、砥粒数は都合106個となつている。以下同様にして砥粒数の増減を棒グラフで示している。

A (酸化アルミニウム) 砥石とその純度の高いWA砥石とは大体似たものであるが、酸化アルミニウムの単粒砥粒(粉碎をしていないもの)で



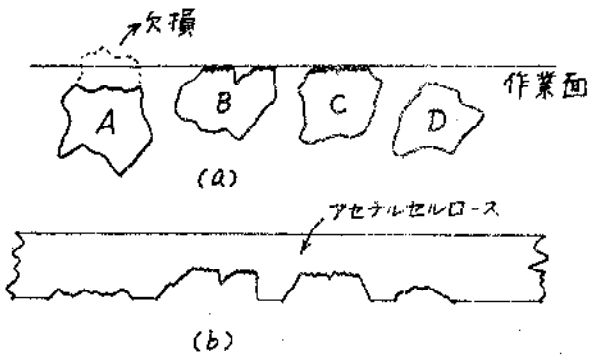
第5図 研削中の作用切刃数の変化

あるSA砥石では、粒形が塊状であつて破砕や脱落をし難いため、砥粒数は研削によつて増大している。

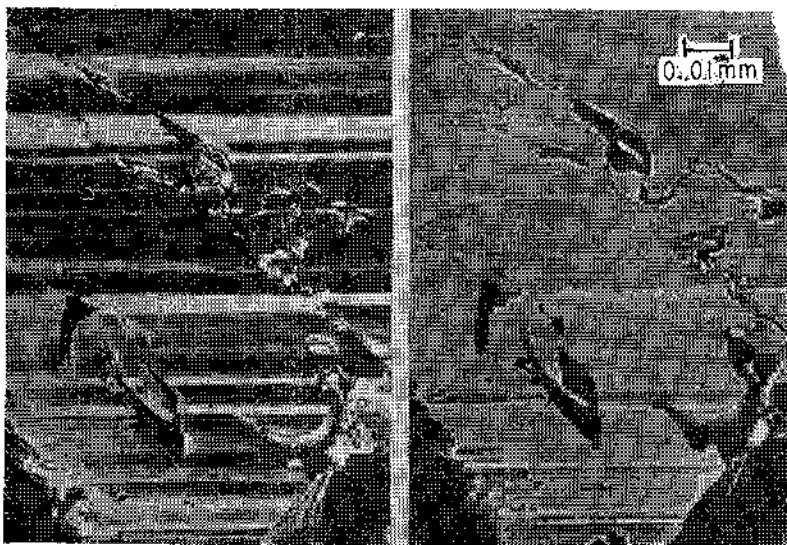
またGC（純度の高い炭化珪素）砥石で、結合度の小さいものでは、脱落や欠損する切刃が多いため、切刃数が著しく減少している。

2.2 ミクロ的な切刃の変化

前項で述べた切刃の観察は40倍の顕微鏡によるもので



第6図 レプリカの作製



第7図 砥粒切刃面の光学顕微鏡写真 A...24... I I=270m

あるから、それによつて判明する限界はせいぜい0.01mm程度である。一方研削においては1個の切刃が切削する切くずの厚さ(砥粒切込深さ)はミクロンあるいはそれ以下である。そのため上の観察で摩耗によつて頭が平らになつた切刃といつても、実際上どの程度に平らなのか、またはそこには微細な凹凸があるのではないかということをはつきり観察するのでは意味がない。

そこで切刃の部分を一層高倍率で観察する必要が生れる。ところが光

学顕微鏡による高倍率観察を行うときには、砥粒が透明体であるため、切刃面以外からの散乱光によつて十分に鋭いピントを合わせることができない。そのため第6図のように、切刃面のアセチルセルローズによるレプリカをとり、このレプリカについて光学顕微鏡の高倍率観察を行うこととした。このようにしてレプリカをとることのもう一つの利益は、直接顕微鏡下に砥石を持つて来なくてもよいため、資料の保存管理が容易で、同一切刃の追跡作業も至極能率的に行えることである。

