研 究

砥石作業面性状の定量化に関する研究 (第1報)*

— 切れ刃分布 —

安井平司** 津和秀夫***

Studies on Quantitative Analysis of Wheel Surface (1st Report)

— Distribution of Cutting Edges —

Heiji YASUI, Hideo TSUWA

This study is carried out as the initial stage of the studies which are done in order to analyze quantitatively the variation of the working surface of grinding wheels in grinding. In experiments, the cutting edge ratio and the distribution of cutting edges are directly measured with a microscope in the dressing process for several dressing conditions. Furthermore, the variation of the density and the distance of cutting edges in grinding are examined in detail. The cutting edge ratio and the distribution of cutting edges are found not to vary in the dressing process over a sum of the dressing depth in the case of repeating the same dressing. In the grinding process except the initial stage, it is cleared that the density of cutting edges is nearly constant and the distance of cutting edges decreases as the stock removal increases. From these results, it is considered that the density of cutting edges is determined by specifying the dressing condition and the variation of the working surface of the grinding wheel in grinding is regarded as the wear process of cutting edges.

1. 緒 言

砥石の研削性能は目直しによって加工目的に適合するように調整され、研削することによってその研削性能が劣化する過程をたどる。目直しによる調節は目直し条件を変化させ、砥石作業面付近に存在する砥粒の破壊および脱落の量を変える、すなわち切れ刃の分布および形状(以後、砥石作業面性状と呼ぶ)を変えることによって行われる。また、砥石の研削性能の劣化は、著者らの一人¹⁾によれば研削することによる砥石作業面性状の変化のために生じる。それゆえ、概念的には、目直しによって形成される砥石作業面性状と各研削作業条件での研削による砥石作業面性状の変化を定量的に明らかにし、一方、砥石作業面性状と研削焼け、研削抵抗、仕上面あらさなどの関係が定量化されれば、砥石の研削性能を定量化することは可能であろう。近年、この概念を基礎として多くの研究が行われ、切れ刃の摩耗と砥石の寿命²⁾や切れ刃の分布と仕上面あらさ³⁾などの関係がかなり定量的に明らかにされ始めている。

しかし、研削による砥石作業面性状の変化について

は、ほとんどの報告が定性的なもので、定量的に取扱ったものは少ない。特に、目直しは砥石の初期状態を決定する重要な要素であるが、研削過程における砥石作業面性状の変化に及ぼす目直し条件の影響についての報告は定性的にも見いだされない。目直し条件が変われば砥石の初期状態が変化することは報告されており⁴⁾、初期状態が変われば研削による砥石作業面の変化形態が異なることは十分考えられる。それゆえ、研削による砥石作業面性状の変化を系統的かつ定量的に明確にするためには、目直しについても十分考慮する必要がある。

ところで、目直し条件は普通ドレッサの運動条件とドレッサの形状(形状はドレッサの摩耗状態で考えられているが、まだ十分には考慮されていない現状にある)によって規定されている。しかし、これらの条件と目直し直後の砥石作業面性状とは一義的關係をもつものではなく、目直し直後の砥石作業面性状には目直し作業過程(以後、目直し過程と呼ぶ)が影響する。例えば、荒い目直し後と細かい目直し後の砥石作業面を同一目直し条件で目直しを施しても、砥石作業面性状が異なることは明らかである。従来の研究では、目直し過程の影響をなくすために、あらかじめ非常に細かい目直し条件で目直し作業を繰返し、砥石作業面を一定にしたとし、その後、目直し条件を変えることによって、目直し条件と切れ刃分布の関係を求めている⁴⁾。しかし、同じ目直しを

* 原稿受付 昭和48年9月1日。昭和47年度精機学会関西支部講演会(昭和47年7月15日)にて発表。

** 正 会 員 熊本大学工学部(熊本市黒髪町2-39-1)

*** 正 会 員 大阪大学工学部(吹田市字山田上)

図1 切れ刃分布および切れ刃面積率の測定装置

繰返せば砥石作業面性状が一定の状態になるという報告はみられず、また一定の状態になったとしても砥石作業面を一定にするための予備目直しが変化すれば、目直し条件と切れ刃分布の関係は変わると考えられ一般性に乏しい。したがって、目直し過程も含めた目直し条件と砥石作業面性状の関係が明確にされなければ、研削過程における砥石作業面性状の変化に及ぼす目直し条件の影響を求めたとしても、その結果は限定された研削作業条件のみしか使用し得ず、研削による砥石作業面性状の変化の系統的かつ定量的変化を究明することは困難であろう。

