



Title	研削砥石の目直しに関する研究
Author(s)	安井, 平司
Citation	大阪大学, 1973, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/1923
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

研削砥石の目直しに関する研究

昭和 4 7 年 1 0 月

安 井 平 司

目 次

第 1 章	序	章	1
第 2 章	目直し切れ刃の脆弱層とその過渡的挙動		6
1	緒 言		6
2	実験装置および方法		7
2-1	顕微鏡		7
2-2	実験方法		8
3	目直し切れ刃の表面形態		9
3-1	目直し直後の砥石作業面性状		9
3-2	目直し切れ刃の平坦性		12
4	目直し切れ刃の脆弱層		16
4-1	目直し切れ刃の立体的観察		16
4-2	脆弱層の構造		18
5	研削過程における切れ刃の過渡的挙動		22
5-1	研削過程における切れ刃表面形態の変化		22
5-2	研削特性に及ぼす脆弱層の影響		26
6	結 論		26
第 3 章	砥石作業面性状の定量化		29
1	緒 言		29
2	実験方法および条件		30
2-1	砥石半径減耗量の測定法		30

2-2	切れ刃密度の測定法	31
2-3	実験条件	32
3	目直し過程における砥石作業面性状の変化	33
4	研削過程における砥石作業面性状の変化	40
4-1	研削過程における切れ刃分布の変化	40
4-2	研削過程における切れ刃面積率および 砥石半径減耗量の変化	46
4-3	研削による砥石作業面性状の変化の数式化	52
5	結 論	56
第4章	砥石の研削性能の定量化	59
1	緒 言	59
2	実験装置および方法	60
2-1	メタルボンド砥石の製作	60
2-2	実験方法	63
3	砥石作業面性状による砥石の研削寿命の定量的基準	65
3-1	砥石作業面性状と砥石の研削寿命	65
3-2	砥石作業面性状からみた研削焼けの熱的解析	71
3-2-1	切れ刃にかかる平均研削抵抗	71
3-2-2	切れ刃面積率と研削焼け	79
3-3	砥石の目直し間寿命の数式化	85
4	砥石作業面性状と仕上面あらさ	86
5	結 論	92

第 5 章	特殊目直し法による砥石の研削寿命の向上	95
1	緒 言	95
2	ドレッサー回転目直し法	95
2-1	実験装置および方法	95
2-1-1	ドレッサー回転目直し装置	95
2-1-2	実験方法	98
2-2	ドレッサー回転目直し装置で目直しを施した砥石の 連続切れ刃間隔と切れ刃面積率	100
2-3	ドレッサー回転目直し装置で目直しを施した砥石の 研削性能	101
3	振動目直し法	105
3-1	振動目直し装置と切れ刃の分布および形状の調節概念	105
3-2	実験方法	109
3-3	振動目直しされた砥石の切れ刃分布	109
3-4	研削過程における切れ刃の挙動	112
3-5	切れ刃の分布と砥石の研削性能	115
4	結 論	119
第 6 章	総 括	121
	結 言	126

第 1 章 序 章

近年、機械加工の自動化が急速に普及し、高精度が要求される研削加工においても数値制御の研削盤がみられるようになり、研削作業の省力化ならびに高精度化を目標として著しい発展を遂げつつある。これに対して、研削作業条件もより合理的な研削作業を行なうために、現状の経験的設定から研削現象を考えた理論的設定への移行が切望されている。

研削作業条件は砥石の種類、目直し条件、雰囲気、研削盤の作動条件等によって規定され、合理的な研削作業を行なうためには、これらの組み合わせを最適なものにし、目直し間寿命を最も長くすればよい。しかし、砥石だけをとってみてもその種類は非常に多数あり、仕上面あらさ、研削焼けなどの寿命判定基準の異なる各作業目的に対して研削作業条件を最適にすることは容易ではない。このため、研削作業条件は経験的ないしは経験的判断による二・三の予備実験の資料でもって決定されているのが現状である。

ところで、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、砥石作業面附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なわれる。また、砥石の研削性能の劣化は、津和¹⁾、J. Peklenik²⁾、吉川³⁾らによれば研削することによって砥石作業面性状が変化するために生じる。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、最適作業条件の理論的設定は可能である。

これらに関連する従来の研究を概観すると、目直し条件と切れ刃密度の関係⁴⁾、目直し切れ刃の表面形態⁵⁾、⁶⁾研削による切れ刃の挙動⁷⁾～¹⁰⁾、砥粒の破壊強度¹¹⁾、¹²⁾、切れ刃密度と仕上面あらさの関係¹³⁾、切れ刃面積率と寿命時の研削抵抗の関係¹⁴⁾などが調べられている。このような多くの研究が行なわれているが、これらの資料を使用して最適研削作業条件を理論的に設定することはまだ困難である。この理由としては幾つか考えられるが、目直し条件と目直し直後の砥石作業面性状の関係ならびに研削による砥石作業面性状の変化に及ぼす目直し条件の影響など目直しに関する定量的な解析が行なわれていないことに帰因する。したがって、最適研削作業条件を理論的に設定するためには、目直しによって形成される砥石作業面性状と研削によるその変化を定量化することが急務である。

そこで、本研究では最適研削作業条件の理論的設定方法の確立をめざし、通常良く使用される単一ダイヤモンドドレッサーで目直しをする場合の目直し条件と砥石の研削性能の関係を砥石作業面性状の観点から定量的に究明した。また、その結果を用いて砥石の研削性能を向上させ得る目直し方法の開発を試みた。

まず、第2章においては、研削初期に砥石の損耗が非常に大きいことから、この非定常領域における切れ刃の挙動を究明するために、目直し切れ刃の性状の詳細な観察および非定常領域における切れ刃の変化の追跡を行ない、切れ刃の過渡的挙動を明らかにしている。さらに、切れ刃の過渡的挙動が研削特性に及ぼす影響を調べている^{5)～17)}。

次に、第3章においては、目直し過程における切れ刃分布および切れ刃面積率を測定することによって、目直し条件と目直し直後の砥石作業面性状の一般的関係を作成することを試みた。また、目直し直後から研削焼け以後の研削過程までの切れ刃分布および切れ刃面積率と砥石半径減耗量を対応させ、切れ刃

の幾何学形状の模型を作成し、研削による砥石作業面性状の時間的推移を数式化している^{18) 19)}。

さらに、第4章では、砥石作業面性状と研削抵抗、研削焼け、仕上面あらさとの関係を実験的に明らかにし、第3章までの結果を用いて、砥石の研削性能の定量化を試みている^{20)~22)}。

第5章では、第4章までに明らかになった結果を用いて、砥石の研削寿命の向上を可能にさせ得る二種類の特殊な目直し装置を考案し、その装置で目直しを施した砥石の寿命試験を行なうとともに、切れ刃の挙動を調べ、二種類の特殊目直し装置の有用性を明らかにしている^{23)~25)}。

参 考 文 献

- 1) 津和：精密機械，26-4 (1960) 199
27-6 (1961) 409
27-6 (1961) 414
- 2) J. Peklenik：Industrie-Anzeiger, Nr. 27, 4 (1958) 27
- 3) 吉川：精密機械，30-1 (1964) 112
- 4) 鈴木・高橋：精密機械，30-4 (1964) 32
- 5) 横川：応用機械工学，9月 (1960)
- 6) 田中・津和・河村：精密機械，30-10 (1964) 809
- 7) 塩崎：マシンリー，20-6 (1952) 723
- 8) 津和：精密機械，27-11 (1961) 719
- 9) 武野・長岡：精密機械，30-1 (1964) 38
- 10) 田中・津和・河村：精密機械，31-5 (1965) 397
- 11) 吉川・佐田：精密機械，26 (1960) 476
- 12) 高沢：機械工作，9-51 (1962) 75
- 13) 例えば、織岡：機械学会誌，63-449 (1960) 1185
- 14) 吉川：機械学会論文集，28 (1962) 655
- 15) 津和・安井：研摩布紙加工，8-4 (1971) 74
- 16) 津和・安井：昭和46年度精機学会秋季学術講演会前刷集，
(昭46年11月)
- 17) H. Tsuwa, H. Yasui：Proceeding of International Grinding
Conference, April 18 (1972)
- 18) 安井・津和：昭和47年度精機学会関西支部講演会前刷集，
(昭47年7月)

- 19) 安井・津和：昭和47年度精機学会関西支部講演会前刷集，
(昭47年7月)
- 20) 津和・安井：昭和45年度精機学会春季学術講演会前刷集，
(昭45年4月)
- 21) 津和・東・安井：昭和46年度精機学会秋季学術講演会前刷集，
(昭46年11月)
- 22) 津和・安井：昭和43年度精機学会秋季学術講演会前刷集，
(昭43年10月)
- 23) 津和・田部・安井：精密機械，36-11(1970)745
- 24) H.Tsuwa, S.Tanabe, H.Yasui : Technol.Repts,
Osaka Univ.,20.969(1970)
- 25) 津和・安井・中園：昭和45年度精機学会春季学術講演会前刷集，
(昭45年4月)

第 2 章 目直し切れ刃の脆弱層とその過渡的挙動

1 緒 言

研削過程における砥石作業面性状の時間的推移は目直しによって形成された砥石作業面性状を初期状態とし、研削初期の砥石の非定常損耗領域における過渡的变化を経て、砥石の定常損耗領域では切れ刃の摩耗となんらかの対応関係をもって変化し、砥石の寿命とされる砥石作業面性状に至ると考えられる。従来、これらの各過程の中で、非定常損耗領域を除く各過程については研究がなされているが、非定常損耗領域についての研究はほとんどなされていない。

すなわち、初期状態については、切れ刃の分布が目直しの運動条件に影響されること¹⁾や目直し切れ刃のほとんどが微小凹凸面で構成され、一部に平坦な切れ刃が存在すること²⁾などが報告されている。定常損耗領域については多くの報告があるが³⁾とくに、津和は⁴⁾光切断法を応用した切れ刃観測装置によって切れ刃の挙動を詳細に研究し、切れ刃の摩耗が砥石の研削性能と密接な関係をもつことを示し、切れ刃の摩耗を統計的に取り扱うための切れ刃面積率を定義している。また、寿命については、吉川が切れ刃面積率がある一定値に達すると研削抵抗が切れ刃面積率のわずかな増加によって急上昇することから、この一定値を砥石の寿命と提案している⁵⁾。

これらの研究に対して、砥石の非定常損耗領域における切れ刃の挙動に関する研究はほとんど行なわれていないが、この領域においては砥石の損耗が非常に大きく、切れ刃の破壊ないしは摩耗がしやすく、切れ刃が脆弱性をもち、不安定な状態にあり、切れ刃の分布や形状が大きく変化すると考えられる。それゆえ、目直し直後から寿命までの切れ刃の分布および形状の時間的推移を明らかにし、砥石の研削性能を定量的に把握するためには、切れ刃の過渡的挙動が

究明されねばならない。また、この領域における切れ刃が不安定であるということは、目直し直後の切れ刃が不安定であるということになり、目直し機構を究明するうえにおいても、切れ刃の過渡的挙動を明らかにすることは必要である。

そこで、本章においては、目直し切れ刃の脆弱性を考慮すればレプリカなどの間接法による切れ刃の観察では切れ刃の表面状態が変化することを考え、直接数種の顕微鏡を使用し、目直し切れ刃を詳細に観察し、その過渡的挙動を追跡、究明した。また、目直し切れ刃の過渡的挙動が研削特性に及ぼす影響も調べた。

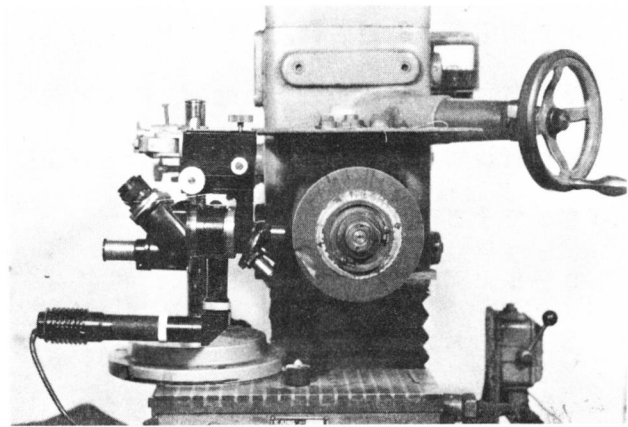


図 2 - 1 切れ刃観察装置

2 実験装置および方法

2 - 1 顕微鏡

目直し切れ刃を直接的かつ詳細に観察するために実体顕微鏡、微分干渉顕微鏡および走査型電子顕微鏡を使用した。実体顕微鏡は切れ刃の概要を観察するために用い、切れ刃の詳細な観察には、

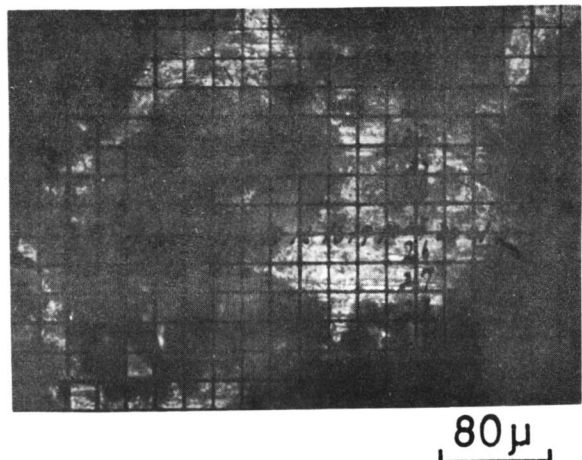


図 2 - 2 切れ刃測定例

主に微分干渉顕微鏡を使用した。微分干渉顕微鏡を使用したのは切れ刃の凹凸が明確にわかることと、目直し切れ刃が容易に色別し得るためである。これらの顕微鏡による切れ刃の観察方法は図 2-1 に示す通りである。顕微鏡を保持具に取り付け、平面研削盤の上に置き、電磁チャックで固定させ観察する方法である。なお、微分干渉顕微鏡では切れ刃面積率も測定した。この測定方法は顕微鏡の接眼レンズの中に格子を撮影した反転フィルムを入れ、その格子の中心を通る切れ刃の長さを測定する方法で、図 2-2 にその測定例を示す。

走査型電子顕微鏡は目直し切れ刃の表面構造を調べるために必要な高倍率の観察の際に使用した。以上の他に、従来の結果を検討するために、レプリカ法でも目直し切れ刃を観察したが、この場合には、レプリカに対して精度の高い観察ができる位相差顕微鏡を使用した。

2-2 実験方法

本実験において使用した目直し条件以外の実験条件を表 2-1 に示す。なお、砥石作業面上の目直し切れ刃と比較するために単粒を使用した。単粒の目直しはアルミニウム円

板上に砥粒を取り付

けて行なった。目直

し条件はダイヤモンド

ド Dresser 先端摩

耗幅（以下、Dresser

先端幅と述べる）

$20\mu\sim 1.2mm$ 、Dresser

送り $20\mu/\text{rev}$

$\sim 360\mu/\text{rev}$ 、Dresser

表 2-1 実験条件

砥石	A46M8V, WA46M8V
砥石周速	1900m/min
テーブル送り	8m/min
被削材	SK3 ($R_c \approx 60$)
研削方式	乾式フランチカット
Dresser	単石ダイヤモンド Dresser

ッサー切り込み $10\mu\sim 50\mu$ の範囲で、一般的には、ドレッサー先端幅がドレッサー送りよりも大きい条件で目直しを行なった。

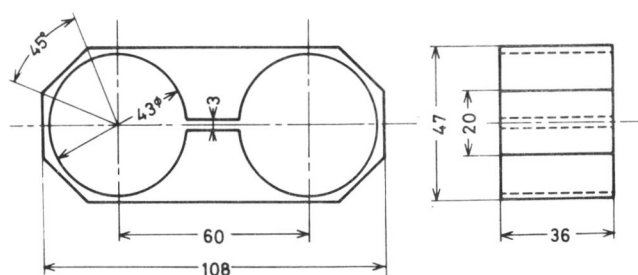


図 2 - 3 研削抵抗測定装置

研削抵抗は八角リングを使用して測定した。八角リングの諸寸法を図 2 - 3 に示す。

3 目直し切れ刃の表面形態

3 - 1 目直し直後の砥石作業面性状

目直し直後と砥石の寿命時における砥石作業面を比較して図 2 - 4 に示す。ただし、(a)は目直し直後の切れ刃を概略的に知るために乱反射光によって観察したもので、(b)は目直し直後と同一の砥石作業面を正反射法で観察したものである。目直し直後の砥石作業面は牧

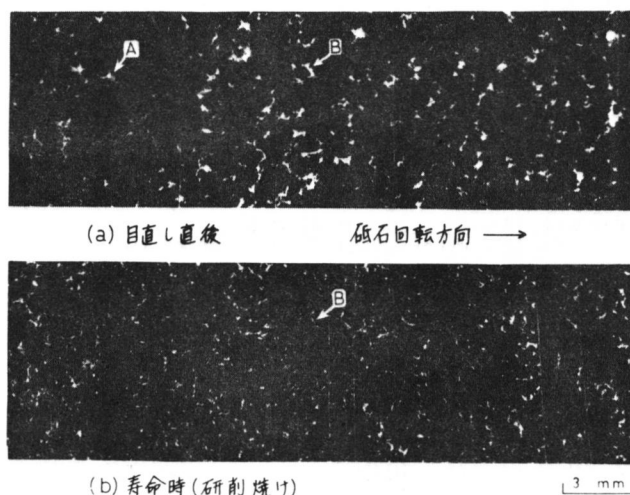


図 2 - 4 目直し直後と寿命時の砥石作業面の比較

野⁶⁾が報告しているように白濁色の表面をもつ砥粒によって形成されている。そして、白濁色表面の大きさは(b)に示した寿命時における切れ刃の大きさと比較

すれば同等以上のものである。また、定性的にみて、目直し直後の白濁色部をもつ砥粒の分布は寿命時における切れ刃分布と大差ないことが図2-4よりわかる。したがって、白濁色部をもつ砥粒は目直し切れ刃であり、この目直し切れ刃の巨視的輪郭は矢印Bに示されるように寿命時の切れ刃と似ている。図2-5は図2-4(a)における矢印Aの目直し切れ刃を拡大したもので

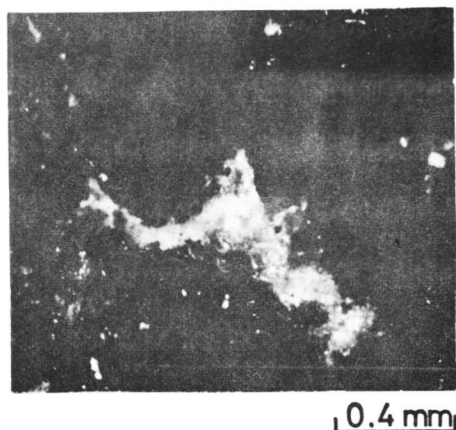


図2-5 乱反射光による目直し切れ刃の表面観察

あるが、表面に流動した平坦そうな形態が観察され、目直し切れ刃の表面形態が巨視的には平坦であるという従来の報告⁴⁾と一致しているように思われる。

目直しによる砥石作業面の形成機構はドレッサーによる砥粒の脆性破壊、または、脱落である。脆性破壊は砥粒の破壊の形態から、図2-6に示すように切削、一部欠損、欠損に分類されており、前述の平坦そうな目直し切れ刃は切削ないしは一部欠損の砥粒である。それゆえ、目直し条件による砥粒の挙動の変化と砥石作業面の表面状態は密接な関係をもつ。図2-7に目直し条件による砥粒の破壊および脱落形態の変化を示す。これらの変化については、田中²⁾らによっても報告されているが、その報告では同一砥粒の破壊および脱落の形態に及ぼす目直し条件の影響を