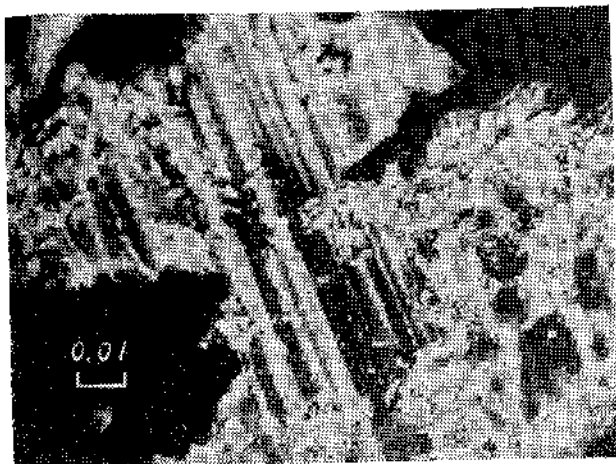
切刃面の微細な凹凸をはつきり観察するには位相差顕微鏡を使うのが適しているので、それを用いて高倍率の観察を行った。

第7図は普通顕微鏡と位相差顕微鏡との視野の差異である。切刃面上には研削方向の摩擦疵があつて、この疵の凹凸は極めて小さく、位相差視野で黒白に出る程度であるから1μ以下であることがわかる。第8図は同じように摩耗を受けた切刃である。摩耗面は摩擦疵だけではなく、その外に図であばたのように見えるはく離のあともある。

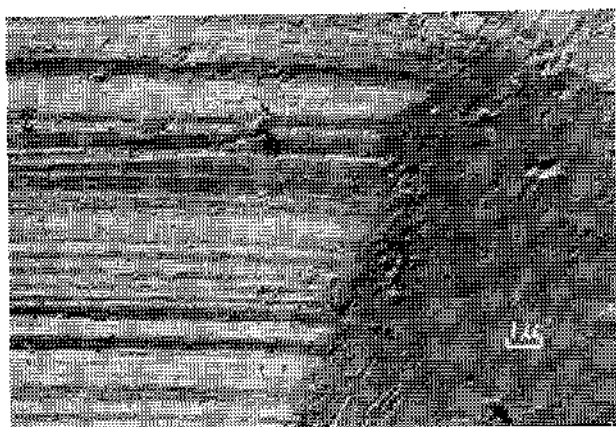
このようにして光学顕微鏡によつて切刃のミクロ構造を知ることができるが、さらに一層微細な部分を究めて摩耗の機構を知ろうとするには、電子顕微鏡の力を借らねばならない。

電子顕微鏡観察するとき、問題となるのは切刃の部分をとらえて、これを電子顕微鏡の視野にうまく入れることである。そのためにはレプリカを先ず高倍率の光学顕微鏡で調べて、その必要部分だけを切り取り、それをメッシュにのせるといふ可成り熟練の必要な操作を行わねばならない。