このような概念から、研削による砥石作業面性状の変化の定量化をめざし、本研究においては、目直し過程における砥石作業面性状の変化を調べ、目直し過程を含む目直し条件と砥石作業面性状の関係を検討した。また、各種目直し条件で目直しを施した砥石の研削による切れ刃分布の変化を調べた。以下に、その結果を報告する。

2. 実験方法および条件

2.1 切れ刃分布および切れ刃面積率の測定法

従来よく使用されている切れ刃密度および連続切れ刃間隔の測定法は砥石作業面をカーボン紙やすすをつけたガラス板上に転写して測定する間接法である⁵⁾。しかし、間接法では、目直し切れ刃のぜい弱性を考慮すると、転写の際にある程度の誤差が生じる可能性がある⁶⁾。そこで、本実験では、図1のように顕微鏡を研削盤に取付け、直接測定した。その方法は、顕微鏡の接眼レンズ内に格子を切ったフィルムを入れ、砥石を手で回し、0.7 mm 幅の砥石作業面上の切れ刃数（切れ刃密度の場合）および格子の中心を通過する切れ刃数（連続切れ刃間隔の場合）を測定する方法である。ただし、測定に際しては、一つの砥粒上に幾つかの切れ刃が存在していてもこ

図2 切れ刃密度の測定方法

表1 実験条件

砥石	A 46 M 8 V WA 46 M 8 V A 46 I m V
砥石周速	1 900 m/min
テーブル速度	8 m/min
被削材	SK 3 (焼入れ $H_{RC} \approx 60$)
研削方式	プランジカット研削

れを一つの切れ刃とした。また、切れ刃密度の測定に際しては、図2に模式的に示すような切れ刃の一部が格子の側線にかかっている切れ刃は、両側線 AA と BB にかかる確率が同じであるとして、一方の側線にかかる切れ刃のみを算入した。なお、本実験の測定長さは、同一砥石円周方向について、砥石軸中心に対称な2か所の部分を100 mm ずつ測定し、これを砥石軸方向に3か所場所を変えたので、総計600 mm である。

切れ刃面積率⁷⁾は格子の中心を通過する切れ刃の長さを測定し、その総計を測定長さで割ることによって求めた。測定長さは600 mm から1 000 mm である。

2.2 実験条件

表1に本実験において主に使用した実験条件を示す。なお、目直しはドレッサ先端幅の方がドレッサ送りよりも大きい、すなわちねじ切り状目直しにならない範囲で行った。これは、通常ドレッサ先端幅が小さい場合には摩耗しやすく、一般にはねじ切り状目直しを行うことは少ないと考えたためである。

3. 目直し過程における砥石作業面性状の変化

ある表面状態の A 46 M 砥石に同じ目直し条件で目直しを繰返した場合の砥石作業面上の切れ刃密度の変化を図3に示す。総ドレッサ切込み量（ドレッサ切込み量×繰返し回数）が少ない初期過程においては、ドレッサ送り360 $\mu\text{m}/\text{rev}$ 、切込み10 μm のように切れ刃密度は変化するが、総ドレッサ切込み量が大きくなると、各目直し条件とも切れ刃密度は変化しなくなる。この変化しなくなった切れ刃密度を目直し条件に対して示すと図4の

図3 目直し過程における切れ刃密度の変化

図4 目直し条件と目直し直後の切れ刃密度の関係

図5 目直し過程における切れ刃面積率の変化

ようになる。図より、切れ刃密度は従来いわれているようにドレッサ切込みおよび送りを増加すれば減少することがわかる。ただし、ドレッサ送りがある程度以上大きくしても、切れ刃密度には大きな影響を示さない傾向がみられる。

図5に図3の切れ刃密度と同時に測定した目直し過程における切れ刃面積率の変化を示す。切れ刃面積率の場合には、ドレッサ送り 170 μm/rev、切込み 30 μm およ