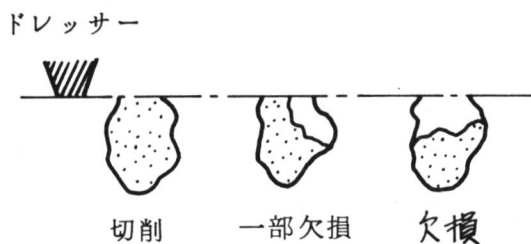


図2-6 目直しによる砥粒の破碎形態の違い

調べたもので、主として、同一砥粒の破壊および脱落機構に重点が置かれている。そこで本研究は新出砥粒の破壊および脱落をも含めて、砥石作業面の形成に及ぼす目直し条件の影響を調べたものである。ドレッサー切り込みが 10μ の場合には送りの影響による破壊形態の割合に変化が認められるが、ドレッサー切り込みが大きくなるとドレッサー送りにはあまり影響されない。しかし、

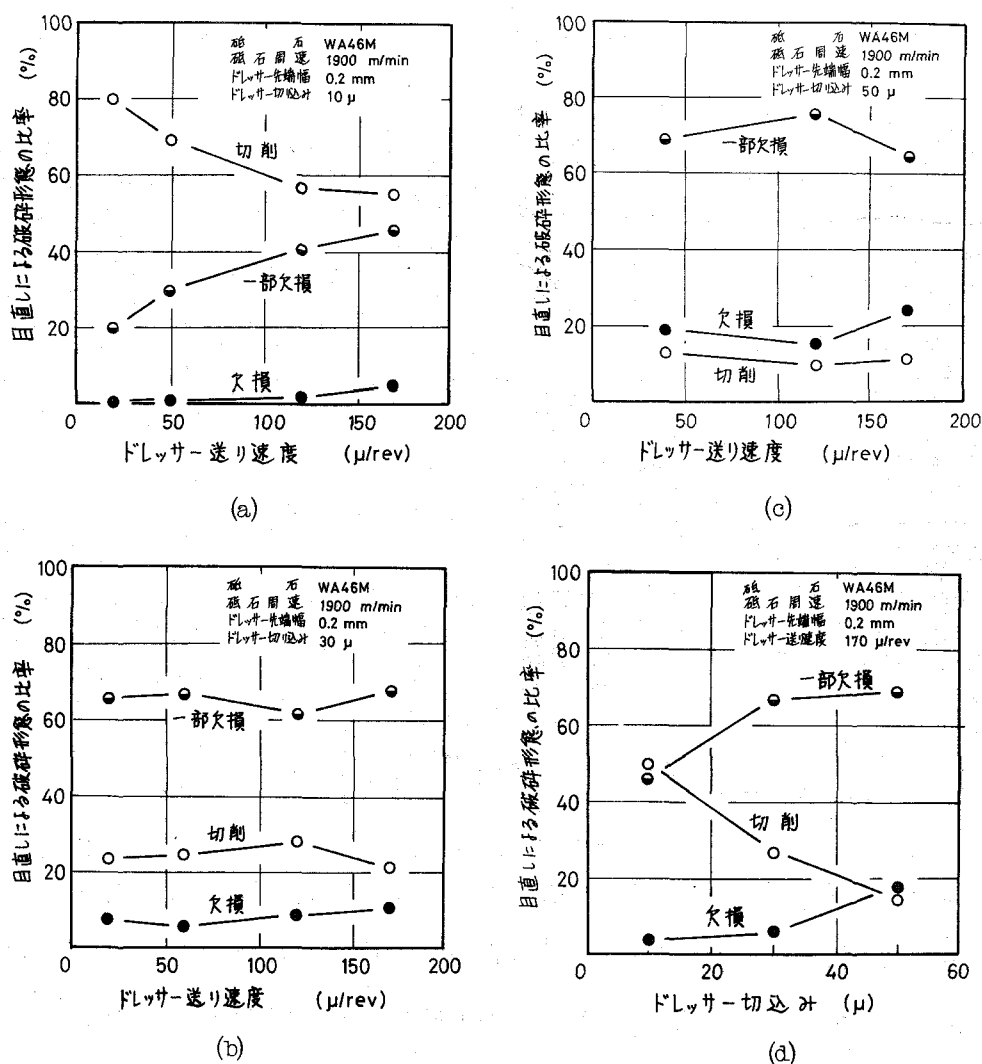


図 2-7 目直し条件による砥粒の破砕形態の変化

ドレッサー切り込みが大きくなると切削の砥粒は非常に減少し、欠損する砥粒が増加する。このように、ドレッサー切り込みや送りによって砥粒の挙動は変化するが、総体的には一部欠損の砥粒が多い。これらの結果から判断すると砥石作業面上の切れ刃の分布や形状はドレッサー切り込みや送りが増加することによって減少および鋭利になることが言え、転写法による従来の結果と一致する。

3-2 目直し切れ刃の平坦性

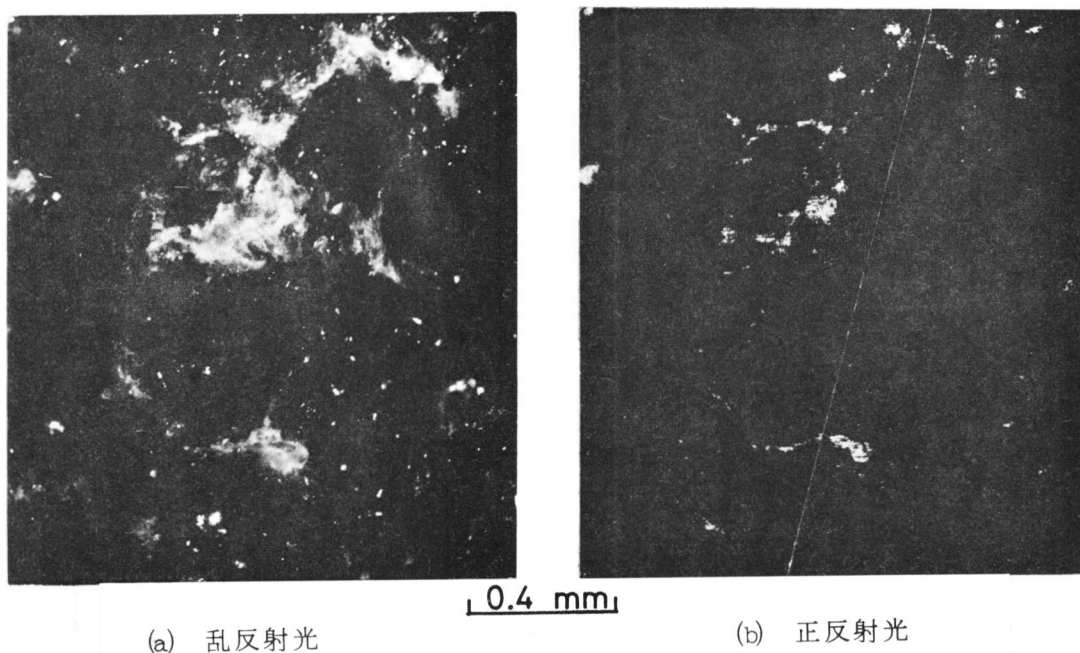


図 2-8 目直し切れ刃の平坦性

目直し切れ刃の表面形態は巨視的には平坦であり、微視的には微小凹凸面であると、従来、報告されている²⁾。直接観察によっても、巨視的には平坦らしいことが前項で認められた。しかし、前項の観察は乱反射光による観察であったので、その平坦度を明らかにすることができなかった。図 2-8 は正反射光を

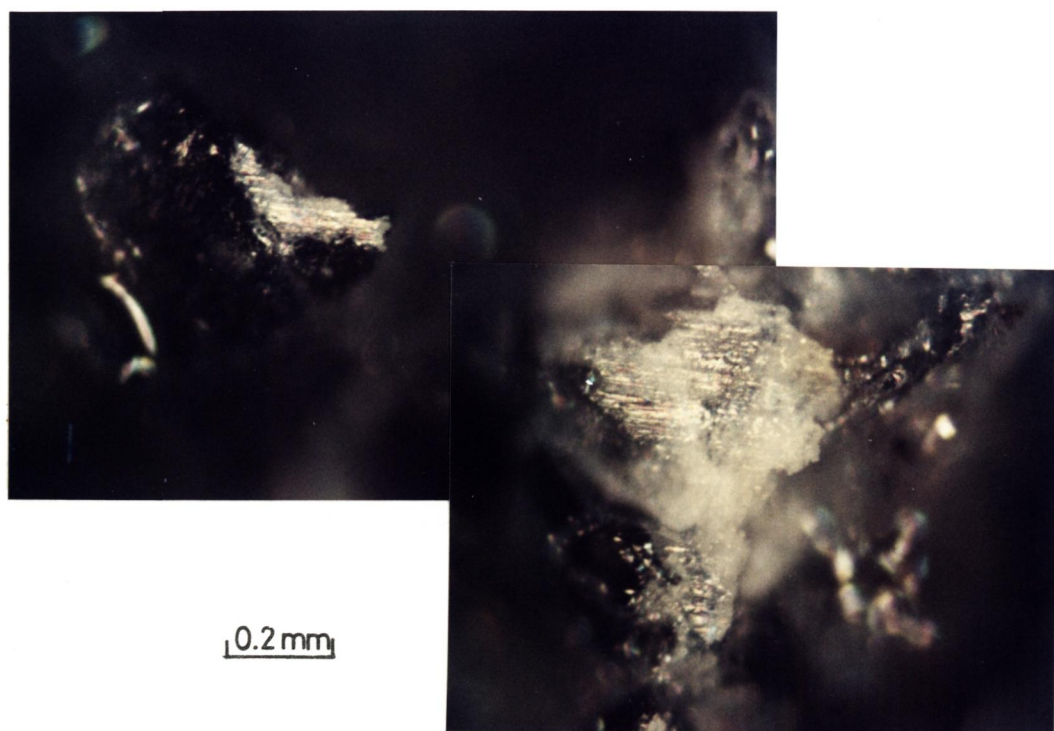


図 2 - 9 目直し切れ刃の表面性状

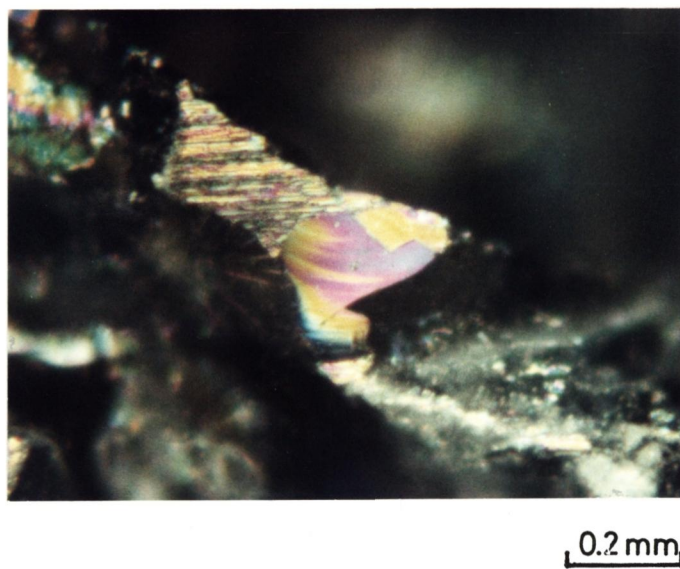


図 2 - 10 破砕面がみられる特殊な目直し切れ刃
(1 3)

用いてその平坦度を調べたもので、(a)は乱反射光、(b)は正反射光の場合である。(b)の結果より、白濁色部の一部に条痕が観察され、表面の一部がかなり平坦であることがわかる。また、条痕部以外は乱反射する（写真では黒くなる）ことから、(a)の白濁色部全域が必ずしも平坦でないことがわかる。

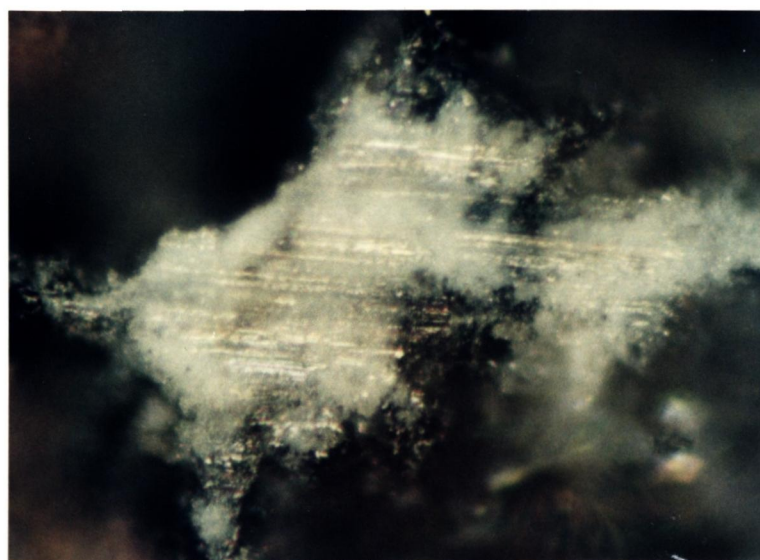
目直し切れ刃の表面形態を微分干渉顕微鏡で微視的に観察した結果を図2-9、図2-10に示す。図2-9はA46M8Vの砥石をドレッサー切り込み 30μ 、ドレッサー送り $270\mu/\text{rev}$ 、ドレッサー先端幅 0.4 mm の比較的荒い目直し条件で目直しを施したものであるが、低倍率で観察された結果と同じように、切れ刃の表面には条痕が観察される。条痕は明確に観察される部分と不明確な部分にわかれ、後者は、なんらかの機械的結合力はあるが、化学的な結合はしておらず微小砥粒から形成されているように観察される。ここで、表面の色は砥粒特有の色ではなく、微分干渉によって生じたものである。図2-10はドレッサー切り込み 50μ 、ドレッサー送り $170\mu/\text{rev}$ 、ドレッサー先端幅 0.4 mm で目直しを数回繰返した非常に荒い目直しの場合に観察された切れ刃の表面を示すものである。条痕と同時に破砕面がはっきりと観察される。このような破砕面は非常に目直しの荒い場合にのみ観察され、一般的には、図2-9の場合のように切れ刃全面が条痕によって占められていることが多い。いずれにしても、切れ刃表面には条痕が観察されるが、この条痕の平坦度は 1μ 以下（触針式あらさ計の標準片を利用して、顕微鏡の焦点深度が約 1μ であることを確かめ、その焦点深度を使用して調べた結果による）であり、切れ刃が摩耗した場合に生じる条痕あらさ（約 1μ ）よりも小さい。

条痕をもつ平坦な切れ刃は上述の実験条件だけではなく、ドレッサー先端幅 $20\mu\sim 1.2\text{ mm}$ 、ドレッサー切り込み $10\mu\sim 50\mu$ 、ドレッサー送り $20\mu/\text{rev}\sim 360\mu/\text{rev}$ の範囲でドレッサー先端幅がドレッサー送りよりも大きい目直

し条件で目直しをした砥石の切れ刃にもみられた。また、これらの実験はドレッサー送りよりもドレッサー先端幅が大きいために、ドレッサーが砥粒に重複して接触することによって条痕が生じる可能性も考えられたので、ドレッサー先端幅 20μ 、ドレッサー切り込み約 30μ の目直し条件で非常に摩耗した砥石にネジ切り状の目直しを施したが、やはり、目直し切れ刃表面上には条痕が観察された。

以上は乾式目直しの場合で湿式の場合には詳細には検討していないが、目直しをする際に研削盤に附属している研削油剤給油装置のバルブを全開にして、エマルジョン型の研削油剤をかけたが、A46M8V砥石の作業面上には平坦な条痕をもつ切れ刃が多数観察された。

ところで、このような平坦な表面をもつ目直し切れ刃は、従来のレプリカ観



0.1 mm

図 2 - 11 目直しされた単粒の表面性状

察の結果によると、結合剤切れ刃に多く見られることが報告されている²⁾。図2-11に図2-9と同じ目直し条件で目直しを施した場合のA砥粒の表面を示す。目直しされたA砥粒の表面にも砥石作業面上の切れ刃と同様に条痕が観察され、平坦で条痕をもつ切れ刃が結合剤でないことがわかる。とくに、不明確な条痕は結合剤と良く似ているが、A砥粒表面上にも観察され、不明確な部分も結合剤でないことを明らかにしている。以上A砥石およびA砥粒の場合について、目直し切れ刃が平坦で条痕をもつことを示したが、その他にも、WA 46M8V砥石やWA、C、GCおよびSA砥粒の場合にも同様に観察され、従来、レプリカによる間接的観察によって報告されている微小凹凸面をもつ切れ刃²⁾は全く観察されなかった。これらの結果、単一ダイヤモンドドレッサーによって目直しを施された砥石の目直し切れ刃は条痕をもつ平坦な表面形態をしているといえる。

4 目直し切れ刃の脆弱層

4-1 目直し切れ刃の立体的観察

目直し直後の切れ刃表面は条痕をもつ平坦な面であることがわかったが、実体顕微鏡で観察すると白濁しており、砥材と異った性質のものに見受けられた。そこで、切れ刃の側面も観察し得る砥石側面の幾つかの砥粒を選んで、切れ刃の側面からも観察してみた。その例を図2-12(a)に示す。切れ刃側面観察結果からもわかるように、切れ刃の表面形態は平坦であるが、その平坦を有する切れ刃の表面層は白濁色を呈し、砥粒の母材とは異っている。この結果から、砥粒の表面層はドレッサーによって変質させられていることがわかり、その強度は母材と比較して弱くなっていることが考えられる。

目直し切れ刃表面層の機械的強度を定性的に把握するために、木片

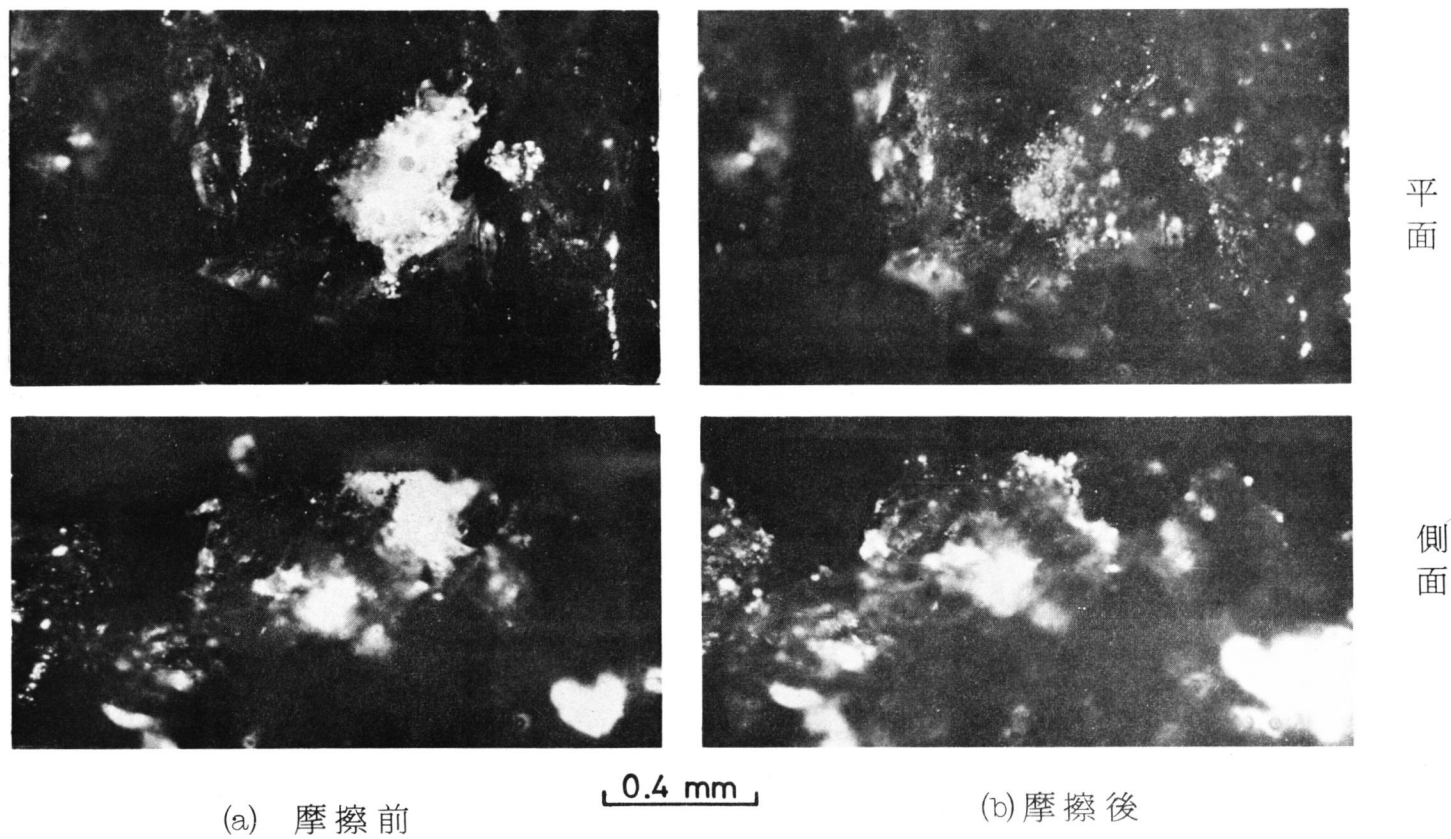


図 2 - 12 目直し切れ刃の立体的観察

とナイロンブラシで切れ刃の表面を摩擦した結果を図2-12(b)に示す。図より表面層は木片とナイロンブラシによって容易に除去され、その下層面に微小凹凸面らしき表面をもつ鋭い形状の砥粒が顕出していることがわかる。この結果は、目直し切れ刃が非常に脆弱であることを示し、研削に耐え得るかどうかは疑問であることを示唆する。また、このような脆弱層は従来見い出されておらず、従来の転写法や触針法による目直し切れ刃の分布測定にも何らかの影響を及ぼしていたものと考えられる。というのは、目直し切れ刃が非常に脆弱なため、転写法や触針法で切れ刃分布を測定する際の荷重によって切れ刃の表面が変化し、測定に誤差を与えることが考えられるためである。図2-13は研削過程における砥石作業面上の切れ刃の高さ方向の分布を触針法で測定（荷重0.2g）したものであるが、目直し直後の高さ方向の切れ刃分布だけは非常にばらついている⁷⁾。