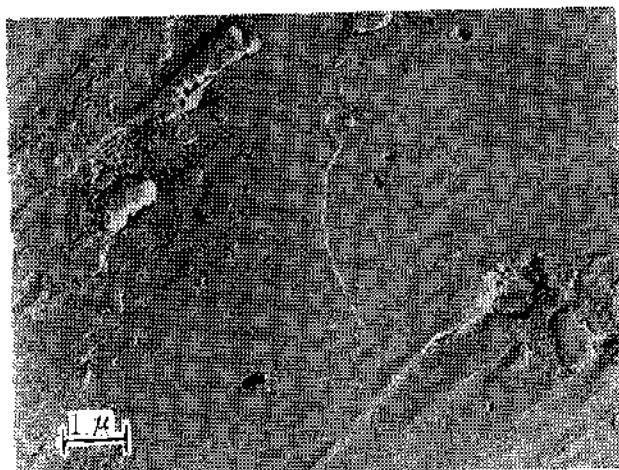
第9図は摩耗切刃面の一部であつて、摩耗条痕は金属の仕上面と全く同じよう



第8図 摩耗した切刃, WA-46-J



第9図 摩耗した切刃, A-24-I



第10図 摩耗した切刃, WA-46-J

な様子になっているのがわかる。また第10図は摩耗切刃の表面にはく離れた場所があつて、ここから摩擦条痕が発生しているのが見られる。

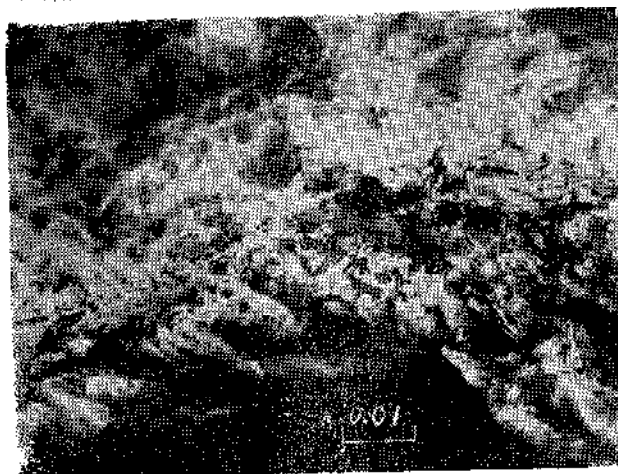
このような切刃面のミクロ的な観察結果より、切刃の摩耗は金属仕上面と同様に表層が高熱となり流動に近い状態になつて摩擦せられて出来たものであることが知られる。

事実 Peklenik 氏は研削時の局部的瞬間的溫度が酸化アルミニウムの溶融点 $2,000^{\circ}\text{C}$ に達することを実験しており、砥粒摩耗の原因として切刃の軟化流動を挙げている。また Goepfert 氏も摩耗原因として砥粒の工作物へ溶着を説いている。上の電子顕微鏡写真は、これらの考え方の正当なことを示すものである。

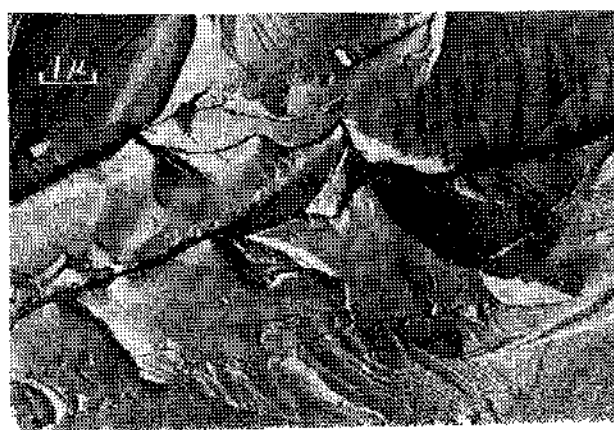
研削作業では摩耗によつて砥石の切れ味が低下すれば、ドレッサを当てて目なおしを行う。目なおしを行つたときの切刃は位相差顕微鏡では第11図のようになる。図でピントの合つている部分が切刃面を構成するものである。この部分はダイヤモンドドレッサによつて切削された場所でマクロ的には平坦で、一つの切刃面を形成しているが、ミクロ的にはこのように小さい凹凸を多数にもつ粗面である。

この粗面は電子顕微鏡では第12図のような小破碎の集合から成り立つのが通常で、まれには第13図のように美しいへき開面の一部が切刃となつていることもある。いずれにしても、目なおしのときの砥粒切刃は鋭い切刃をもつていて、これによつて鋭利な切削を行う。