図6 各種砥石の目直し過程における切れ刃密度の変化

図7 各種砥石の目直し過程における切れ刃面積率の変化

び 50 μm のように、切れ刃密度の場合よりもばらつきが大きいが、各目直し条件の目直し過程における切れ刃面積率の変化を総合的に判断すると、やはり切れ刃密度と同様、総ドレッサ切込み量が大きくなると変化しなくなる。

このような結果は、A 46 M 砥石だけでなく、WA 46 M 砥石および A 46 I 砥石にもみられる。図6および図7に両砥石の目直し過程における切れ刃密度および切れ刃面積率の変化を示す。両図より、A 46 M 砥石よりも WA 46 M 砥石および A 46 I 砥石の方が砥粒の破碎性が高い、あるいは結合度が小さいため切れ刃密度および切れ刃面積率は小さいが、総ドレッサ切込み量が大きくなると A 46 M 砥石同様変化しなくなることがわかる。

これらのことより、砥粒の種類や砥石の結合度などによって定量的には変化するが、定性的には同じ目直し条件で目直しを繰返せば、その目直し条件に固有な砥石作業面性状になることが、すくなくとも A 系の結合度 I 以上の砥石、拡張すれば、他の種類の砥粒で構成されている砥石についても言えよう。なお、連続切れ刃間隔についても総ドレッサ切込み量が増加すれば変化しなくなる結果を得ている。これは、切れ刃密度や切れ刃面積率が変化しなくなることを考えると、当然の結果であろう。

以上の結果から、目直し過程における切れ刃密度およ

図8 目直し過程における砥石作業面性状の変化

図9 研削過程における切れ刃密度の変化

び切れ刃面積率の変化は図8のようになると考えられる。すなわち、同じ目直しを繰返すと、切れ刃密度または切れ刃面積率はBB'やCC'のようにあるばらつき幅はもつがほとんど変化せず、その目直し条件固有の値になり(定常目直し状態と呼ぶ)、このBB'やCC'のある目直し過程で目直し条件を変えるとB'CまたはC'Dのような過渡的な状態(過渡目直し状態と呼ぶ)を経てCC'またはC'Dのような定常目直し状態になるものと考えられる。したがって、目直し条件と砥石作業面性状の初期値である目直し直後の砥石作業面性状との定量的対応をさせることは目直し過程を明確にすることによって可能であろう。

4. 研削過程における切れ刃分布の変化

A46M砥石でSK3(焼入れ $HRC \approx 60$)を研削した場合の研削過程における切れ刃密度の変化を図9に示す。ただし、目直し直後の砥石作業面性状としては定常目直し状態のものを使用した。切れ刃密度はドレッサ送り $170 \mu\text{m}/\text{rev}$ 、切込み $10 \mu\text{m}$ の研削初期を除き研削過程において大きな変化を示さないが、目直し切れ刃のぜい弱性を考慮すると、他の目直し条件の場合でも研削初期

図10 目直し条件と研削過程における切れ刃密度の関係

図11 各種砥石の研削過程における切れ刃密度の変化

にはそれ以後の研削過程よりも大きな変化があるものと思われる。研削初期以後の切れ刃密度の変化は各目直し条件の場合とも研削長2mを基準とすれば、最大の変化を考慮しても $\pm 10\%$ 以内である。それゆえ、研削初期を除く研削過程における切れ刃密度は一定と言え、したがって目直し条件と研削過程の切れ刃密度は一義的関係をもつものとみなしうる。図10は図9の目直し直後を除いた残りのプロットを算術平均し、目直し条件と切れ刃密度の関係を求めたものである。図より、切れ刃密度はドレッサ送りと切込みによって影響されるが、ドレッサ切込みは本実験のように研削作業において常用される目直し条件の範囲では、ある程度以上大きくしても切れ刃密度に大きな影響を与えないことがわかる。