これは、目直し

切れ刃が平坦で

あることを考え

ればおかしく、

脆弱層が影響し

ているものと考え

えられる。した

がって、目直し

直後の切れ刃の高さ方向の分布測定は触針法では困難であると考えられる。

4-2 脆弱層の構造

条痕をもつ平坦な目直し切れ刃の表面構造を調べるために、ドレッサー先端幅20 μ 、ドレッサー送り100 μ /rev、ドレッサー切り込み50 μ の目直し条件でWA単粒にネジ切り状の目直しを施した後、走査型電子顕微鏡で砥粒の

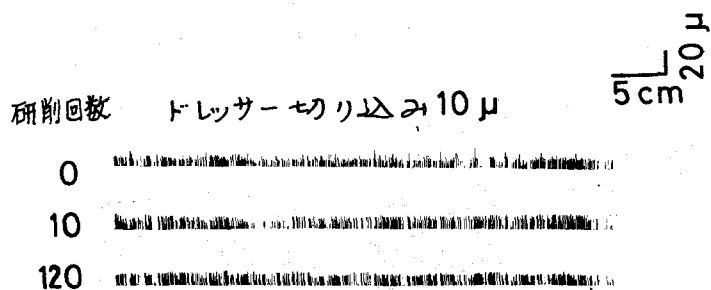
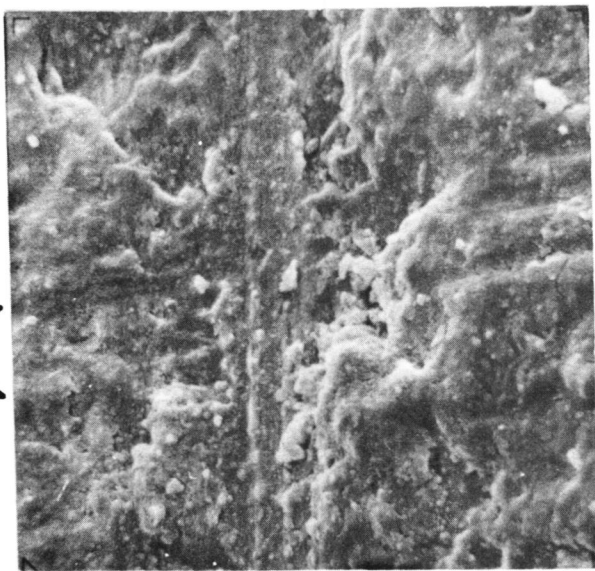


図2-13 触針法による切れ刃分布の測定例

(6 1)

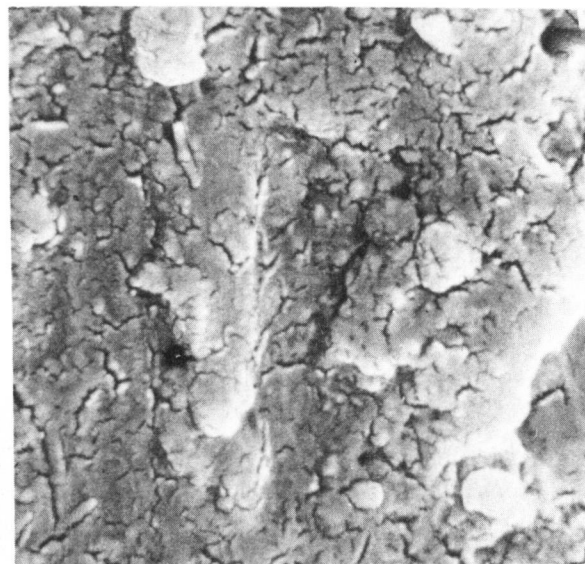
触針

ドレッサー



20 μ

(a)



2 μ

(b)

図 2 - 1 4 走査型電子顕微鏡による目直し切れ刃の
微視的観察

(a) ドレッサーによる目直し条痕

(b) 条痕内部の微視的構造

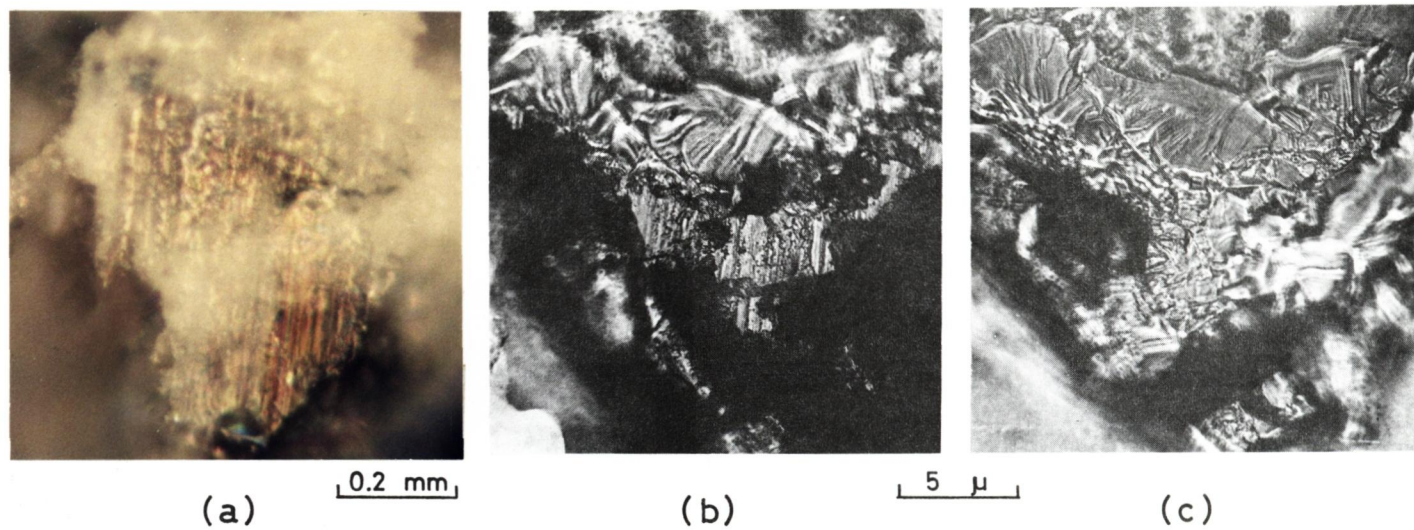


図 2 - 1 5 レプリカによる目直し切れ刃の表面変化

(a)直接観察 (b)1回目のレプリカ (c)5回目のレプリカ

表面を観察した結果を図 2-14 に示す。(a) は砥粒表面を低倍率で観察した結果である。二本の条痕が観察されるが、その一つはドレッサー条痕であり、他は触針式仕上面あらさ機のダイヤモンド触針 (0.5 g) によって目直し後に付けられたものである。脆弱層は 0.5 g という非常に軽い荷重しかかけられていないダイヤモンド触針によって変形し、目直し切れ刃の高さ分布の触針法による測定は非常に困難であることを示している。(b) は(a) のドレッサー条痕の中心部を高倍率で観察したものであるが、ドレッサー条痕内部には多数の微小亀裂が観察され、目直し切れ刃の機械的強度が弱い理由を明らかにしている。

以上の目直し切れ刃の脆弱性を考えれば、従来のレプリカ観察による目直し切れ刃の表面形態が微小凹凸面であるという報告と本実験の結果とは矛盾しなくなる。図 2-15 は目直し切れ刃の直接観察とレプリカによる間接観察を比較したものである。(a) は直接観察、(b) は同じ切れ刃の第 1 回目のレプリカで観察、(c) は同じく 5 回目で観察した結果である。第 1 回のレプリカによる観察ですでに直接観察した結果とは異っており、レプリカ法の場合では条痕部の面積が著るしく減少している。多数の切れ刃について同じ試みをしたが、条痕部の面積の減少は同じく著るしかった。条痕部の面積が減少する理由はレプリカを取る際に、前述した機械的結合はしているが化学的な結合はしていないように観察される部分が酢

酸メチルで押し流されるためと考えられる。第 1 回目のレプリカでは黒色部が非常に広い範囲にわたって観察されるが、

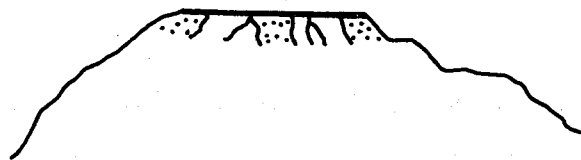


図 2-16 目直し切れ刃の表面構造

この黒色部はレプリカに微少な砥粒が附着し（反射顕微鏡でレプリカの裏面を観察すればみられる。）光を通さないために生じたもので、上述の推定を裏付けるものである。次に、第1回目のレプリカで消えなかった条痕部もレプリカ作業を繰り返えすと第5回目のように条痕が完全に除去され、微小凹凸面がその下層部から顕出してくる。一般に、レプリカを採取する場合には清浄なレプリカを得るために、数回のレプリカ作業を行なうのが普通であるから、前述したように、レプリカによる観察では目直し切れ刃の表面形態が微小凹凸面であっても矛盾しない。

以上の結果から、図2-16に模型的に示すように目直し切れ刃の表面構造は微小砥粒によって形成されているような非常に弱い部分と少し強度はあるが研削に耐え得る程の強度はもたない微小亀裂によって形成されている部分をもつ脆弱層で構成されていることがわかる。

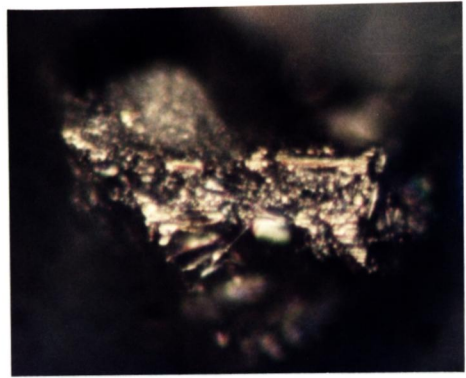
5 研削初期における切れ刃の過渡的挙動

5-1 研削過程における切れ刃表面形態の変化

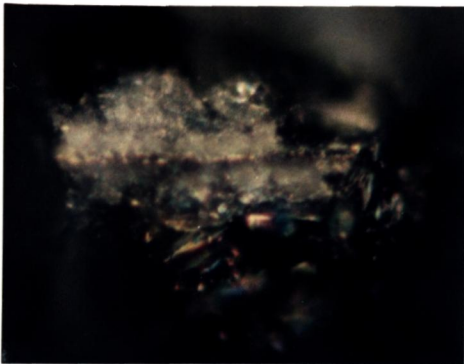
目直し切れ刃の表面形態および表面構造が明らかになったので、次に、それらの性状をもつ目直し切れ刃が研削によってどのように変化するかを調べた。図2-17は同一切れ刃の研削過程における変化を追跡したものである。研削長0.5 mでは目直し直後と同じように観察されるしかし、詳細に検討すると、表面脆弱層よりも下の部分に観察される破砕面が目直し直後には顕微鏡の焦点深度内に入らずぼけているが、0.5 mでははっきりと観察される。また、研削長0.5 mの方が目直し直後よりも白濁色の濃さが薄くなり、目直し直後にははっきりと観察された切削溝のような条痕が研削長0.5 mでは不明確になっている。このような結果は、脆弱層が研削することによってすぐに除去されるものではな



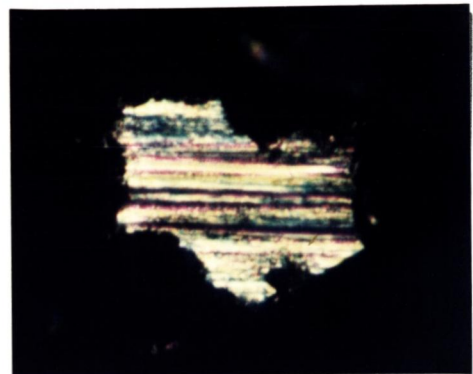
(a) 目直し直後



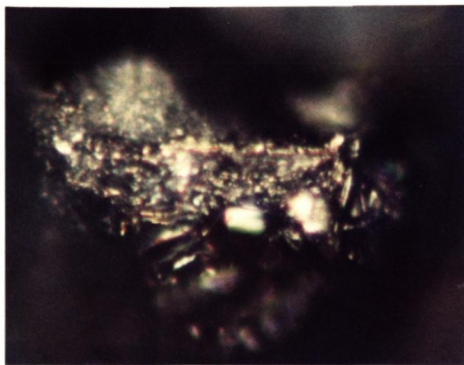
(d) 研削長 15 *m*



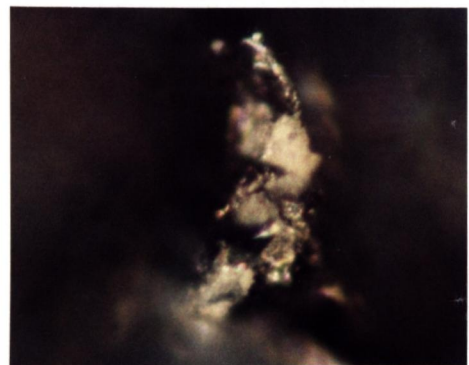
(b) 研削長 0.5 *m*



(e) 研削長 85 *m*



(c) 研削長 3 *m*



(f) 再目直し

図 2 - 17 研削による切れ刃表面形態の変化

く、研削によって徐々にとれていくことを示す。このことは、脆弱層が微小砥粒ないしは多数の微小亀裂によって構成されているという図2-16の目直し切れ刃のモデルの妥当性を裏づけるものである。

次に、研削長 3 m においては白濁色脆弱層はほとんど除去され、図2-15で述べた微小凹凸面が観察される。また、一部には摩耗した痕跡（黄色の部分）が認められる。ただし、白濁色脆弱層が除去される研削長は図においては 3 m 附近と考えられるが、幾つかの切れ刃を追跡したところ、研削初期過程で脆弱層が除去されることは明らかであるけれども、その研削長はかなりばらついている。研削長 15 m では、研削によって微小凹凸面が摩耗し、摩耗条痕が明確に観察される。さらに、研削長 85 m では切れ刃は完全に摩耗し、切れ刃表面が摩耗条痕でおおわれ、切

れ刃としても寿命になる。そして、 85 m の摩耗した切れ刃を目直しすると、切れ刃は大きな破壊をするが、一部には平坦な白濁色の部分が残されている（従来の分類では一部欠損）。この白濁色平坦部は、研削すると上述の変化をする。

以上の結果により、目直し切れ刃の表面形態の研削過程における変化を模型的に表わすと、図2-18のようにな

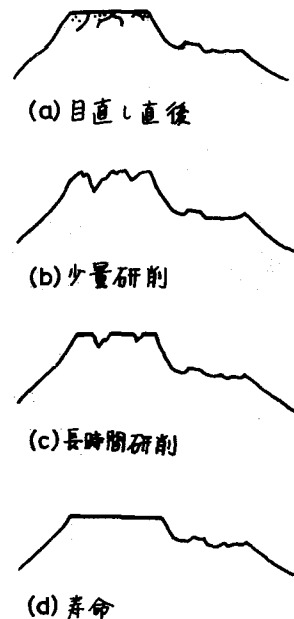


図2-18 研削による切れ刃表面の変化模型

る。すなわち、まず、目直しによって条痕をもつ平坦な表面形態の脆弱な切れ刃が生成される。そして、研削初期に脆弱層が除去され微小凹凸面が切れ刃表面に現われる。その後、研削過程が進むにつれて、微小凹凸面が摩耗し、摩耗条痕が観察されるようになる。ある程度研削過程が進むと切れ刃全面が摩耗し、平坦化し、切れ刃としての性能が劣化する。そこで、目直しを行なうと、また、前述の目直し切れ刃になる。

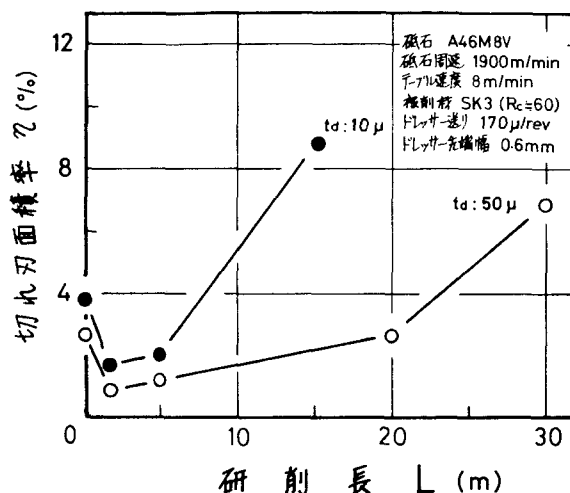


図 2-19 研削過程における研削抵抗の変化

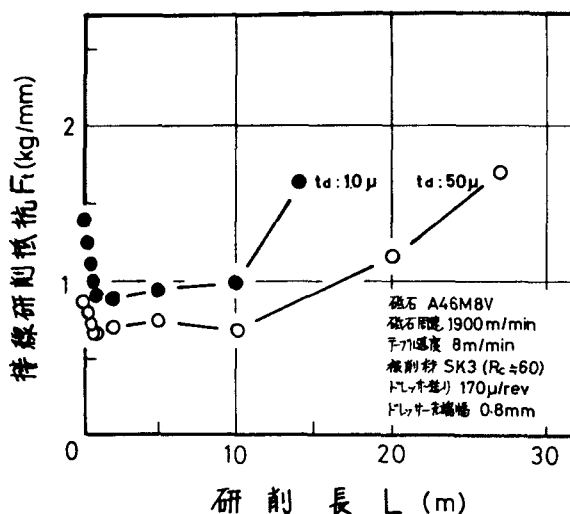


図 2-20 研削過程における切れ刃面積率の変化

5-2 研削特性に及ぼす脆弱層の影響

研削過程における研削抵抗の変化を図2-19に示す。研削抵抗は目直し直後において高く、研削初期には研削過程とともに減少する。そして、研削長 $2m$ 附近で極小値を示し、その後は研削過程とともに徐々に増加し、ある研削長附近から急激に増加する傾向を示す。研削抵抗が研削初期に減少しているのは、工作物表面上の温度が低く、切削するための力が大きくなることも考えられるが、主に、切れ刃の過渡的挙動が影響しているのではないかと考えられる。図2-20に研削過程における切れ刃面積率の変化を示すが、研削初期に一度減少し、その後、研削過程が進むにつれて増加しており、図2-19の研削抵抗の変化と対応している。したがって、脆弱層が研削初期の研削抵抗に大きな影響を及ぼすと考えerことは妥当であると思われる。