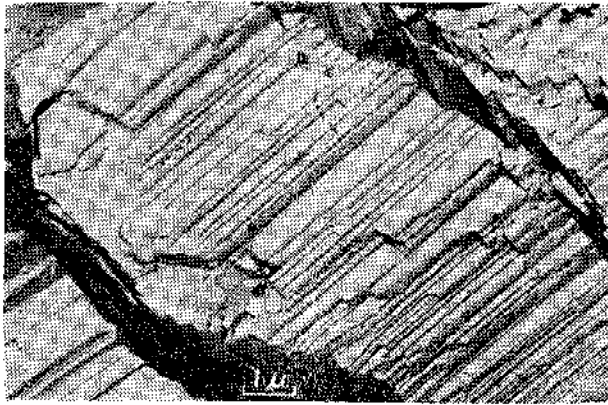
このようにして出来た鋭利な小さい切刃をもつた砥粒が研削を行う間に摩耗して切れ味を失うのであるが、そ



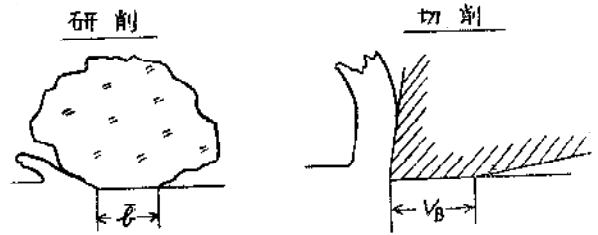
第11図 目なおしを行つた切刃, A-45-J



第12図 目なおしにより破碎した切刃, A-24-I

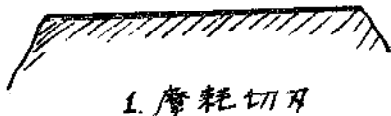


第13図 目なおしによりへき開を行つた切刃
WA-46---J



第15図 切削と研削における切刃の摩耗面

ということが大事である。これはいわゆる第15図の逃げ面摩耗幅として表現され、これがある一定値（バイトでは通常0.7~1mm）になつたときをもつて寿命点として



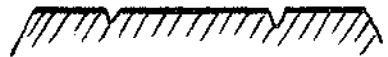
1. 磨耗切刃



2. 目直し



3. 研削初期



4. 寿命時切刃

第14図 切刃の摩耗機構

の経過は第14図に示される。研削によつて小さい凹凸部の先端が先ず摩耗し、(2)それがさらに進行して全体が平坦になる(3)と、ここで切刃の寿命が終り、研削作業としては研削抵抗と研削音が増加し、ビビリが発生したり仕上面が研削焼けを起したりする。

3. 切刃の評価

3.1 性能評価の諸点

切削工具ではその性能を評価するのに、工具の材質、すくい角などの切刃の形状、バイトの大きさなどの工具寸法を重要視しており、これらの値がわかれば、その工具を使用するときの工作条件や仕上面あらさ、切削抵抗などの決定や推測が可能である。

そしてこの工具を使つて切削加工を行つたとき、工具の切削能力がどの程度に劣化して来たかということ、云いかえれば寿命に対して工具の状態がどうなつてい

第2表 研削砥石の性能評価点

	研削砥石	フライス
工具の材質	砥粒 { 高温硬さ 溶着性 靱性 } WA, A, GC, C等	フライスの材質 { 高温硬さ 溶着性 靱性 } 超硬, 高速度鋼, 炭素鋼等
刃の角度	切刃の角度 { すくい角 傾斜角 逃げ角 }	刃の角度 { すくい角 逃げ角 アキシアルレーキ角 ラジアルレーキ角 アキシアル逃げ角 ラジアル逃げ角等 }
刃の間隔	連続切刃間隔	ピッチ
刃の並び	砥石の弾性 砥石の不平衡	刃の不揃い
寿命	切刃面積率	逃げ面摩耗幅

の経過は第14図に示される。研削によつて小さい凹凸部の先端が先ず摩耗し、(2)それがさらに進行して全体が平坦になる(3)と、ここで切刃の寿命が終り、研削作業としては研削抵抗と研削音が増加し、ビビリが発生したり仕上面が研削焼けを起したりする。