以上はA46M砥石の場合であるが、その他、WA46MおよびA46I砥石についても研削過程における切れ刃密度はほぼ一定である。図11は定常目直し状態の砥石作業面を初期状態にした場合のWA46MおよびA46I砥石の研削過程における切れ刃密度の変化を示すものである。両砥石の場合とも、研削過程における切れ刃密度はほとんど変化していない。切れ刃の破壊や脱落が比較的生じやすいと考えられるWA砥石やA46I砥石でも

図12 研削過程における連続切れ刃間隔の変化

図14 切れ刃面積率と連続切れ刃間隔の関係

図13 切れ刃の摩耗と連続切れ刃間隔の変化

研削過程における切れ刃密度が変化しないことから、研削過程における切れ刃密度の一定性は結合度 I 以上の少なくとも A 系砥石、拡張すれば、C 系や SA などの種類の異なる砥石についても得られることが考えられる。

切れ刃分布の一方の表示法である切れ刃密度については以上のとおりであるが、他方、連続切れ刃間隔も砥粒切込み深さを介して研削現象と密接な関係をもつ重要な切れ刃分布の表示法であり、検討してみた。研削過程における連続切れ刃間隔の変化を図12に示す。ただし、本測定は図10の切れ刃密度の測定と同時にを行ったものである。図よりすべての目直し条件における研削過程の連続切れ刃間隔は、研削初期に切れ刃のぜい弱層が除去されるため、急激に長くなり、極大値を示し、その後研削過程が進むにつれて短くなることわかる。なお、WA 46 M 砥石および A 46 I 砥石についても同様な結果を得ている。前述したように研削過程における切れ刃密度はほぼ一定であるから、連続切れ刃間隔が研削過程において変化するのは切れ刃逃げ面の大きさが変化するためである。すなわち、図13に示すように、切れ刃逃げ面摩耗面積が小さければ、切れ刃が走査線にかかる割合が少ないため、連続切れ刃間隔は長くなる。一方、砥石の寿命時のように、切れ刃逃げ面摩耗面積が大きくなれば連続切れ刃間隔は短くなる。したがって、本実験のように切れ刃の摩耗過程によって砥石作業面が変化するよ

うな研削では、連続切れ刃間隔は切れ刃の摩耗面の大きさ、統計的には切れ刃密度が一定なので、切れ刃面積率の変化と対応して変化すると言える。

切れ刃面積率と連続切れ刃間隔の関係を図14に示す。図より、連続切れ刃間隔は切れ刃面積率の増加とともに短くなるが、その減少形態は目直し条件、いかえれば、切れ刃密度にあまり影響されないことがわかる。また、切れ刃面積率がある程度以上大きくなると、連続切れ刃間隔はほとんど減少せず、一定値に近づくような傾向を示す。これは切れ刃逃げ面がある程度以上になると走査線と大きな長さで交わるだけで、走査線にかかる切れ刃数が増加しないためと考えられる。

このように、SK 3 (焼入れ, $HRC \approx 60$) を研削した場合の切れ刃密度と連続切れ刃間隔を調べた結果では、研削過程における砥石作業面性状の変化は切れ刃の摩耗過程とみなしうることがわかったので、この結果をさらに拡張し、鋼材の研削を行った場合とするために、S 45 C を研削する場合についても調べたが、SK 3 の場合と同様な結果が得られた。したがって、特殊な鋼材を研削する場合を除けば、結合度 I 以上の A 系統の砥石では目直し作業によって決定された切れ刃密度と切れ刃の立体的幾何学形状 (この形状によって研削過程における切れ刃逃げ面摩耗面積の増加形態、したがって切れ刃密度は一定であるから、切れ刃面積率の増加形態が決定されるものと考えられる) でもって、砥石作業面性状の変化は一義的に決定されよう。すなわち、目直し条件の選定は研削過程における砥石作業面性状の変化過程の選択であり、砥石作業面性状と研削焼けや仕上面あらさとの関係が密接なことから、研削作業を行う際にはこの点を十分考慮し、目直し条件を選定する必要がある。

以上、砥石作業面性状の変化を定量化するために、目

直し過程ならびに研削過程における切れ刃分布の変化を調べたが、切れ刃分布をより定量化するためには、過渡目直し状態および研削初期の過渡状態における切れ刃分布の変化の究明を必要としよう。