6 結 論

目直し切れ刃の脆弱性を考え、数種類の顕微鏡を用いて切れ刃を直接観察することによって、目直し切れ刃の表面形態および表面構造を究明するとともに研削初期における切れ刃の過渡的挙動を追跡、観察した結果、以下の事柄が明らかになった。

- 1) 目直しされた砥粒の表面は白濁色をしており、その白濁色面積は同じ砥粒の寿命時における切れ刃逃げ面と比較すると同等以上である。そして、白濁色表面の一部が切れ刃として観察される。また、目直しされた砥粒数と寿命時の切れ刃数はほぼ一致する。
- 2) 目直しによる砥粒の破壊の大きさおよび脱落はドレッサー切り込みが増加するとふえる。また、ドレッサー切り込みが小さい範囲では、ドレッサー送りを速くするとともに増加するが、ドレッサー切り込みが

大きくなると送りの影響は少なくなる。

- 3) 乾式、湿式の目直しにかかわらず、砥石および砥粒を目直した際に生成される切れ刃の表面形態は条痕をもつ平坦な面である。すなわち、従来報告されている微小凹凸面は観察されない。
- 4) 目直し切れ刃の表面層には微小亀裂および機械的に保持されていると思われる微小砥粒が観察される。それゆえ、表面層は非常に脆弱であり、触針式仕上面あらさ機のダイヤモンド触針を走査させても変形する。
- 5) 従来報告されている微小凹凸面はこの脆弱層の下に存在し、レプリカ観察ではこの脆弱層が除去されるために、微小凹凸面が観察し得るようになる。
- 6) 研削過程における目直し切れ刃の表面形態は研削初期に脆弱層が徐々に取りさられ、微小凹凸面が顕出し、その後、研削過程が進むにつれて摩耗するという変化をする。
- 7) 研削過程における研削抵抗の変化は研削初期に高く、ある研削過程まで減少し、その後、徐々に増加する傾向をもつ。切れ刃面積率も同じような変化を示す。したがって、研削初期に研削抵抗が高いのはなんらかの意味で脆弱層が影響している可能性が非常に強い。

参 考 文 献

- 1) 鈴木・高橋：精密機械，30-4 (1964) 32
- 2) 田中・津和・河村：精密機械，30-10 (1964) 809
- 3) J.Peklenik：Industrie - Anzeiger，Nr.27.4 (1958) 27
武野・長岡：精密機械，30-1 (1964) 38
田中・津和・河村：精密機械，30-11 (1964) 845
田中・津和・河村：精密機械，31-5 (1965) 397
須藤：精密機械，31-9 (1968) 606
- 4) 津和：精密機械，26-4 (1960) 199
27-6 (1961) 409
27-6 (1961) 414
- 5) 吉川：精密機械，30-1 (1964) 112
- 6) 牧野：機械試験所報告，第51号 (1964.8月) 13
- 7) 津和・安井：昭和45年度精機学会春季学術講演会前刷集，
(昭45年4月)

第 3 章 砥石作業面性状の定量化

1 緒 言

研削現象が切れ刃による工作物材料の塑性流動および破壊現象であるという観点に立てば、個々の切れ刃の研削現象の集積、すなわち、統計的研削現象として現われる研削抵抗や研削焼けなどの巨視的研削加工現象が砥石作業面性状と密接な関係にあることは容易に考えられる。近年、この概念を基礎として多くの研究が行なわれ、切れ刃の摩耗と砥石の寿命¹⁾、切れ刃の分布と仕上面あらさ²⁾などの関係がかなり定量的に明らかにされ始めている。

このように、砥石の研削性能を定量化するために必要である砥石作業面性状と巨視的な研削加工現象の関係は定量的に究明されつつあるが、一方、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、定量的に取り扱ったものは少ない。とくに、目直しは砥石の初期状態の砥石作業面性状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出されない。目直し条件が変われば初期状態が変化することは報告されており、初期状態が変われば砥石作業面の研削による変化形態が異なることは十分考えられる。それゆえ、研削加工現象を系統的かつ定量的に究明するためには、前述の影響を明らかにする必要がある。

ところで、目直し条件は普通ドレッサーの運動条件によって規定されているが、この運動条件と目直し直後の砥石作業面の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の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、目直し直後の砥石作業面の性状が異

なることは明らかである。鈴木らは、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り返し、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³⁾。しかし、同じ目直しを繰り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を規定しなければ、研削過程における切れ刃の分布および形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、研削による切れ刃の分布および形状の系統的かつ定量的な変化を求めることは困難である。

そこで、本章においては、まず、目直し過程における砥石作業面性状を詳細に調べ、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究明した。次に、各種目直し条件で目直しを施した砥石の研削による砥石作業面性状の変化および砥石半径減耗量の増加形態を調べ、その結果を用いて各種砥石および広範囲の目直し条件に適用可能な研削による砥石作業面性状の変化の数式化を試みた。

2 実験方法および条件

2-1 砥石半径減耗量の測定法

砥石半径減耗量の測定方法は幾つか提案されているが、最も高精度な測定法は転写法である⁴⁾。転写法は摩耗した砥石の表面形状を他の工作物（例えば、軟鋼）に転写し、その摩耗高さを仕上面あらさ機で測定する方法で、図 3-1 にプランジカット研削の場合の転写法による砥石半径減耗量の測定方法の一例

を示す。図よりわかるように転写法による砥石半径減耗量の測定に対しては砥石作業面附近に基準面となる部分が必要であるが、従来、この基準面としては目直し直後の砥石作業面が使用されている。しかし、目直し切れ刃、巨視的には目直し直後の砥石作業面の脆弱性を考慮すると、転写する際に目直し直後の砥石作業面を基準面とするのは問題がある。そこで、本実験においては、脆弱層の影響を省くために、図3-2のように研削長2mの砥石作業面を基準として使用した。

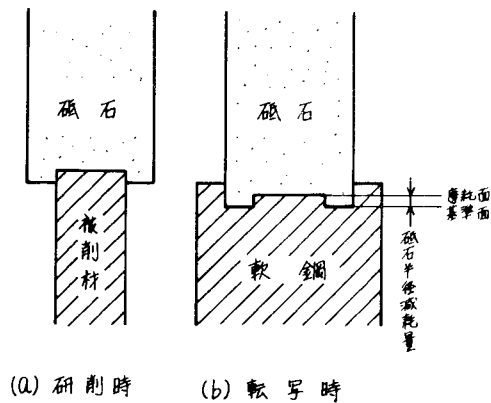


図3-1 転写法による砥石半径減耗量の測定法

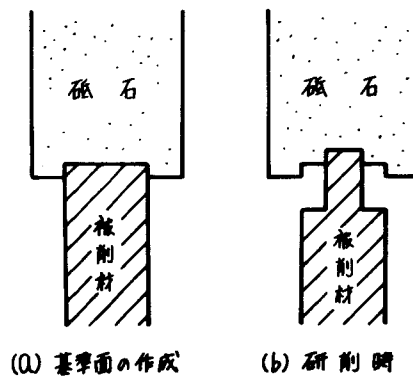


図3-2 目直し切れ刃の脆弱性を考慮した砥石半径減耗量の測定法

2-2 切れ刃密度の測定法

従来良く使用されている切れ刃密度の測定法は砥石作業面をカーボン紙や煤

をつけたガラス板上に
転写して測定する方法
である⁵⁾。しかし、こ
れらの方法では目直し
切れ刃の脆弱性を考え
ると、第2章で述べた
ようにある程度の誤差
が含まれることになる。

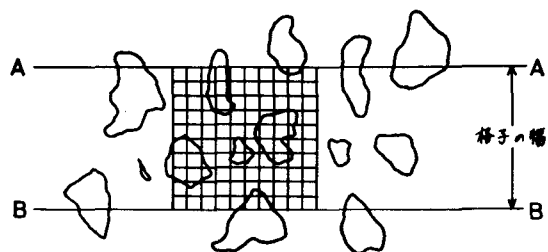


図3-3 切れ刃密度の測定方法

そこで、本実験におい

ては、第2章で述べた顕微鏡の接眼レンズ内の格子を利用し、0.7 mm幅内を通
過する切れ刃を測定することによって、切れ刃密度の測定を行なった。ただし、
測定に際しては、一つの砥粒が幾つかの切れ刃によって構成されていても、こ
れを一つの切れ刃と数え、また、図3-3に示すように、格子内に含まれず、
一部が格子にかかっている切れ刃については、格子の両側線、AAとBBにかか
る切れ刃数が同じであ

るとして、一方の側
だけの切れ刃数を算
入した。

2-3 実験条件

表3-1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
ッサー先端幅の方が

表3-1 実験条件

砥石	A46M8V WA46M8V A46ImV
砥石周速	1900m/min
テーブル速度	8m/min
被削材	SK3(焼入れ Rc≒60)
研削方式	プランジカット研削

ドレッサー送りよりも大きい、すなわち、ネジ切り状目直しにならない範囲で行った。これは、ネジ切り状目直しを繰り返せば砥石作業面が砥石軸方向に対して均一な形状を保ち得ないと考えられるためである。

3 目直し過程における砥石作業面性状の変化

任意の表面状態のA46M砥石に同じ目直し条件で目直しを繰り返した場合の砥石作業面上の切れ刃密度の変化を図3-4に示す。総ドレッサー切り込み量（ドレッサー切り込み量×繰り返えし回数）が少ない初期過程においてはドレッサー送り $360\mu/\text{rev}$ 、切り込み 10μ のように切れ刃密度が変化するが、総ドレッサー切り込み量が増加すると、各目直し条件とも切れ刃密度はほぼ一定となる。この一定値の切れ刃密度を目直し条件に対して示すと、図3-5のようにな

り、切れ刃密度はドレッサー送りおよび切り込みを増加すれば減少する。ただし、ドレッサー切り込みの増加よりもドレッサー送り速度の上昇の方が切れ刃密度の

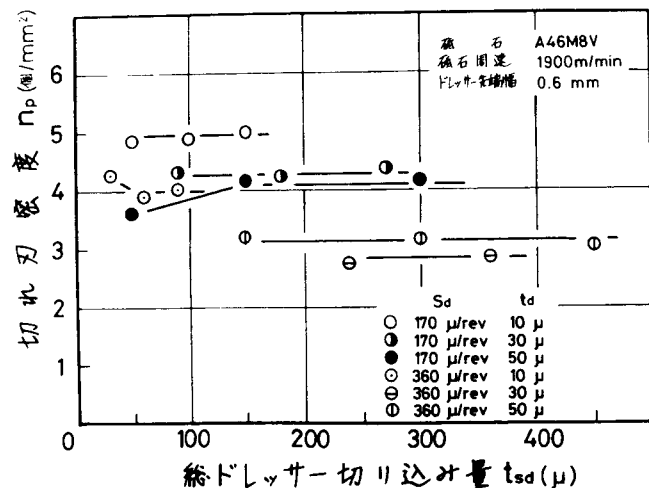


図3-4 目直し過程における切れ刃密度の変化

減少率が大きく、
ドレッサー切り
込みよりも送り
の方が切れ刃密
度に与える影響
は大きい。

これらのこと
から、砥石と砥
石周速が一定な
らば各目直し条
件に対応する切
れ刃密度があり、
切れ刃密度の減

少率、すなわ
ち、砥粒の破
壊の形態でい
えば、砥粒の
脱落および欠
損の増加率は
砥粒がドレッ
サーに見掛け
上大きな面積
(以後、見掛
け衝突面積と

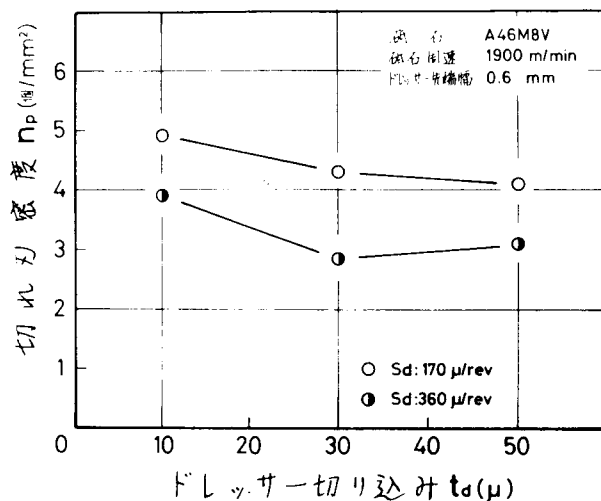


図 3-5 目直し条件と定常領域における
切れ刃密度の関係

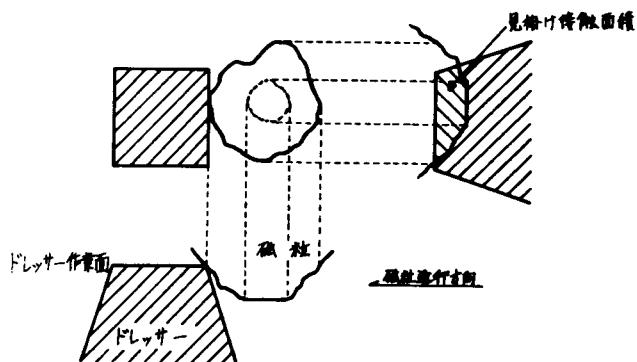


図 3-6 見掛け衝突面積の概念

述べる)で衝突するような目直し条件を用いれば大きくなることが考えられる。ただし、ドレッサー送りと切り込みでは切れ刃密度の減少率は異なり、ドレッサー送りを大きくすることによって見掛け衝突面積を大きくする方が切れ刃密度の減少率は高い。ここで、見掛け衝突面積は図3-6に示すように、砥粒の進行方向と直角な面の砥粒とドレッサーの仮想最大接触面積であり、ドレッサー送りおよび切り込みが大きくなれば大きな見掛け衝突面積でドレッサーに衝突する砥粒が多くなる。それゆえ、ドレッサーによる砥粒の大破壊または脱落は砥粒がドレッサーに衝突した瞬間に破壊するのではなく、ある程度砥粒とドレッサーの接触面積が大きくなるまでは、第2章で述べた脆弱層が構成されるような非常に小さな破壊を起すものと考えられる。そして、大破壊や脱落は砥粒とドレッサーの接触面積が増加した後、砥粒にかかる力が大きくなることによって、砥粒内の欠陥部や砥粒と結合剤の接触部、または、結合剤の機械的強度の弱い部

分に大きな応力が発生するために生じるものと思われる。

図3-7に図3-4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。

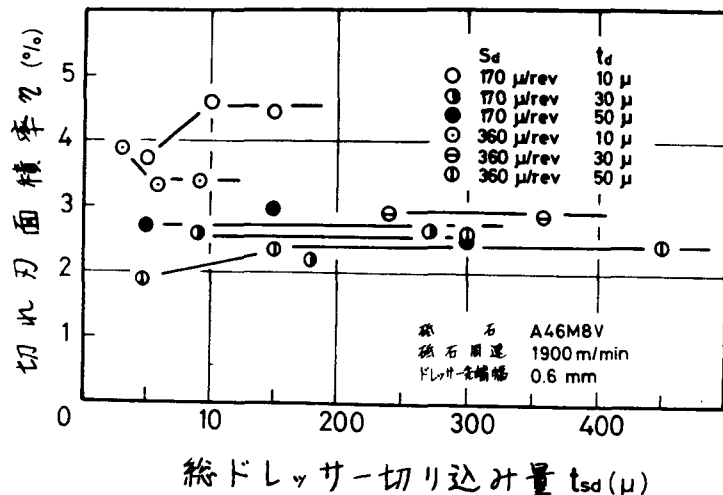


図3-7 目直し過程における切れ刃面積率の変化

ドレッサー送り170

μ/rev 、ドレッサー

ー切り込み30 μ お

よび50 μ のように

バラツキもあるが、

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、

切れ刃密度と同様、

切れ刃面積率も総ド

レッサー切り込み量

が増加するとほぼ一

定値になる。しかし、ドレッサー送り170 μ/rev 、切り込み50 μ の目直し過程における切れ刃密度と切れ刃面積率を対照すればわかるように、切れ刃密度と切れ刃面積率では一定値になる総ドレッサー切り込み量にはある程度の差が認められる。また、図3-8に示す目直し条件と一定値の切れ刃面積率の関係から、一定値の切れ刃面積率はドレッサー送りを速くしても、総体的に切れ刃密度ほど減少する傾向はみられず、目直し条件に対する切れ刃面積率は切れ刃密度と同様な傾向をもたないことがわかる。これらの切れ刃密度と切れ刃面積率の目直し条件に対する差異は切れ刃面積率が切れ刃密度と切れ刃の大きさによって表わされることを考えれば、各目直し条件によって切れ刃の大きさ、すなわち、砥粒の破壊の形態でいえば、一部欠損の大きさが変化するために生じるものと考えられる。

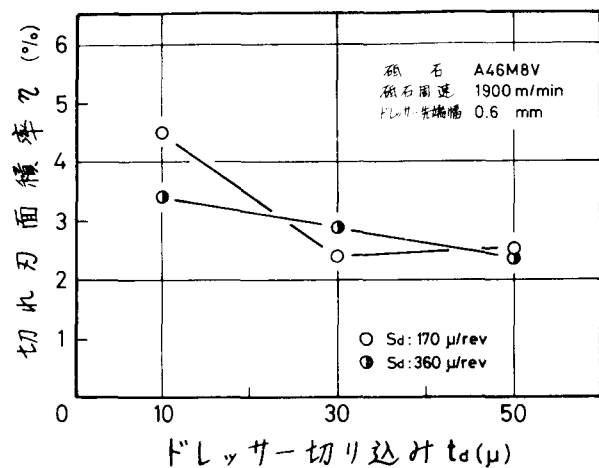


図3-8 目直し条件と定常領域における切れ刃面積率の関係

同一砥石作業面上における切れ刃の平面形状を同一の直径 $\bar{d}$ (mm)をもつ円と考え、切れ刃密度を n_p (個/mm²)、切れ刃面積率を η (%)とすれば、

$$\eta = 25 \pi \bar{d}^2 n_p \quad \dots\dots\dots (3-1)$$

が成り立つ。こ

の式に図 3-5

および図 3-8

の切れ刃密度お

よび切れ刃面積

率を代入して、

目直し条件と切

れ刃直径 $\bar{d}$ の関

係を求めると図

3-9のように

なる。図より、

ドレッサー切り

込み10 μの場

合を除き、ドレッサー送りが大きい方が切れ刃直径が大きくなることがわかる。

これは、ドレッサー送りが小さい場合には同一砥粒がドレッサーに衝突する回

数が多くなるためと考えられる。すなわち、ドレッサー送りが小さい場合には

大破壊が少ない点では、切れ刃径は大きくなるが、大破壊しなくとも小さな一

部欠損の積み重ねという点では切れ刃径は小さくなり、図 3-9の結果は、切

れ刃の大きさには後者の衝突回数の影響の方が大きいことを示す。次に、図 3

-10に目直し過程における連続切れ刃間隔の変化を示す。図より、連続切れ

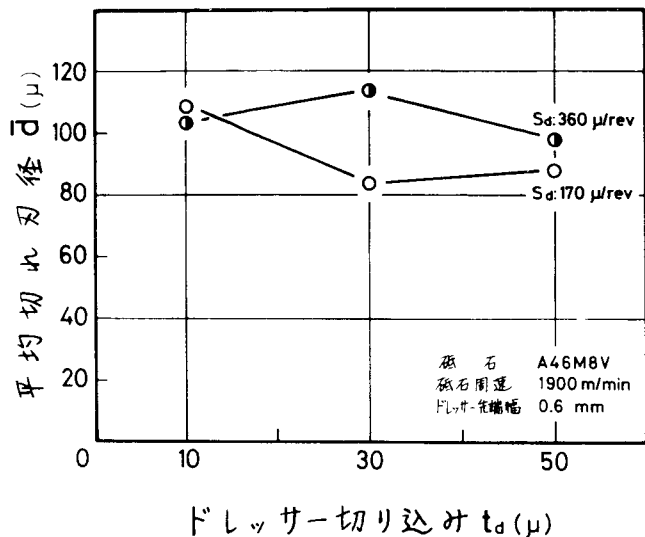


図 3-9 目直し条件による切れ刃の大きさの変化

刃間隔はある程度のバラツキを示すが、総ドレッサー切り込み量が大きくなるとほぼ一定値になっていることがわかる。同一目直し条件では切れ刃密度および切れ刃の大きさが各目直し条件ではほぼ一定となっているので、この結果は妥当である。