いる。

このように切削工具では、工具の性能や寿命は合理的に表現せられ、直接に加工作業と結び付き得る形態で利用せられている。ところが研削砥石については、粒度だとか結合度だという、研削作業と直接の結び付きのないもの、極端に云えば得態の知れない物理量によつて砥石の性能を表現しようとしているし、その寿命についても合理的な考え方がなされていない。

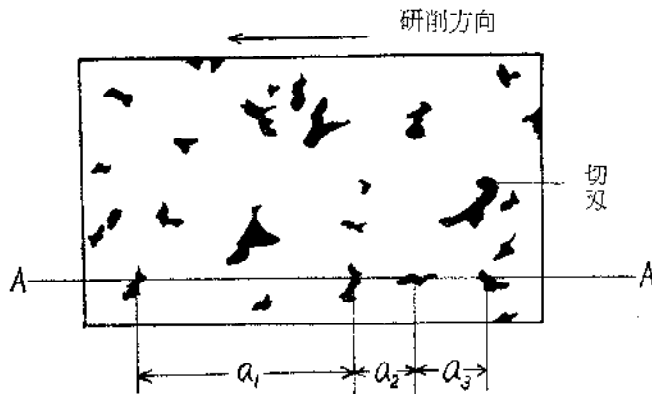
元来研削は切刃の切削状況がフライス加工と同様であるので、その切刃を評価するためには、フライスに対するものと同じ考え方で進むのが妥当である。このような考えのもとに研削砥石の性能評価の諸点を記したものが第2表で、これでは関連上フライスのものも掲げている。

表で刃の並びというのはフライスでは精度の中に入る刃の不揃いで、これのために一部の刃に余計に負担がかかつて切れ味が悪くなり、寿命を短くするものである。研削砥石では、これに相当するものが砥石の弾性と砥石の不均衡である。

これらの評価点について解析を行うことが、今後の研削の理論的究明にとって最も重要なことと考える。著者はこれらの中で連続切刃間隔と切刃面積率の2つについて研究を行ったので、以下にその概要を述べよう。

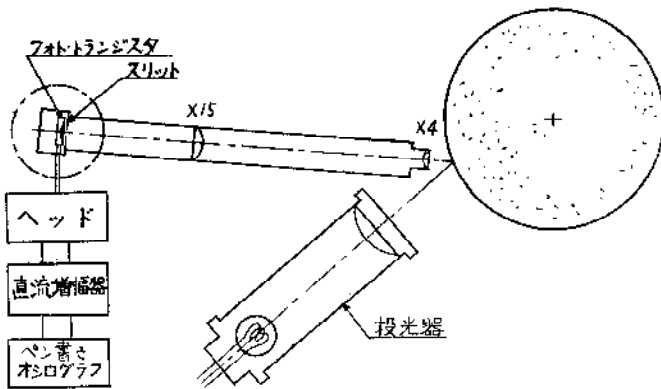
3.2 連続切刃間隔

フライスの刃のピッチに相当する研削砥石の連続切刃間隔は第16図に示すように砥石作業面上に研削方向に引いた直線が切る点間の距離であつて、その平均値によつてあらわされる。



第16図 連続切刃間隔

連続切刃間隔の大きい砥石では、切込や工作物速度、砥石同速度の工作条件が同じであつても、一つの切刃の切削する切くずの厚さ（砥粒切込深さ）は大きくなる。



第17図 光学的連続切刃間隔測定装置

すると一つの砥粒切刃に加わる力が大きくなって、砥粒の脱落や欠損が増し、砥石の損耗が激しくなって加工精度が劣化する。また仕上面もあらくなる。

逆に連続切刃間隔の小さい砥石では、一つの切刃の切削するべき切くず厚さが小さくなるため、切刃が何等切削を行わず工作物表面を上すべりする場合が増し、そのために切れ味が悪く、砥粒切刃の摩耗は甚だしくなる、結局研削能率が