5. 結 論

砥石作業面性状の変化を定量化するために、目直し過程の砥石作業面性状の変化および研削過程における切れ刃分布の変化を調べた結果、以下の事柄が明らかになった。

- (1) 同一目直し条件で目直しを繰返す場合、目直し量が少ない初期目直し過程では砥石作業面性状の変化はあるが、ある程度以上の目直し量になれば、ほとんど変化しなくなり、目直し条件固有の砥石作業面性状になる。
- (2) 目直し直後の切れ刃分布はドレッサ切込みおよび送りを大きくすれば粗になる傾向を示すが、ドレッサ切込みの場合にはある程度以上大きくしても、切れ刃分布に与える影響は非常に小さくなる。
- (3) A系の結合度 I 以上の砥石については、研削過程における切れ刃密度の変化は研削初期を除いてほとんどなく、研削初期以後は一定とみなせる。そして、その一定値は目直し直後の切れ刃分布と定性的に対応する。

(4) 研削過程における連続切れ刃間隔の変化は、ぜい弱層が除去されるため研削初期には長くなるが、その後は研削過程が進むとともに減少する。したがって、研削によって切れ刃密度が変化しないことから、研削過程における砥石作業面性状の変化は切れ刃の摩耗過程とみなせる。

(5) 連続切れ刃間隔はある程度の切れ刃面積率までは切れ刃面積率の増加とともに短くなるが、それ以上になると大きな変化はしなくなり、一定値に近づく傾向を示す。

終わりに、本研究の実験遂行に協力を得た村上修君(日立造船)に謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) 津和秀夫: 研削における砥粒の挙動について (第1報), 精密機械, 26, 4 (1960) 199.
- 2) 吉川弘之: 研削砥石の寿命特性, 精密機械, 28, 10 (1962) 562.
- 3) 例えば, 小野浩二: 研削仕上, 槇書店 (1966) 60.
- 4) 鈴木憲二, 高橋邦夫: 研削砥石のドレッシングの研究 (第1報), 精密機械, 30, 3 (1964) 246.
- 5) 砥粒加工研究会: 砥粒加工技術便覧, 日刊工業新聞社 (1965) 983.
- 6) 安井平司, 津和秀夫: 目直し切れ刃の表面構造, 昭和46年度精機学会秋季大会学術講演会前刷 (1971) 201.
- 7) 津和秀夫: 研削における砥粒の挙動について (第3報), 精密機械, 27, 6 (1961) 415.

書 評

材 料 と 加 工 (材料科学シリーズ 6)

谷口紀男著, 共立出版発行, 1974年7月, 2700円

本書は材料の多様化にこたえて、主として材料の機械的挙動を巨視的・微視的な物性的観点からとらえ、加工過程をこれによって分析し、新しい加工過程を開発しようとする意図のもとに執筆されたものである。したがって加工の専門家にとっては新加工法開発への指針となり、境界領域にある研究者・技術者には材料側からみた加工という点で貴重な示唆を与えよう。内容は4章と付章から成り、1. 加工過程と材料の変形、破壊および結合の挙動、2. 材料の挙動とその機械加工、3. 高パワー密度加工、4. 加工過程と被加工性、付章・理想強度など14項目の順に記述されている。

第1章では加工過程の体系化に必要な加工単位に基づく材料挙動の統一的な説明が特徴的である。第2章では金属、有機、無機の各材料の機械加工について従来の研究結果を要約し材料挙動の特異性を明らかにしている。

第3章は著者がもっとも力点を置いたところで、限界加工エネルギー密度、比体積除去エネルギー等により、電子ビーム加工などいわゆる物理的加工を整理するとともにその装置、基礎理論・過程・特性を豊富なデータに基づいて解説してある。第4章では被加工性を積極的な面から検討し、評価関数としての比生産量やそのベクトル分解など興味深いものがある。付章には以上の章にあらわれた基本的事項の解析的取扱いが示されている。なお各章末に引用された文献には若干の精粗がみられるが、加工を体系的に見直そうとする場合欠かせないものといえる。

いずれにせよ、加工の分析と合成を念頭に新しい工学的手法を見いだそうとする本書はまことにユニークであり、関係の方々のご一読を期待したい。

(井田一郎)