これらの切れ刃密度、切れ刃面積率および連続切れ刃間隔が総ドレッサー切り込み量が大きくなるとほぼ一定値になるという結果はA46M砥石だけではなく、

A46I砥石および

WA46M砥石についてもみられる。図3-11および図3-12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、

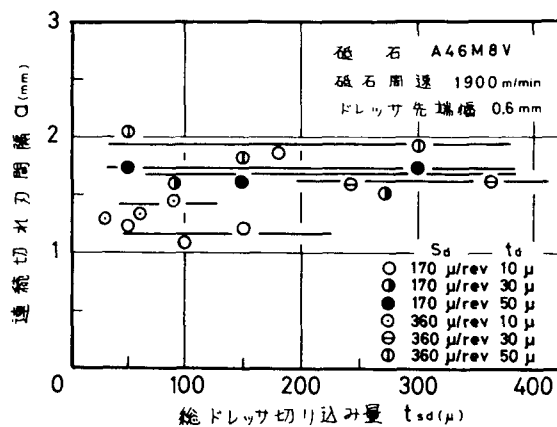


図3-10 目直し過程における連続切れ刃間隔の変化

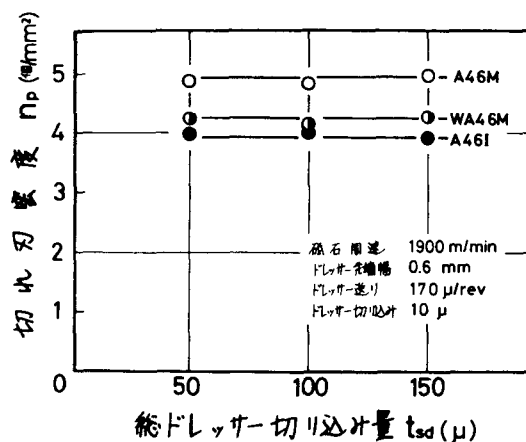


図3-11 各種砥石の目直し過程における切れ刃密度の変化

A46M砥石

よりもA46I

砥石の方が切

れ刃密度およ

び切れ刃面積

率が小さく、

結合度の低い

砥石は同じ目

直し条件でも

砥粒の脱落が

多いことがわ

かる。また、

WA46M砥石

の場合もA46M砥石よりも切れ刃密度および切れ刃面積率が小さいが、これは、

結合度が同じなのでWA砥粒の方がA砥粒よりも破壊しやすいことを示し、砥

粒の破壊強度につ

いて一般に言われ

ている結果と一致

する。

以上の結果から、

目直し過程におけ

る切れ刃密度およ

び切れ刃面積率の

変化は図3-13

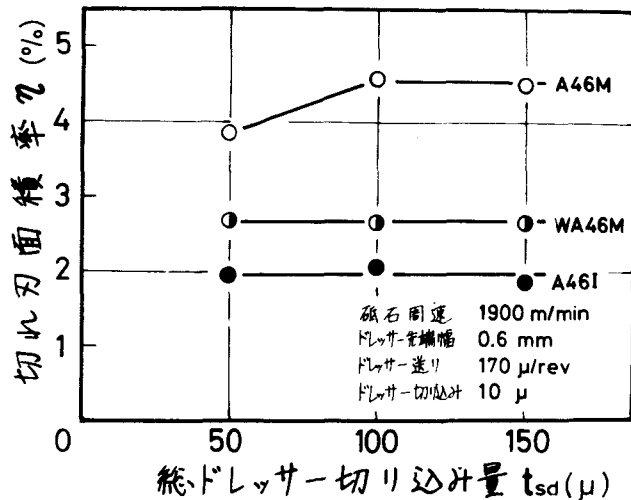


図3-12 各種砥石の目直し過程における切れ刃面積率の変化

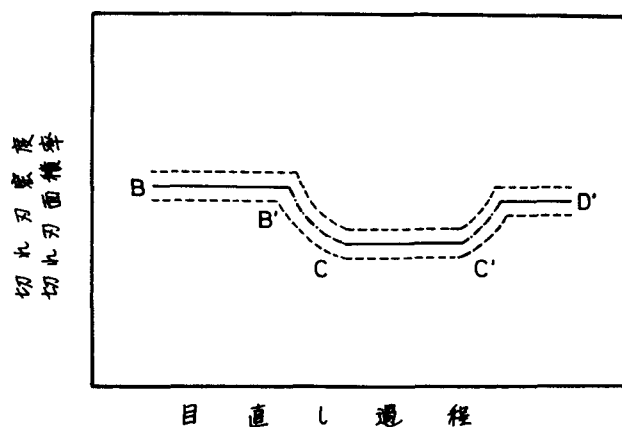


図3-13 目直し過程における砥石作業面性状変化

のようになると考えられる。すなわち、同じ目直しを繰り返すと、切れ刃密度または切れ刃面積率は BB' ないしは CC' のようにあるバラツキ幅をもつが、ほぼ一定の値で定常的に変化し（定常目直し領域と呼ぶ）、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（過渡目直し領域と呼ぶ）を経て CC' または DD' のような定常的な切れ刃密度または切れ刃面積率になる。この際、過渡的な変化形態の $B'C$ や $C'D$ は変化前後の目直し条件によって決定されるもので、本実験においては詳細に究明していないため明確に検討し得ないがドレッサー送り $170\mu/\text{rev}$ 、切り込み 50μ の一定値からドレッサー送り $170\mu/\text{rev}$ 、切り込み 10μ の一定値に移行するための総ドレッサー切り込み量は 200μ 以上である結果を得ている。また、その反対の場合には 200μ 以下であるという結果も得ている。したがって、目直し作業は作業時間および目直し直後の砥石作業面性状から考えて、荒い目直しから細かい目直しへの移行は不適當であり、細かい目直しを必要とする作業では最初から細かい目直しを繰り返す方が有効であると言える。以上のことから、同一目直し条件で目直しを繰り返えし、一定の状態になった砥石作業面性状を目直し過程の基準にすれば、目直し過程を明らかにすることにより目直し過程を含む目直し条件と砥石作業面性状とは一義的關係があることがかなり広範囲の砥石について言える。

4 研削過程における砥石作業面性状の変化

4-1 研削過程における切れ刃分布の変化

A46M砥石の研削過程における切れ刃密度の変化を図3-14に示す。ただし、目直し条件としては図3-4における目直し過程の最終状態を使用した。切れ刃密度はドレッサー送り $170\mu/\text{rev}$ 、切り込み 10μ 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、目直し切れ刃の脆弱性を考慮

すると、他の目直し条件の場合でも研削初期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研削長 2 m を基準としてほぼ土 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研削による切れ刃の破壊、脱着および新出を問題としないならば一定と言え、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とみなせる。図 3-15 は

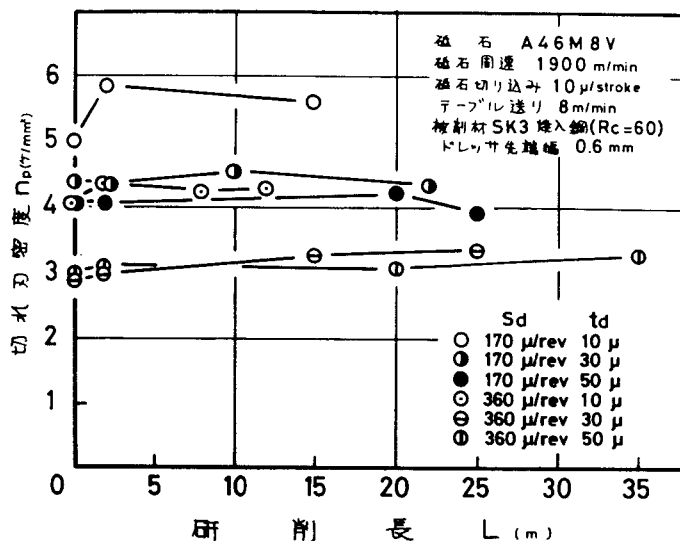


図 3-14 研削過程における切れ刃密度の変化

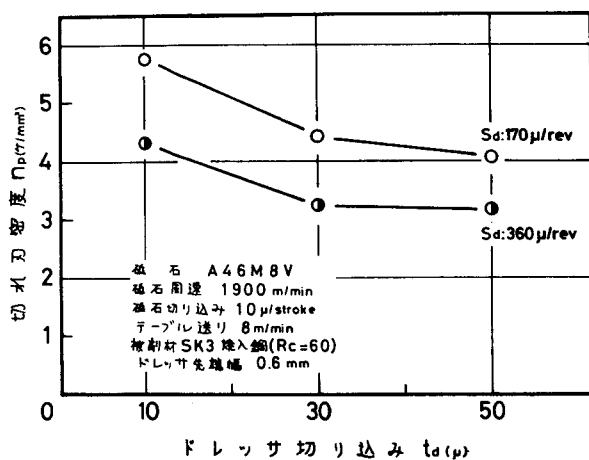


図 3-15 目直し条件と切れ刃密度の関係

図3-14

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

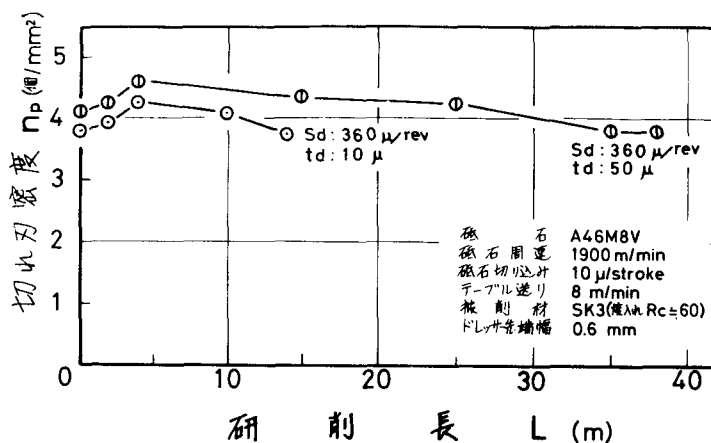


図3-16 研削過程における切れ刃密度の変化
(過渡目直し領域)

である。図より、切れ刃密度はドレッサー送りと切り込みによって影響されるが、ドレッサー切り込み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。これは、前項で述べた目直し切れ刃の密度と同じ傾向であり、本実験の目直し条件の範囲では切れ刃密度はバラツキなどを考慮すれば目直し条件によって三種類程度に分類するのが良いと考えられる。その分類の行ない方は、 $170 \mu / \text{rev}$ 、 10μ のドレッサー送りおよび切り込みの目直し条件の場合の切れ刃密度が最も密、 $360 \mu / \text{rev}$ の 30μ および 50μ が最も粗、その他の条件はそのほぼ中間とするものである。

定常目直し領域における砥石作業面を初期状態とする場合の研削過程における切れ刃密度は以上の通りであるが、過渡目直し領域の場合にも同様な変化を示す。図3-16はドレッサー送り $170 \mu / \text{rev}$ 、切り込み 10μ の目直し条件で砥石作業面を一定にし、その後、目直し条件を変化させ過渡状態における

研削過程の切れ刃密度の変化を調べたものである。図より、過渡目直し領域の砥石作業面を初期状態とする方が、図3-15の定常目直し領域の場合よりも研削過程における切れ刃密度の変化は多少大きい、その変化はやはり±10%の範囲に入っていることがわかる。ここで、 $360\mu/\text{rev}$ 、 50μ の切れ刃密度の方が $360\mu/\text{rev}$ 、 10μ よりも密になっており、図3-15の結果と反対になっているが、これは、後述するように過渡目直し領域の方が目直し直後の切れ刃密度が密にもかかわらず、切れ刃面積率が小さくなっていることを考えると、図3-15の結果では脱落または欠損になっていたものが図3-16では大きな破壊をした一部欠損の切れ刃となっている結果であり、図3-15の結果と矛盾しないものと考えられる。同じ過渡状態の目直し直後の砥石作業面を調べた結果で

は $360\mu/\text{rev}$ 、 50μ の方が $360\mu/\text{rev}$ 、 10μ よりも粗であり、上述の考察は妥当である。それゆえ、過渡目直し状態では再現性のある結果を出すためには多くの実験を要し、バラツキ幅も定常目直し領域よりも大きく取る必要が

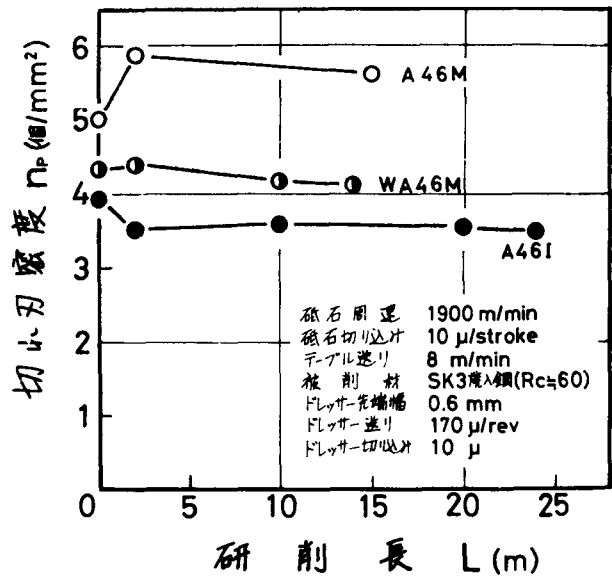


図3-17 各種砥石の研削過程における切れ刃密度の変化

あるものと思われる。

以上は A46M 砥石の場合であるが、その他、A46I および WA46M 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 3-17 は目直し過程が定常領域における A46I および

WA46M 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生じやすい WA 砥石や A46I 砥石でも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

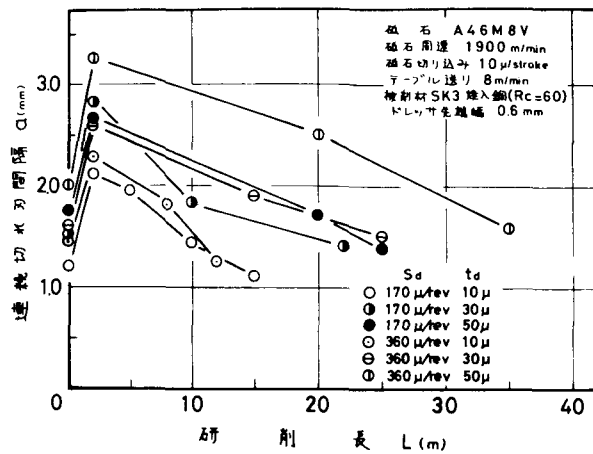


図 3-18 研削過程における連続切れ刃間隔の変化

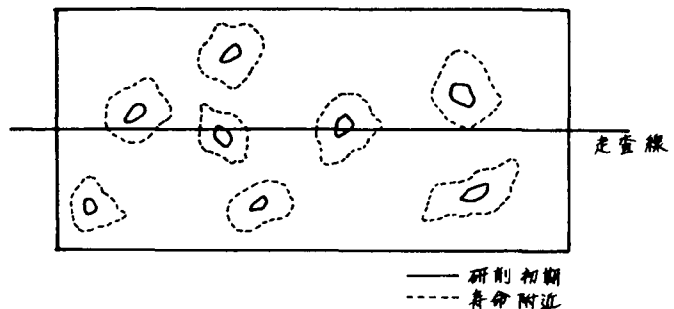


図 3-19 切れ刃の摩耗と連続切れ刃間隔の変化

の少なくとも A 系砥石、拡張すれば、C 系や SA など種類の異なる砥石についても得られることが十分考えられる。また、研削条件が苛酷でなく、研削時間が進むとともに切れ刃が摩耗する本実験のような場合には、結合度を変化させることは目直しによって切れ刃の密度を変化させることになる。

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通りであるが、他方、連続切れ刃間隔も砥粒切り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 3-18 に示す。ただし、本測定は図 3-14 の切れ刃密度の測定と同じ時に行なったものである。図より、全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がわかる。前述したように切れ刃密度は研削長にかかわらず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に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 3-19 に示すように、切れ刃密度が同じであっても、研削初期の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、研削過程における切れ刃密度が一定、すなわち、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。

切れ刃面積率と連続切れ刃間隔の関係を図 3-20 に示す。図より、連続切れ刃間隔は切れ刃面積率が増加する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。これは、切れ刃逃げ面がある程度以上になると走査線に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。

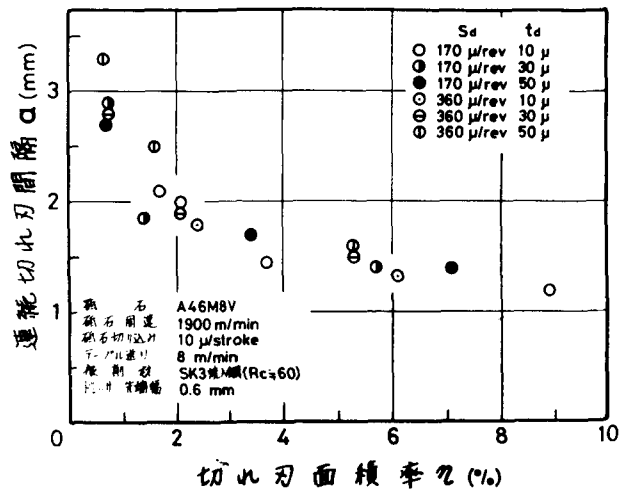


図 3-20 切れ刃面積率と連続切れ刃間隔の関係

4-2 研削過程における切れ刃面積率および砥石半径減耗量の変化

研削過程における切れ刃面積率および砥石半径減耗量の変化を図 3-21 および図 3-22 に示す。ただし、両測定とも図 3-14 の切れ刃密度と同時に測定したものである。

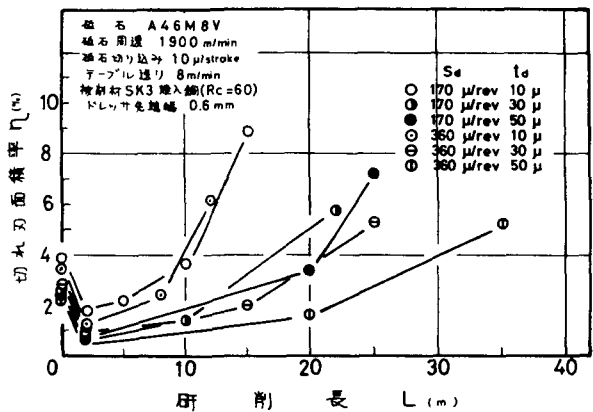


図 3-21 研削過程における切れ刃面積率の変化

切れ刃面積率

は全ての目直

し条件の場合

について、研

削初期に急速

に減少し、研

削初期のある

研削長で極小

値を示し、そ

の後、研削過

程が進むにつ

れて増加する。

そして、その

増加形態は目直し直後の切れ刃面積率が大きい程急速である。また、研削過程がある程度進むと切れ刃面積率の増加率が大きくなるような傾向がすべての目直し条件の場合にみられる。