低くて砥石の寿命も短いことになる。しかし仕上面は、切刃によつて激しく摩擦せられるために、滑らかとなる。

近時鏡面研削という技術が発達し、通常の研削作業に用いられる#60程度の砥石で、仕上面あらさ0.4μ以下鏡面を造り出すことができるようになった。これは研削砥石の日なおしを非常に丁寧に行つて、連続切刃間隔を小さくし、研削条件もまた微小切削を行うように調節して、切刃に仕上面の摩擦作用を増加させて鏡面を造るものである。

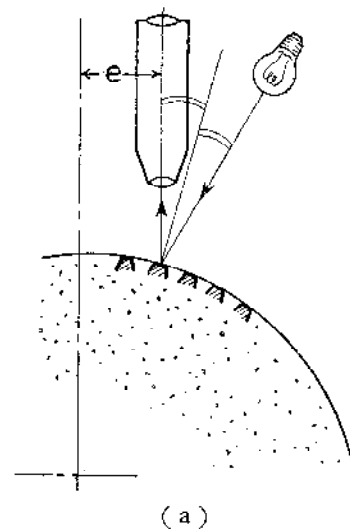
さて連続切刃間隔は第16図に与えられる量ではあるが、実際問題として、その値を測定することは非常に困難である。

著者は先ずマクロ的な切刃の観察の項で述べた切刃観察装置を用いて連続切刃間隔を測定した。研削方向の任意の直線が切刃を切るとき、連続切刃間隔 \bar{a} はかなりな数の平均値として確率の考えを入れれば、次式によつてあらわされる。

$$\bar{a} = w^2 / \bar{b} \quad (1)$$

ここに w^2 は切刃1個の占める砥石表面の面積で、一定面積 A 内の切刃数 n より

$$\bar{w} = \sqrt{A/n} \quad (2)$$



として測定し計算せられる。また b は切刃幅の平均値で第1図の装置により測定せられる。

この方法でも相当に煩雑であるので、光学的に測定する装置として、第17図の

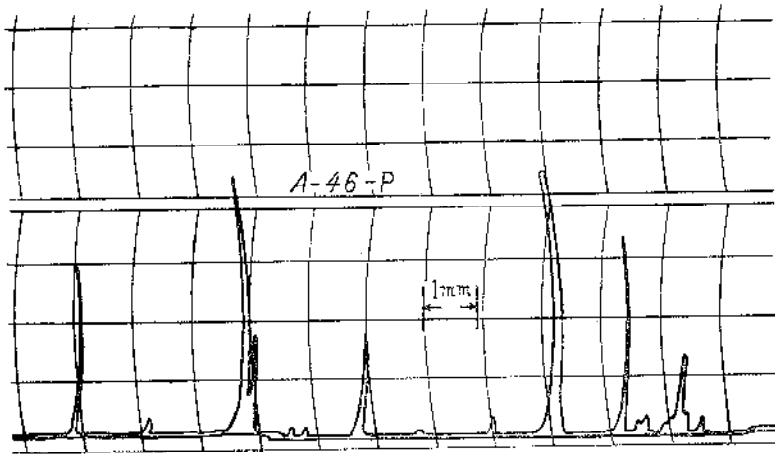


(b)

第18図 切刃面の顕微鏡観察法

ものを造つた。これは切刃面が砥石表面の円筒面を形成していることを利用し、第18図(a)のように、光源からの光が切刃面から反射して顕微鏡に入るようにして置けば、同図(b)のように、切刃だけが写真記録せられることを利用したものである。実際の装置は第17図のように組立て、顕微鏡焦点面にピンホールを設け、そこから入る光をフォトトランジスタで受けて直流増幅し、ペン書きオシログラフによつて記録するものである。このようにして砥石をごく低速でまわせば、丁度砥石作業面上を第18図(b)の直線で走査したことになり、切刃を切る点だけで電流が流れて、第19図の記録を得る。

これらの方法で種々の砥石について連続切刃間隔を求め、研削作業中の変化を調べた。その結果の数例について



第19図 切刃の記録の例

ては次項で述べる。

3.3 切刃面積率

切刃の摩耗の程度を数量的に表現するものが切刃面積率である。研削砥石の切刃は上述の観察によつて摩耗により平らになつて二番の当る工具として作用する。そのためこの面積を各切刃について総計したものが、研削砥石の全作業面に対する比率を切刃面積率と呼ぶことにすれば、切刃面積率の大小によつて切刃の摩耗進行の程度を表現することができる。

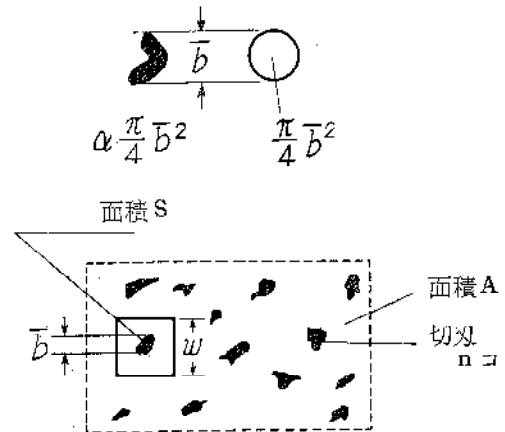
実際問題としては、砥石の作業面全体をとることはできないので、その作業面上に適当な広さの面積Aをとり、その中に含まれる切刃面積の和を測定して求める。切刃面積の和は第20図に示すように、切刃面を円と考えたときの面積 $\pi/4 \cdot \bar{b}^2$ に面積効率 α を掛けたもので与えられる。それゆへ切刃面積率 η は

$$\eta = \frac{\alpha(\pi/4)\bar{b}^2 \cdot n}{A}$$

となり、これに(1)(2)の関係を用いれば

$$\eta = \alpha(\pi/4)(\bar{b}/w)^2 \quad (3)$$

$$\text{または } \eta = \alpha(\pi/4)\bar{b}/a \quad (4)$$



第20図 切刃面積率の計算

となる。この関係を用いれば切刃観測装置を用いて連続切刃間隔と同様にして測定することができる。

切刃面積率の大きい砥石では切れ味が悪いので、研削中に η が上昇したり低下したりする程度によつて砥石の性能を判定できるし、またその値の上昇によつて研削砥石の寿命を知ることができる。

第21図は吉川氏が測定したもので、切刃面積率が上昇すれば、ある点で急激に研削抵抗が上昇している。この上昇点を砥石の寿命として、この点に達したならば日なおしを行うべきである。その上昇点は切刃面積率で約7~8%近辺である。

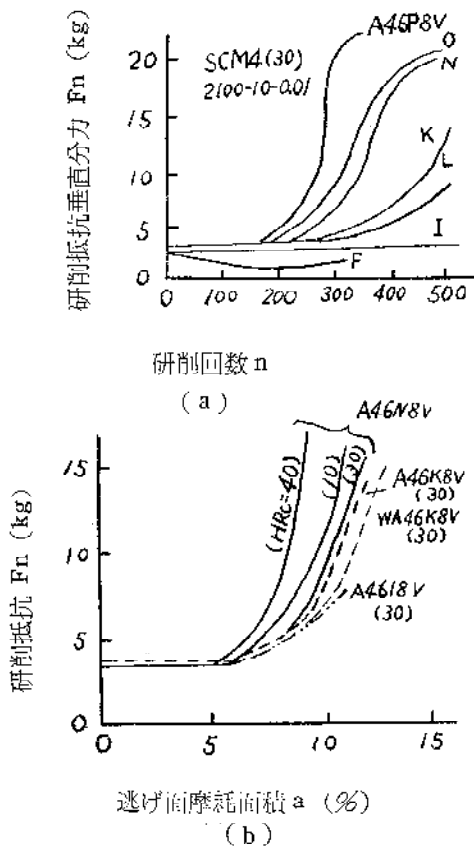
このような考えで砥石の寿命を切刃面積率と結び付け、切刃面積率から砥石の寿命を求めるのが最もよいと考える。しかし問題は切刃面積率の測定にあつて、この正確且つ容易な測定法が要望せられる。