砥石半径減耗量は研削長が短い場合には、減耗量が少なく、また、転写面の仕上面あらかさが減耗量に比較して小さくないので精度の高い測定がし得ないため、ある程度のパラツキは認められるが、図3-22以外の研削過程における砥石半径減耗量のデーターも含めて総合的に判断すると、研削長に対して図3-22に示す二直線を組み合わせることによって近似される。そして、その近似式は、

$$\Delta R = \begin{cases} \Delta R_1 (L - 2) & \text{(折点以前)} \\ \Delta R_1 (L_f - 2) + \Delta R_2 (L - L_f) & \text{(折点以後)} \end{cases} \quad \dots\dots (3-2)$$

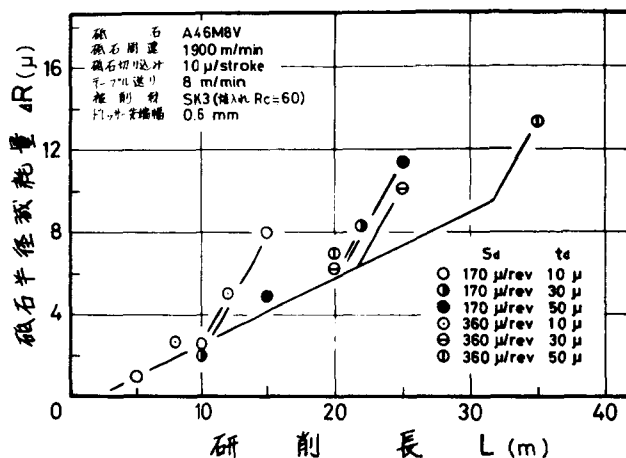


図3-22 研削過程における砥石半径減耗量の変化

ここで、 L ：任意の研削長（ m ）

ΔR ：研削長 $2m$ から L までの砥石半径減耗量（ μ ）

$\Delta R_1, \Delta R_2$ ：折点前後の単位研削長当りの砥石半径減耗量（ μ/m ）

L_f ：折点までの研削長（ m ）

で表わされ、本実験における ΔR_1 および ΔR_2 は 0.28 （ μ/m ）および 1.14 （ μ/m ）である。詳述すれば、研削長 $2m$ を基準とすると、砥石半径減耗量は研削焼けが現われる附近までは研削長に対して緩勾配で直線的に変化し、その後、研削長に対して急勾配で直線的に変化するようになる。ただし、突然摩耗速度が変化することは考えられないので、当然研削焼けが生じる附近では直線的な変化はすることはないものと思われる。また、研削焼け後の直線関係はいくらでも続くというわけではなく、切れ刃の摩耗面が大きくなることによって、切れ刃が脱落および破壊を起すことは十分考えられるので、限界があるものと思われる。このような、研削焼け附近で砥石半径減耗量が急増するのは、本実験に使用した焼入れた SK3 のみだけでなく、S45C についても生じる。図 3-23 は S45C を研削した場合の研削過程における砥石半径減耗量である。工作物全面に青い研削焼けがみられる研削長 $61m$ 附近で砥石半径減耗量の増加形態が変化し、急速に増加していることがわかる。したがって、砥石半径減耗量の急変には研削焼けが大きな影響を及ぼしているものと考えられる。また、図 3-21 と図 3-22 とを対照すると、前述した切れ刃面積率の増加率が大きくなるのは、砥石半径減耗量の急増点附近、すなわち、研削焼けが現われる附近であり、切れ刃密度は研削焼け後もほとんど変化しないので、研削焼けによる砥石半径減耗量の急上昇、すなわち、切れ刃の摩耗速度の増加のた

め、切れ刃の摩耗面
が急速に大きくなる
結果であると考えら
れる。

研削焼けによって
切れ刃の摩耗速度が
増加するのは、工作
物の温度上昇による
工作物の再焼入れ硬
化現象の発生、酸化
膜生成による工作物
と切れ刃の摩耗現象
の変化、切れ刃逃げ
面増加による上すべ
り現象の発生（切れ
刃と工作物の接触圧
力が増加する）など
が考えられる。図 3
－ 2 4 は酸化膜発生
前と後の工作物表面
状態の変化を調べる
ために、研削過程に
おける工作物表面の
ビッカース硬さの変

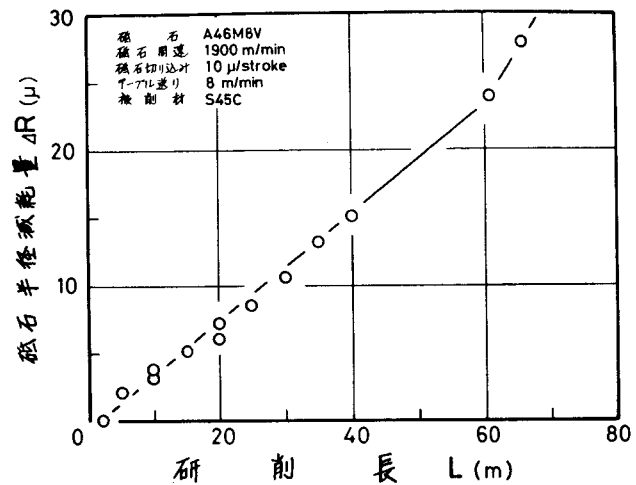


図 3－23 S45C の研削による砥石半径
減耗量の変化

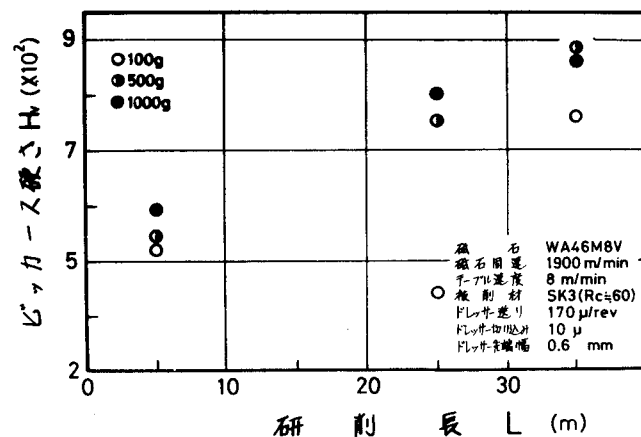


図 3－24 工作物表面性状に及ぼす
研削焼けの影響

化を求めたものである。ただし、各プロットは工作物表面15ヶ所の平均値である。また、図において、研削長5mでは研削焼けはみられず、25mでは極く薄い茶色の研削焼けが、35mでは工作物全面に青色の研削焼けが発生している。

荷重100g以外では工作物の表面硬度は酸化膜が発生した方が硬度が大きく、その大きさは酸化膜が厚い程大きい。また、研削長5mの研削焼けが見られない場合と研削焼けが青くみられる、すなわち、酸化膜が厚い場合とではその硬度比は約1.5倍もある。したがって、その理由は明確にし得ないが、酸化膜発生時の工作物表面硬度の上昇が大きい。

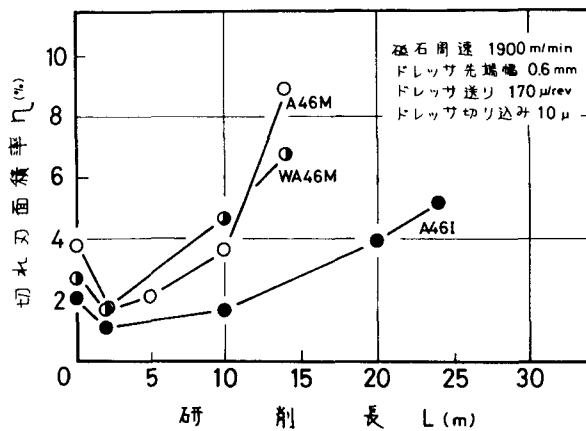


図 3-25 各種砥石の研削過程における切れ刃面積率の変化

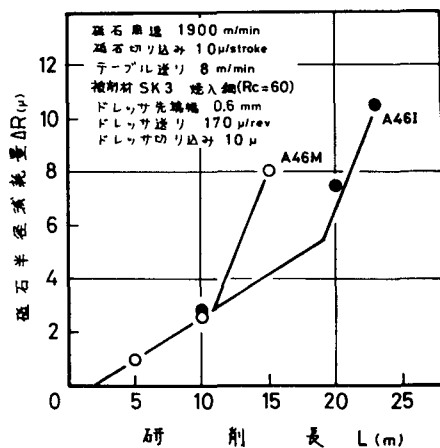


図 3-26 砥石半径減耗量に及ぼす結合度の影響

く影響していることは明らかであろう。

以上のような、研削過程における切れ刃面積率および砥石半径減耗量の変化と同じような変化は、過渡目直し状態の場合でも、また、A46I 砥石およびWA46M 砥石についてもみられる。A46I 砥石およびWA46M 砥石の研削過程における切れ刃面積率および砥石半径減耗量の変化を図3-25、図3-26および図3-27に示す。A46I のように結合度の低い砥石でも、研削過程における切れ刃面積率が増加し、また、砥石半径減耗量がA46M 砥石と同じであることから、前項で述べたように、本実験のように苛酷でない研削条件では、砥石作業面が切れ刃の摩耗過程によって変化することがわかる。それゆえ、切れ刃の摩耗過程が砥石半径減耗量と関係することを考えると、切れ刃密度は一定なので、切れ刃面積率は砥石半径減耗量となんらかの対応関係があるものと考えられる。WA46M 砥石でも、WA 砥粒がA 砥粒よりも耐摩耗性が大きい⁶⁾⁷⁾、図3-27のように研削長に対する砥石半径減耗量が少ないが、同様な対応関係が考えられる。

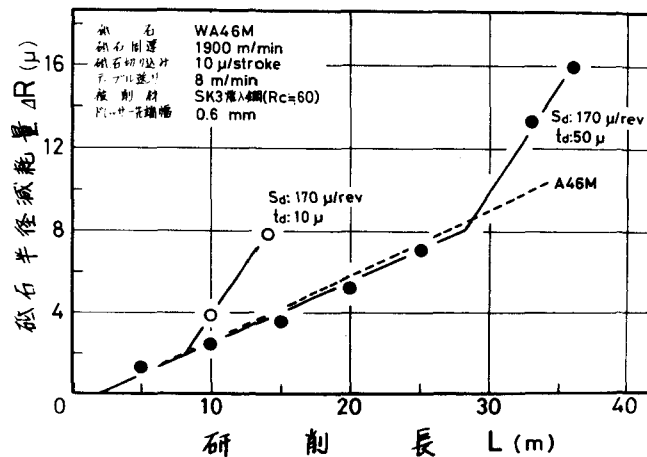


図3-27 砥石半径減耗量に及ぼす砥粒の種類の影響

4-3 研削による砥石作業面性状の変化の数式化

研削初期以後の研削過程

においては切れ刃密度がほぼ一定であり、切れ刃面積率が砥石半径減耗量となんらかの対応関係をもつことを前項までに明らかにした。そこで、これらの結果から、研削過程における砥石作業面の変化過程を考えてみる

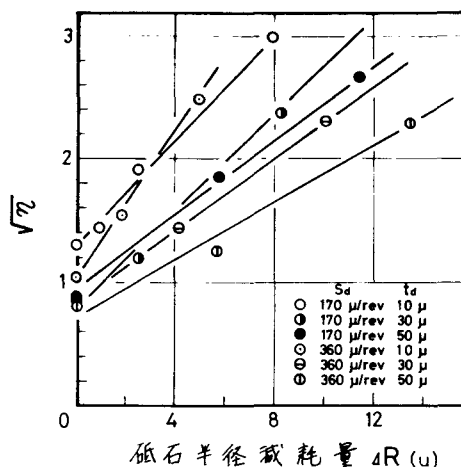


図 3-28 砥石半径減耗量と切れ刃面積率の関係

と、切れ刃密度はほぼ一定なので、砥石作業面の変化

過程は従来いわれているように個々の切れ刃の逃げ面の大きさが増加する過程⁸⁾統計的な意味では、切れ刃面積率の増加過程とみなせる。そして、砥石半径減耗量が研削過程に対して直線関係にあるので、砥石半径方向に切れ刃が一定の摩耗速度で摩耗すると考えると、切れ刃の逃げ面、または、切れ刃面積率の増加過程は個々の切れ刃の立体的幾何学形状が決まれば決定しうる。

そこで、研削長 $2m$ 以上の任意の研削過程における砥石半径減耗量 ΔR_ℓ と切れ刃面積率の関係を前節の結果から検討してみると、その関係は図 3-28 になる、すなわち、切れ刃面積率 η_ℓ は砥石半径減耗量 ΔR_ℓ の二次曲線で近似することができ次式で表わされる。

$$\eta_\ell \approx (C \Delta R + \sqrt{\eta_2})^2 \dots\dots\dots (3-3)$$

ここで、 C ：砥石と目直し条件によって決定される定数

η_2 ：研削長 $2m$ における切れ刃面積率

また、任意の砥石作業面上の切れ刃面積率はその定義から、

$$\eta_{\ell} = \left(\sum_{i=1}^{n_p} w_{p\ell i} \right) \times 10^2 = n_p \bar{w}_{p\ell} \times 10^2 \dots\dots\dots (3-4)$$

ここで、 $\bar{w}_{p\ell i}$ ：任意の研削長 L における個々の切れ刃逃げ面の大きさ

$\bar{w}_{p\ell}$ ：任意の研削長 L における個々の切れ刃逃げ面の大きさの
 平均値

で表わされる。したがって、(3-3) 式および (3-4) 式より

$$\bar{w}_{p\ell} \approx \frac{1}{n_p} (C \triangle R + \sqrt{\eta_2})^2 \times 10^2 \dots\dots\dots (3-5)$$

が導き出され、切れ
 刃逃げ面の大きさは
 砥石半径減耗量の二
 乗で増加するような
 変化をする。それゆ
 え、切れ刃の平均的
 な幾何学形状（統計
 的幾何学形状と呼ぶ
 ）は図 3-29 に示
 するような円錐台や角

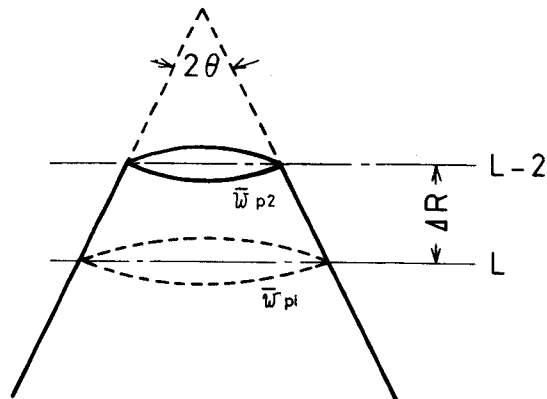


図 3-29 切れ刃の統計的幾何学形状の一例

錐台のような非常に簡単なモデルで表わすことができる。今、統計的幾何学形状を円錐台とすると、(3-4)式および(3-5)式は、

$$\eta_l = (\sqrt{\pi n_p} \cdot \tan \theta \cdot \Delta R \times 10^{-2} + \sqrt{\eta_2})^2 \dots\dots\dots (3-6)$$

ここで、 2θ ：円錐台の頂角

$$\overline{W}_{pl} = (\sqrt{\pi \tan \theta} \cdot \Delta R \times 10^{-2} + \sqrt{\frac{\eta_2}{n_p}})^2 \times 10^{-2} \dots\dots\dots (3-7)$$

で表わされ、切れ刃面積率および切れ刃逃げ面摩耗面積は目直しによって決定される切れ刃密度および切れ刃の統計的幾何学形状によって決定される。すなわち、研削過程における砥石作業面の変化過程は目直し条件によって決定される切れ刃密度と切れ刃の形状によって一義的に決定される。

(3-7)式を用いて、目直し条件および砥石の種類を変えた場合の切れ刃の統計的幾何学形状を求めると、図3-30のようになる。図より、切れ刃の統計的幾何学形状は頂角が

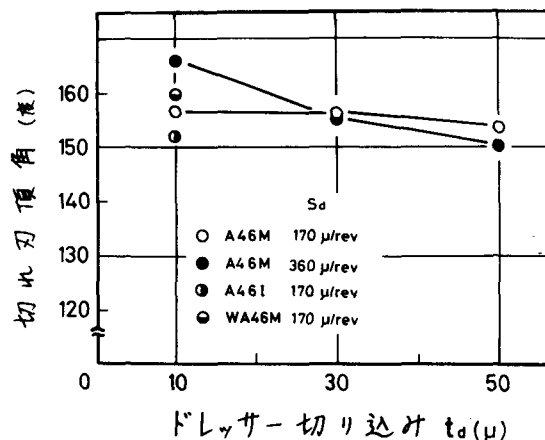


図3-30 目直し条件と切れ刃の統計的幾何学形状の関係

ほぼ 150° から 160°
 の円錐台によって表
 わされ、目直し条件に
 よって大きな差がない
 ことがわかる。以上は、
 焼入れした工具鋼 SK3
 を研削した場合の結果
 であるが、SK3は硬
 度が高く、研削する場
 合に切れ刃がある程度
 破壊するために、図3
 -28のような砥石半
 径減耗量と切れ刃面積
 率の関係がたまたま得
 られたとも考えられる。

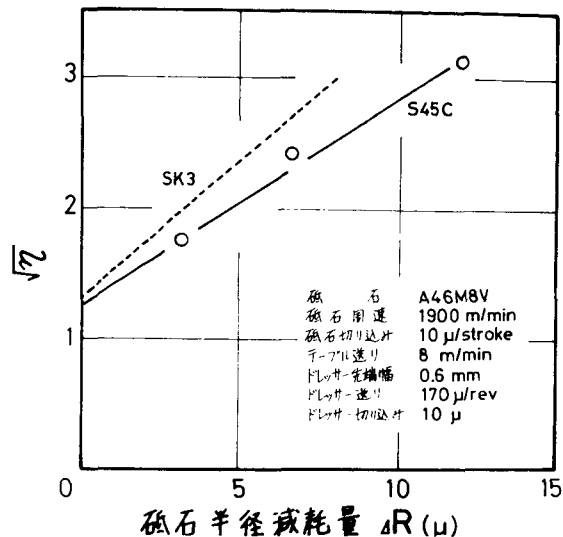


図3-31 砥石半径減耗量と切れ刃面積率
 の関係に及ぼす工作物の影響

そこで、S45Cを研削した場合の研削過程における砥石作業面の変化を調べる
 ことによって、上述の結果の一般性を検討してみた。図3-31はその結果
 であり、S45Cの場合の砥石半径減耗量と切れ刃面積率の関係を示したもの
 である。図より、S45Cの場合でも砥石半径減耗量と $\sqrt{A}$ との間には近似的に
 直線関係があり、(3-6)式が成立することがわかる。ここで、SK3と
 S45Cとでは、傾きが異なっているが、これは、S45Cの測定時の方が多小
 切れ刃密度が少なかったことに関係し、(3-6)式より切れ刃の頂角を計算
 してみるとSK3が約 156° 、S45Cが約 152° であり、ほとんど変化がな
 い。したがって、一般の鋼材研削に際しては、切れ刃の破壊の割合はあまり変

らず、それゆえ、切れ刃の形状には工作物の影響は少ないものと考えられる。

5 結 論

研削過程における砥石作業面性状の変化を目直し条件を含めて数式化するために、目直し過程における砥石作業面性状の変化、研削過程における砥石半径減耗量、切れ刃分布、切れ刃面積率など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り返せば、砥石作業面性状は一定となり、目直し過程に影響されなくなる。そして、その一定値は目直し条件により変化する。
- 2) 一般に使用される目直し条件では、目直しによって形成される砥石作業面性状のバラツキを考えると、目直し条件を大きく変化させなければ顕著な差はでない。また、過渡目直し過程ではバラツキが大きいことから、希望する砥石作業面性状を目直し過程において目直し条件を変化させることによって得るのは困難である。
- 3) 同一目直し条件で目直しを繰り返し、一定の状態にした砥石作業面性状を基準にとれば、砥石作業面性状は目直し過程を含む目直し条件で決定し得る。
- 4) 研削過程における切れ刃密度は研削初期には多少変化するが、それ以後はほとんど変化せず一定とみなせる。そして、その一定値は目直し条件と対応する。
- 5) 研削過程における切れ刃面積率は、研削初期には脆弱層が除去されるため減少するが、その後、漸増し、研削焼けが生じる附近から急増する。
- 6) 研削長 2 m を基準とする研削過程における砥石半径減耗量は、研削焼け