第22図は粒度結合度を同じくして、砥粒の種類だけが異なる砥石について研削試験を行つたときの、連続切刃間隔と切刃面積率の経過を示し、比較のため、結合度の特に小さいGC-46-Gの砥石のものを掲げてある。砥粒の種類によつて間隔と面積率が大きい異なること、間隔ではこの3種の砥粒の性能はさして違わないようであるが、面積率では大いに違つていて、WA砥石が最も良好であることが見られる。

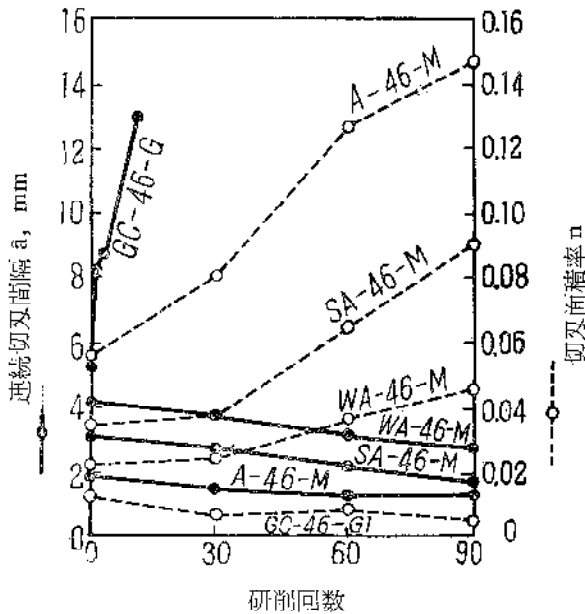
また第23図は酸化アルミニウムの#46の砥石で結合度の違つたものについての、間隔と面積率を測定した結果である。Oの結合度の大きい砥石は摩耗が激しくて、面積率の上昇が激しく、KまたはIの砥石が適当しているのがわかる。

4. む す び

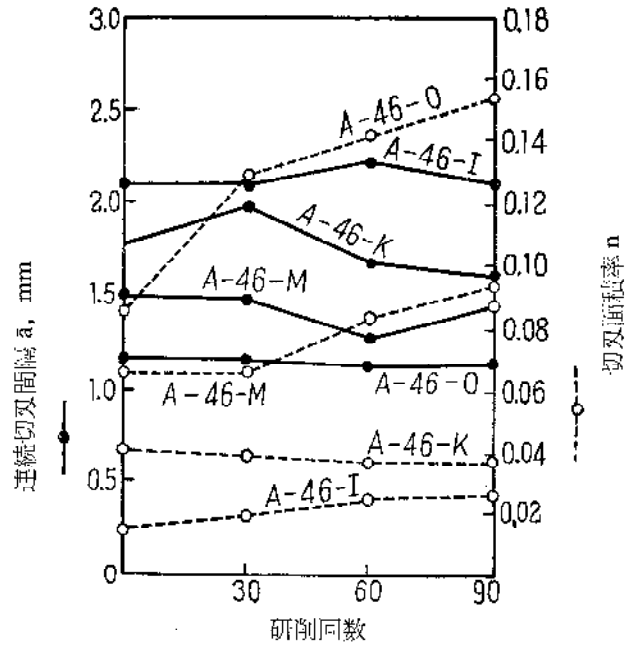
研削砥石の切刃の実態を知つて、それから出発して研



第21図 切刃面積率と研削抵抗 (吉川)



第22図 砥粒種類の影響



第23図 結合度の影響

削現象を正しく把握しようとする行き方は、最近にいたつて緒についたばかりである。そのため上に書いたような考え方は研削という広範で複雑な現象を解くための、ほんの一つの手掛りとなるものに過ぎず、今後の研究成果に大いに期待するところである。

このようにして研削が切削並みにまで解明せられたとき、始めて合理的な精密加工技術が確立し、勘と経験の推積とから組み立てられた叩き方式から解放せられて、より精密なものをより経済的にという明日の理想に一步近づくこととなる。