が生じる附近でその勾配は変るが、研削過程に対して近似的に直線的に増加する。そして、この勾配の変化が生じる原因は研削焼けによる工作物表面硬度変化の影響が大きい。

- 7) 砥石半径減耗量と切れ刃面積率とは研削焼け以後の研削過程も含めて、近似的に二次関数で表わされる。
- 8) 砥石作業面上の切れ刃の平均的な形状（切れ刃の統計的幾何学形状）は角錐台や円錐台などの模型で表わし得る。
- 9) 以上の結果を用いれば、研削による砥石作業面性状の変化形態は目直しによって一義的に決定され、次式で示される。

$$\eta_L = \left(\sqrt{\pi n_p} \cdot \tan \theta \cdot \Delta R \times 10^{-2} + \sqrt{\eta_2} \right)^2$$

参 考 文 献

- 1) J .Peklenik : Industrie-Anzeiger , Nr .27, 4 (1958) 27
吉川 : 精密機械, 28-10 (1962) 562
田中 . 津和 . 河村 : 精密機械, 31-5 (1965) 397
- 2) 織岡 : 日本機械学会誌, 63-499 (1960) 1185
長谷川 : 大阪大学博士論文 (1972)
- 3) 鈴木 . 高橋 : 精密機械, 30-3 (1964) 246
- 4) 砥粒加工研究会 : 砥粒加工技術便覧, 日刊工業社 (1965) 983
- 5) 佐藤 : 精密機械, 16-3 (1950) 77
竹中 : 日本機械学会論文集, 26.163 (1960) 403
- 6) 田中 . 津和 : 精密工作法, 共立出版 (1964) 165
- 7) 高沢 . 横山 : 機械学会講演会前刷集 (1958.10月)
- 8) 津和 : 精密機械, 27-6 (1961) 409

第 4 章 砥石の研削性能の定量化

1 緒 言

砥石に目直しを施した後、研削作業を行なうと砥石作業面上の切れ刃の状態が次第に変化し、作業目的に適合しない研削加工現象、すなわち、砥石の寿命が生じ砥石に再び目直しが必要とされるようになる。砥石の研削性能はこの目直しから寿命までの時間間隔（目直し間寿命）によって評価されるが、研削作業の目的によって寿命判定基準（例えば、研削焼け、仕上面あらさ）が異なり、また、同じ基準であっても寿命とする値が変化し、さらに、研削作業においては種類の判定基準を用いることは少ないので、砥石の研削性能を巨視的な研削加工現象から単純に評価することは困難である。例えば、良い仕上面あらさが得られる限界と研削焼けまでの工作物除去量とを基準とする場合では、同じ砥石の研削性能の評価が異なることは良く知られていることである。

寿命判定基準としては、上述の研削焼け、仕上面あらさの他に、びびり、砥石半径減耗量、加工変質層などの研削作業目的に密着した基準と、これらの基準と物理的に関係する研削抵抗、振動などが考えられるが、この中で、びびりや振動が研削盤の剛性や砥石の巨視的表面状態に関係する¹⁾ことを除けば、他の基準は砥石作業面性状と対応関係があることは従来の報告で明らかである^{2)~9)}。したがって、砥石の研削性能を切れ刃という微視的観点でとらえ、研削による砥石作業面性状の変化ならびに砥石作業面性状と研削抵抗や仕上面あらさなどの各寿命判定基準との関係が全研削条件に対して究明されれば、砥石の研削性能を一般的かつ定量的に評価することが可能である。

このような観点からすれば、前章までに研削による砥石作業面性状の時間的推移が定量化されたので、砥石の寿命時における砥石作業面性状が明らかにさ

れば砥石の研削性能を定量化することが可能である。砥石の研削寿命については、吉川が研削抵抗を寿命判定基準として使用し、切れ刃面積率がある値になると上すべりする切れ刃が多くなり、切れ刃面積率に対する研削抵抗の増加が非常に大きくなることから、切れ刃面積率がこの値になった時を寿命としている⁶⁾。また、仕上面あらさと切れ刃分布との関係は実験的、理論的に多くの報告がある。しかし、研削寿命の場合には、切れ刃の分布を考慮しておらず（上すべりは砥粒切り込み深さに関係するので、一般的概念としては連続切れ刃間隔も考慮する必要があると考える）、また、仕上面あらさの場合には、解析的理由から切れ刃の逃げ面を考慮したものは少ない。さらに、その他の寿命判定基準についてはほとんど研究されていない。

そこで、本章においては、砥石作業面性状と研削焼け、研削抵抗、砥石半径減耗量および仕上面あらさなどとの関係を実験的に明確にし、砥石の研削性能を定量化することを試みた。なお、実験にあたっては、市販の砥石では寿命時における切れ刃の分布や逃げ面の大きさを調節することが困難である。したがって、切れ刃の分布や逃げ面の大きさと各寿命判定基準との関係を明確にすることが難しいので、非常に粗な切れ刃の分布や大きな逃げ面をもつことの可能なメタルボンド砥石を製作した。その結果、砥石作業面性状と仕上面を除く他の寿命判定基準との定量的関係を見い出し、目直し条件を含む砥石の研削性能の数式化を行ない得た。

2 実験装置および方法

2-1 メタルボンド砥石の製作

切れ刃分布を調節するには砥粒率を変えたり、目直し条件や方法を変えたりすることによって、一般のビトリファイド砥石でも成し得る。しかし、寿命時

において非
常に粗な分
布を作るた
めには、前
者では砥粒
率および結
合剤率を少
なくし、組
織を粗にし
なければな
らないが、
その場合に
は結合度が
減少し、切
れ刃が研削
によって脱
落する。そ
れゆえ、砥

表 4 - 1 圧縮・焼結条件

ボンドの材料	-60mesh 球状砲金粉と-60mesh 電解銅粉を重量比で 3 : 7 の割合でボールミルにて混合
圧縮条件	2.4ton/cm ² 両押し
焼結条件	850℃ に 2 時間保持

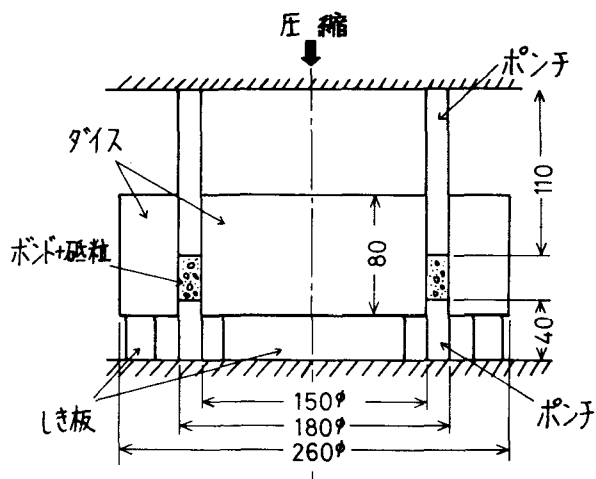


図 4 - 1 メタルボンド砥石の成形法

石寿命の判定基準である研削焼けや大きな研削抵抗が生じる切れ刃面積率を作り得ない。一方、目直し条件や方法を変える調節では、寿命時における連続切れ刃間隔はせいぜい 2 ~ 3 mm であり、著者らが開発した特殊目直し装置を使用しても 5 mm 程度である⁸⁾。したがって、一般のビトリファイド砥石では粗な分布と同時に大きな切れ刃面積率を作ることは困難であると考えられる。そこで、本研究では、砥粒の保持力が強いメタルボンドを用いることにより、従来の砥

石では得難い粗な連続切れ刃間隔（約15mm程度）と同時に大きな切れ刃面積率を作成した。

表4-1および図4-1にメタルボンド砥石の圧縮、焼結条件および圧縮成形法を示す。

なお、これらの圧縮、焼結条件はあらかじめ予備実験や簡単な応力解析を行ない、砥石の安全性や焼結状態

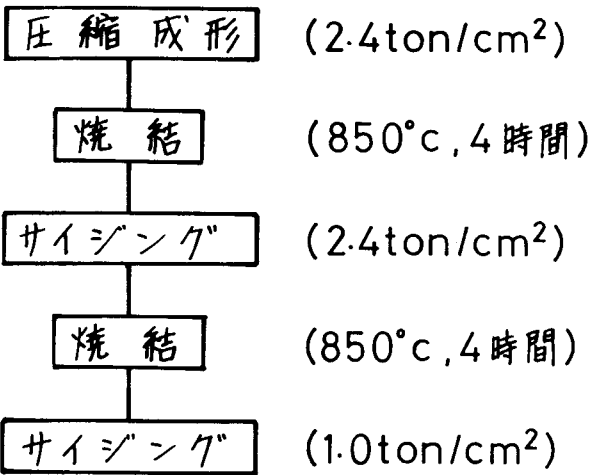


図4-2 メタルボンド砥石の製作法

表4-2 メタルボンド砥石の諸寸法

外 径	内 径	幅
180 mmφ	150 mmφ	10 mm

を知ることによって定めたものである。圧縮には、200ton電子管万能試験機を用い、焼結は窒素雰囲気中で行なった。以上の過程を経た後、砥石の安全性を高めるため、図4-2に示すような過程でサイジングを行ないボンド密度の上昇をはかった。製作された砥石の寸法は表4-2に示す通りである。

このような過程で製作された砥石の作業面に砥粒を顕出させる方法としては電解研磨を用いた。電解研磨に際しては、砥粒を台金に取り付け、研削盤のドレッサーで作業面を切削し、砥石の偏心を取り除いた。そして図4-3に示す

ように台金に取り付けたまま表 4-3 の電解研磨条件で、陰極として直径 200 mm のリング状電極を用いて、砥石表面からボン

ドが均一に除去されるように電解研磨を施した。なお、砥石作業面以外の場所は研磨されないように絶縁塗料をぬった。

2-2

実験方法

実験は大部分表 4-4 の研削条件で行なったが、一部異なる場合にはそれぞれの場合に記す。なお、目直し条件が A46M 砥石とメタルボン

ド砥石で異なるのは、メタルボン

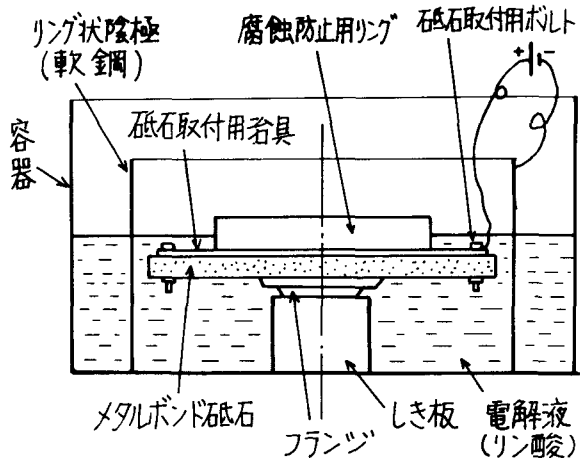
ド砥石の場合には荒い目直しを施すと実験結果で示すように、寿命に至るまでの研削長が長すぎるので、実験をより容易にするためメタルボン

ド砥石には細かい目直しを施したためである。

連続切れ刃間隔および切れ刃面積率は図 4-4 に示すように、実体顕微鏡を

表 4-3 電解研磨条件

電 解 液	リ ン 酸
電 流 密 度	0.15A/cm ²
時 間	約 2 時 間



研削盤に取り付け、光源と顕微鏡を正反射の位置関係にくるようにし、第2章で述べたような格子を切ったフィルムを接眼レンズの中に入れることによって測定した。

この際の最小目盛は48 μ 、線の幅は5 μ であり、線の幅は切れ刃の摩耗幅よりも十分小さいので、線

表 4 - 4 研削条件

使用砥石	メタルボンド砥石 A#10, 砥粒率40%。 メタルボンド砥石 A#20, 砥粒率40%。 A46M7V10W
研削条件	ユング研削盤 砥石周速度: 2000m/min テーブル送り速度: 8m/min 切込み: 10 μ /stroke
目直し条件	ドレッサー: 単粒ダイヤモンドドレッサー 先端磨耗幅 1.2mm ドレッサー切込み 2.5 μ (メタルボンド砥石) 10 μ (A46M) ドレッサー送り 20 μ /rev (メタルボンド砥石) 170 μ /rev (A46M)
振削材	SK3 (焼入れ Rc $\approx$ 60) (幅10mm, 長さ100mm)
研削方式	乾式フランチカット方式

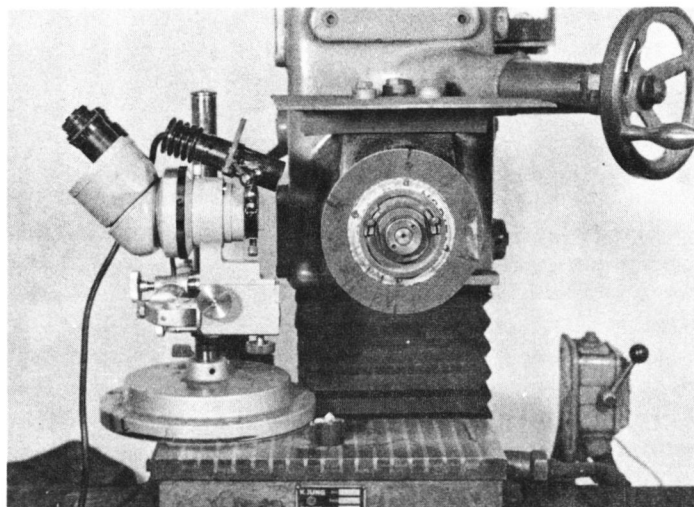


図 4 - 4 切れ刃観測装置

の幅による誤差はほとんどないものと考えられる。研削抵抗は第2章に示した八角リングを使用した。また、仕上面あらさは小坂式触針仕上面あらさ計で測定した。

なお、研削焼け発生時の連続切れ刃間隔および切れ刃面積率の測定は、研削焼けが工作物全面にわたって瞬間的に生じることは少なく、一部に焼けが生じ、それが広がる方が多いので、焼けた部分の切れ刃面積率や連続切れ刃間隔を測定した。

3 砥石作業面性状による砥石の研削寿命の定量的基準

3-1 砥石作業面性状と砥石の研削寿命

メタルボンド砥石A #10（砥粒率40%）、A #20（砥粒率40%）およびA46M砥石の研削過程における切れ刃分布と形状の変化を連続切れ刃間隔と切れ刃面積

率を対応さ

せて図4-

5に示す。

各砥石にお

いて、連続

切れ刃間隔

が最も長い

点は連続切

れ刃間隔お

よび切れ刃

面積率の測

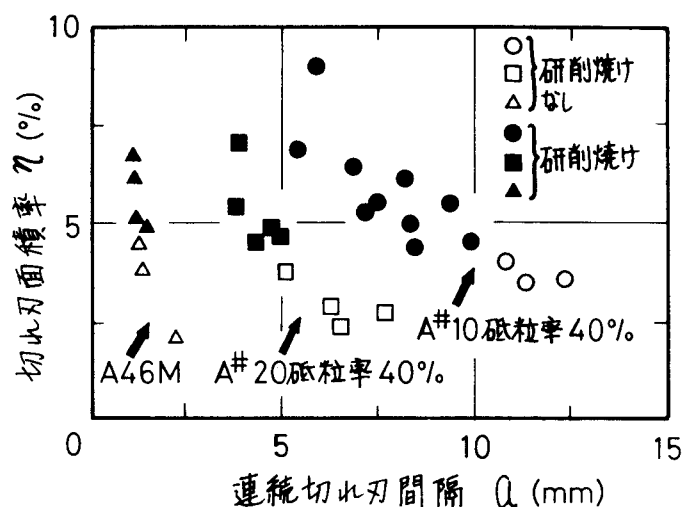


図4-5 砥石作業面性状と研削焼けの関係

定開始点であり、白点と黒点は研削焼けの有無を表わしている。図において、研削過程が進むにつれて、連続切れ刃間隔は減少、すなわち、右から左へ移動し、切れ刃面積率は増加している。A #10 のメタルボンド砥石のように非常に粗な切れ刃分

布をもつ砥石がこのような結果を示すことは、連続切れ刃間隔が長くても切れ刃の破壊は少なく、巨視的には切れ刃が摩耗していくことを示す。

研削焼けはこの摩耗過程の途中で生じ、その時点における切れ刃面積率はほぼ一定値約 4.5 % で、連続切れ刃間隔にはほ

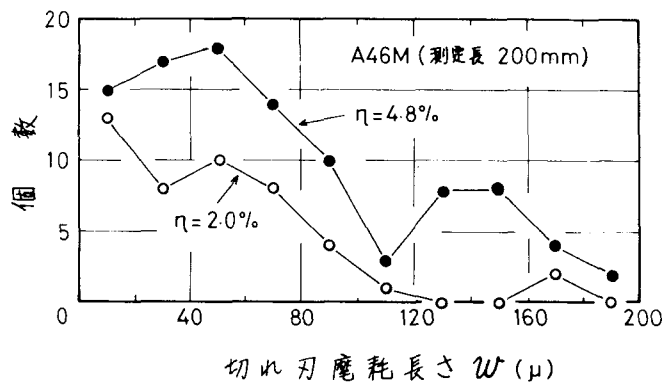


図 4 - 6 切れ刃磨耗長さの分布
(A46M 砥石)

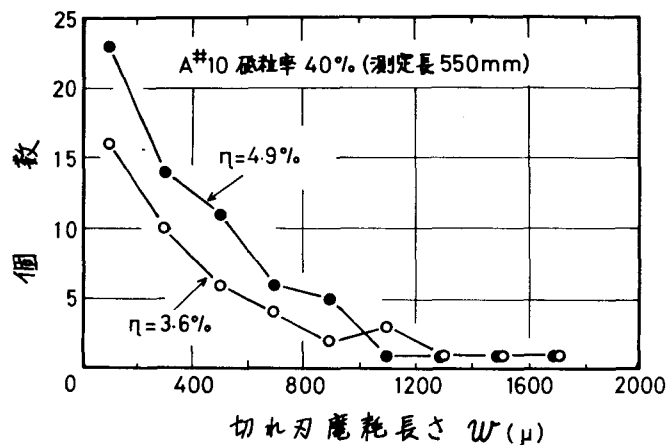


図 4 - 7 切れ刃磨耗長さの分布
(A #10 メタルボンド砥石)

とんど無関係である。この結果、研削焼けは砥石作業面上における任意の一円周上に存在する切れ刃群がもつ切れ刃の摩耗長さの総和（切れ刃面積率）と対応して生じることが考えられる。なお、大きな摩耗長さをもつ切れ刃による工作物表面の温度上昇によって研削焼けが生じる可能性も考えられるのでこれを検討する。

図4-6および図4-7はA46M砥石およびA #10メタルボンド砥石の研削焼けが発生した場合と発生していない場合の切れ刃摩耗長さの分布を比較したものである。図において、切れ刃面積率4.8%または4.9%の方が研削焼けが発生し

ている場合である。A #10のメタルボンド砥石における研削焼けが生じていない場合とA46M砥石の研削焼けが生じている場合を比較すると、切れ刃摩耗長さは明らかにメタルボンド砥石の方が大きい。また、焼けが生じる場合と

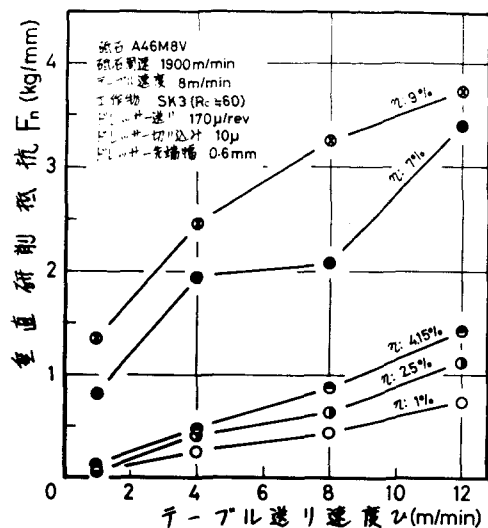


図4-8 テーブル送り速度と垂直研削抵抗の関係

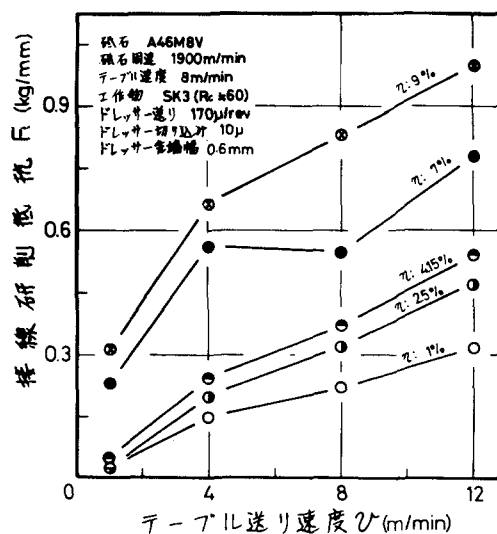


図4-9 テーブル送り速度と接線研削抵抗の関係

生じない場合の同じ砥石の最大切れ刃摩耗長さの個数には大きな変化はない。これらの結果から、研削焼けは一個の摩耗長さの大きい切れ刃によって生じるのではなく、摩耗切れ刃群による熱集積によって生じることがわかる。以上の結果は、吉川が切れ刃面積率と研削抵抗の関係から、切れ刃面積率8%附近を砥石の寿命としている報告⁶⁾と定性的には一致する。

そこで、次に切れ刃面積率と研削抵抗の関係を調べてみた。図4-8および図4-9は切れ刃面積率をパラメータとし、テーブル送り速度と工作物単位幅当りの垂直および接線研削抵抗の関係を示したものである。図において、切れ刃面積率

4%を過ぎて少量研削後、全てのテーブル送り速度で研削焼けが発生した。図

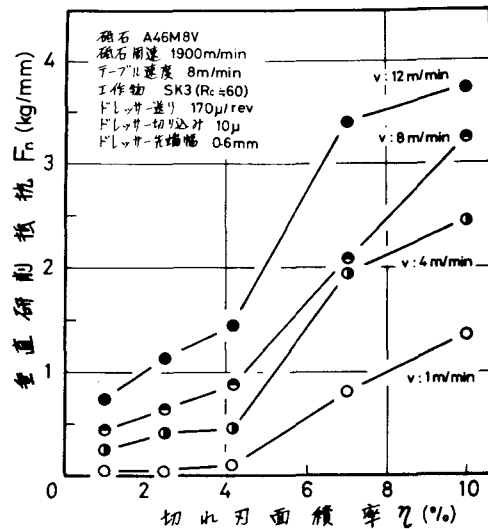


図4-10 切れ刃面積率と垂直研削抵抗の関係

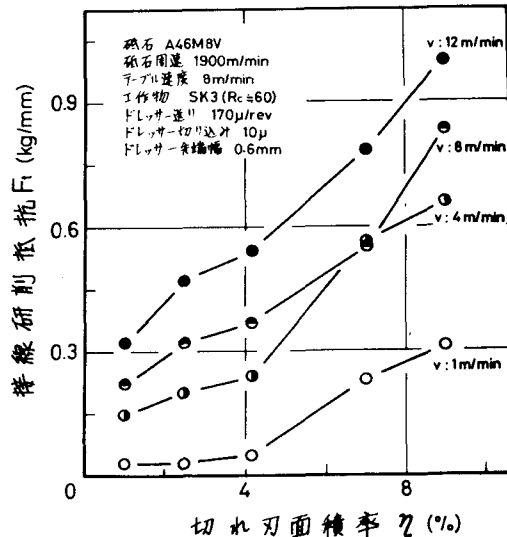


図4-11 切れ刃面積率と接線研削抵抗の関係

より、研削焼けが生じる前後の4%および7%で研削抵抗に大きな変化がみられるが、研削焼けが発生する研削抵抗はテーブル送り速度によって異なっていることがわかる。また、切れ刃面積率が一定の場合には、テーブル送り速度が速くなるにしたがって、研削抵抗が増加することがわかる。図4-10および図4-11は切れ刃面積率に対する研削抵抗の急変をより明確にするために、図4-8および図4-9の結果を切れ刃面積率と研削抵抗の関係に書き変えたものである。切れ刃面積率4%附近までは、切れ刃面積率と研削抵抗とは近似的に直線関係にあるが、切れ刃面積率4%附近から研削抵抗は急増しており、吉川の報告⁹⁾と定性的に一致する。しかし、4%附近での研削抵抗はテーブル送り速度が速くなるにしたがって増加しており、この点では吉川の実験結果とは異なる。テーブル送り速度が速くなると研削抵抗が増加するのは従来の報告¹⁰⁾にもあり、本実験の結果と一致するが、その物理的意味は明らかでない。すなわち、同一砥石作業面性状でテーブル送り速度のみを変えれば、個々の切れ刃の砥粒切り込み深さないしは切り屑断面積が変化し、その結果、研削抵抗が変化するとも考えられる。しかし、図4-12に示すようにメタルボンド砥石を使用して連続切れ刃間隔を変え、砥粒切り込み深さを変えても研削抵抗は大きな変化をせず、テーブル速度によって研削抵抗が変化する物理的意味は本研究では明らかにし得ない。ただし、テーブル送り速度を速くするのと、連続切れ刃間隔を長くするのとでは、砥粒切り込み深さは同じように大きくはなるが、その際に生成される切り屑の形状ないしは平均切り屑断面積はテーブル速度の変化と連続切れ刃間隔の変化とは異なるので、その影響があるものとは推察される。物理的内容は明らかではないが、テーブル速度を変えれば垂直研削抵抗が変ることから、切れ刃と工作物の平均接触圧力が変化することは考えられる。切れ刃すくい面ないしは側面での接触面積は切れ刃逃げ面での接触面積に

比較して非常に小さいので、垂直研削抵抗の変化は切れ刃逃げ面の大きさから考えると、後述するように、切れ刃逃げ面での接触圧力の総和が変化と対応するためである。ただし、このように考えると、

テーブル送り速度が遅くなれば平均接触圧力が低くなるので、摩擦

係数を一定とすると、切れ刃面積率一定では、切れ刃逃げ面での摩擦力が減少するにもかかわらず研削焼けが生じるのが問題となる。このことについては、テーブル送り速度が遅くなれば単位時間、単位面積当りの工作物を通過する切れ刃数が増加し、熱エネルギーは大きな変化をしない結果と考えられる。

研削抵抗がある切れ刃面積率になると急上昇するのは、吉川の考察⁶⁾によるとその附近では上すべりする切れ刃、すなわち、無効切れ刃が急速に増加し、その結果、研削抵抗が増大するためとされているが、本実験の結果ではテーブル送り速度を変えても切れ刃面積率一定の附近で研削抵抗が急変していることから考えると、上すべりの影響は少ないものと考えられる。なぜなら、テーブル送り速度を遅くすると砥粒切り込み深さは小さくなり、したがって、上すべりする切れ刃はテーブル送り速度が速い場合よりも切れ刃面積率が少ない状態で増加が激しくなり、研削抵抗が急変するはずであるが、そのような傾向はみられ

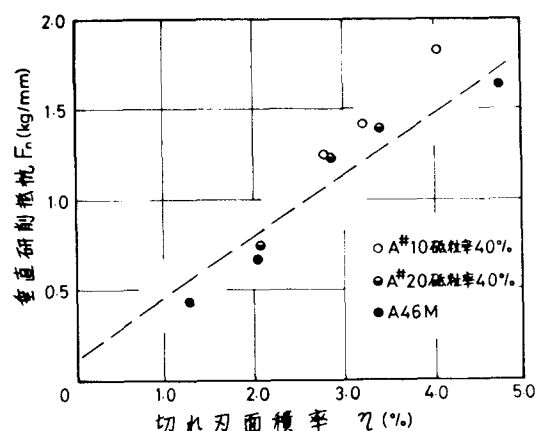


図 4-12 垂直研削抵抗におよぼす切れ刃摩耗面の大きさの影響

ない。それゆえ、研削抵抗が急上昇するのは、上すべりの影響も考えられるが、前章で述べたように研削焼けによる工作物表面硬度の変化が大きく影響しているものと考えられる。

したがって、目直し後、研削を行なうと切れ刃が摩耗し、切れ刃面積率が増加する。同時に、砥石半径減耗量および研削抵抗も増加し、ある研削抵抗になる切れ刃面積率で、研削焼けが現われ始める。その結果、工作物表面性状が変化し、砥石半径減耗量および研削抵抗が急激に増加するようになる。砥石半径減耗量、研削焼け、研削抵抗を寿命判定基準とする砥石の研削寿命点は、上述のどの寿命判定基準を用いても同じであり、目直し間寿命はほぼ同じになるであろう。

3-2 砥石作業面性状からみた研削焼けの熱的解析

3-2-1 切れ刃にかかる平均研削抵抗

研削焼けは切れ刃によって工作物を切削、塑性流動したり、切れ刃と工作物が弾性接触（極く微視的には切れ刃の先端で塑性接触していると考えられるので熱発生があると考え）する際に発生する熱量が工作物に残存し、集積することによって工作物表面上

に発生する。詳述すると、工作物表面上に残存する熱によって工作物の酸化が著しくなり、その酸化膜の干渉色が研削焼けとして見いだされる。それゆえ、砥石作業面性状と研削焼けとを関連づけるためには、個々

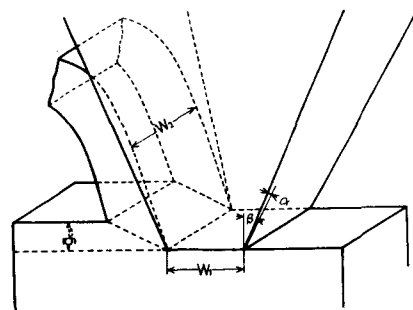


図4-13 切れ刃および切れ刃による切削時の模型図

の切れ刃によって発生する熱量、その熱量の工作物に残存する割合、工作物の酸化時間を明らかにする必要がある。個々の切れ刃に発生する熱量は個々の切れ刃がなす仕事量、すなわち、個々の切れ刃にかかる研削抵抗とその持続時間を明らかにすることによって求められる。そこで、本項では切れ刃にかかる平均研削抵抗を求める。

切れ刃にかかる研削抵抗を求めるにあたって次の仮定を置く。

- (1)切れ刃すくい面および側面にかかる接触圧力は切れ刃と工作物が弾性接触している際には、その時点の工作物の弾性応力 σ_e と接触面積で、また、切削の際の切れ刃側面および塑性流動の際のすくい面と側面はBowden - Taborの押し込み理論¹⁾が成り立ち、工作物の塑性流動応力 σ_p と接触面積によって決定される。
 - (2)切削の状態の切れ刃すくい面にかかる力は旋削におけるバイトのすくい面にかかる力と同様に考え得る。
 - (3)切れ刃逃げ面の接触圧力は切削および塑性流動の場合には工作物の塑性流動応力と逃げ面面積によって、また、弾性接触の状態では、その時点の工作物の弾性応力 σ_e と逃げ面面積によって決定される。
 - (4)切れ刃のモデルとして図4-13に示すような角錐台モデルを使用する。
- (i)切れ刃が工作物を切削している場合

$$f_{Nc} = \sigma_{sn} \cdot w' \cdot w_2 \cdot \cos \phi - \sigma_{st} \cdot w' \cdot w_2 \cdot \sin \phi + 2 \sigma_p \cdot \overline{g_{cs}} \cdot w_1 \cdot \tan \alpha \\ + \sigma_p \cdot w_1 \cdot w_2 \quad \dots\dots\dots (4-1)$$

上式において、 f_{Nc} ：切れ刃が工作物を切削している状態での切れ刃にかかる垂直研削抵抗 (kg/個)

σ_{sn} : 切り屑せん断面にかかる圧縮応力 (kg/mm²)

σ_{st} : 切り屑せん断面にかかるせん断応力 (kg/mm²)

σ_p : 工作物の塑性流動応力 (kg/mm²)

$\bar{g}_{cs}$: 切れ刃が工作物を切削している状態での切れ刃と
工作物の切れ刃側面での接触高さ (mm)

w_1, w_2 : 切れ刃側面およびすくい面の長さおよび幅
(mm)

w' : 切り屑せん断長さ (mm)

ϕ : せん断角

α : 切れ刃側面と研削に平行な面とのなす角

第1項、第2項においてせん断角 ϕ は切れ刃の研削長 ℓ と切り屑の長さから求めた小野の概念¹²⁾を使用し、さらに、前章で求めた切れ刃の統計的幾可学形状から求めた切れ刃すくい角が -60° 以上であることを考えると、 10° 以下と考えられ、 $\sin \phi \approx 0$ 、 $\cos \phi \approx 1$ とし得る。したがって、 σ_{sn} と σ_{st} は数値的に大きな差は考えられないので、第2項は第1項に対して無視し得る。次に、第3項の切れ刃と工作物の接触高さ $\bar{g}_{cs}$ は幾可学計算から求まる平均砥粒切り込み深さをを用いると 1μ 以下であり、また盛り上がり等を考慮に入れて非常に大きな場合を考えても数 μ 程度であり、極端な場合の仕上面あらさと砥石切り込み量の和をとったとしても十数 μ である。これに対して、切れ刃の平均摩耗面の長さ $\bar{w}$ の大きさは切れ刃面積率 η を1%、切れ刃密度 n_p を5 (個/mm²)としても、

$$\eta = n_p \cdot \overline{w}^2 \times 10^2 \quad \dots\dots\dots (4-2)$$

より、数十 μ になる。それゆえ、一般に $\overline{g}_{cs}$ は w_1, w_2 に比較して非常に小さいと考えられ、また、 α は前章の結果より -60° 程度以上であるため $\tan \alpha < 2$ 以下であるので、第3項は第4項に比較して無視し得る。したがって、(4-1)式は近似的に次式で表わされる。

$$f_{Nc} \rightleftharpoons \sigma_{sn} \cdot w' \cdot w_2 + \sigma_p \cdot w_1 \cdot w_2 \quad \dots\dots\dots (4-3)$$

(ii)切れ刃が工作物を塑性流動する場合

$$f_{Np} = \sigma_p \cdot w_1 \cdot w_2 + 2 \sigma_p \cdot \overline{g}_{pf} \cdot w_1 \cdot \tan \alpha + \sigma_p \cdot \overline{g}_{ps} \cdot w_2 \cdot \tan \beta \quad \dots\dots\dots (4-4)$$

上式において、 f_{Np} : 切れ刃が工作物を塑性流動させている状態での切れ刃にかかる垂直研削抵抗
(kg/個)

$\overline{g}_{pf}, g_{ps}$: 切れ刃が工作物を塑性流動させている状態での切れ刃すくい面および側面の切れ刃と工作物の接触高さ (mm)

β : 切れ刃のすくい角

(4-4)式においても前式同様、近似的に次式で表わされる。

$$f_{Np} \rightleftharpoons \sigma_p \cdot w_1 \cdot w_2 \quad \dots\dots\dots (4-5)$$

iii) 切れ刃工作物上を弾性接触状態ですべる場合

$$f_{Ne} = \sigma_e \cdot w_1 \cdot w_2 + 2 \sigma_e \bar{g}_{ef} \cdot w_1 \cdot \tan \alpha + \sigma_e \cdot \bar{g}_{es} \cdot w_2 \cdot \tan \beta$$

..... (4-6)

上式において、 f_{Ne} : 切れ刃と工作物が弾性接触している状態
での切れ刃にかかる垂直研削抵抗
(kg/個)

$\bar{g}_{ef}$ 、 $\bar{g}_{es}$: 切れ刃と工作物が弾性接触している状態
での切れ刃すくい面および側面の切れ刃
と工作物の接触高さ (mm)

近似的に $f_{Ne} \rightleftharpoons \sigma_e \cdot w_1 \cdot w_2$ (4-7)

以上のことから、砥石と工作物の単位接触面積当りの垂直研削抵抗 F_n は砥石と工作物との接触面積に含まれる切削、塑性、弾性の切れ刃の割合を k_c 、 k_p 、 k_e とし、切れ刃密度を n_p とすると、

$$F_n \rightleftharpoons (k_c \cdot \sigma_p + k_p \cdot \sigma_p + k_e \cdot \sigma_e) \cdot w_1 \cdot w_2 \cdot n_p + k_c \cdot n_p \cdot \sigma_{sn} \cdot w' \cdot w_2$$

..... (4-8)

で表わされ、(4-2) 式を代入すると、

$$F_n \rightleftharpoons (k_c \cdot \sigma_p + k_p \cdot \sigma_p + k_e \cdot \sigma_e) \eta \times 10^{-2} + k_c \cdot n_p \cdot \sigma_{sn} \cdot w' \cdot w_2$$

..... (4-9)

となる。ここで、工作物を除去するための垂直研削抵抗、すなわち、(4-9)式の第2項は切れ刃のすくい角が変化しなければ同じである。それゆえ、前章の結果によれば切れ刃の統計的幾何学形状は研削過程において変化しないので、第2項は研削過程において一定であるといえる。いいかえれば、研削過程が進むにつれて、切れ刃の摩耗面の大きさが増加するので w_2 は増加し、一つの切れ刃によって排出する切り屑の大きさは増加するが、全排出切り屑量は同一であるため、上すべりする切れ刃が増加するといえる。それゆえ、(4-9)式は、

$$F_n \approx (k_c \cdot \sigma_p + k_p \sigma_p + k_e \sigma_e) \eta \times 10^{-2} + C_1 \dots\dots\dots (4-10)$$

となる。(4-10)式において、研削が進むにつれて、大きな摩耗面をもつ切れ刃が増加し、上すべりする切れ刃が増加し、

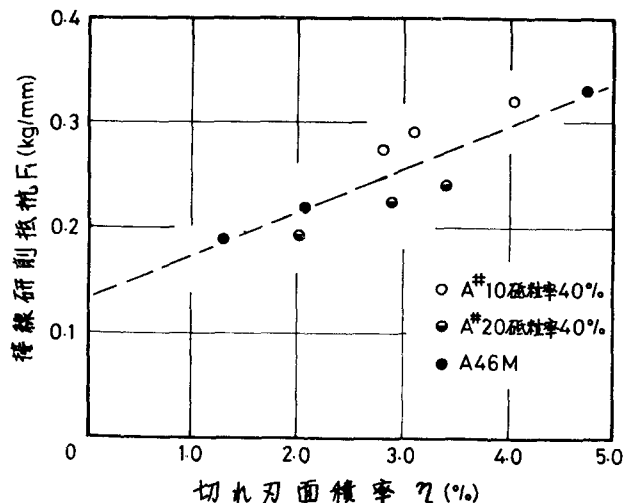


図 4-14 接線研削抵抗におよぼす切れ刃摩耗面の大きさの影響

k_c 、 k_p 、 k_e の割合が変化することが考えられる。この結果、切れ刃逃げ面と工作物との接触による垂直研削抵抗、すなわち、第1項は切れ刃の摩耗面の大きさに影響されることになるが、図4-12の結果から考えてその影響は少ないものと考えられる。すなわち、図4-12において切れ刃分布を大幅に変化させても切れ刃面積率が一定ならば垂直研削抵抗はほぼ一定であり、(4-10)式の第2項が一定なので、切れ刃の摩耗面の大きさによる影響は少ないと考えられる。それゆえ、切れ刃逃げ面における平均接触圧力 P は、弾性応力 σ_e が塑性応力 σ_p よりかなり小さいものと考えられるので、

$$\begin{aligned} P &\approx (k_c + k_p) \sigma_p + k_e \sigma_e \\ &\approx (k_c + k_p) \sigma_p \quad \dots\dots\dots (4-11) \end{aligned}$$

のように表わされ、研削過程における $k_c + k_p$ は近似的に一定とみなせる。この結果、 P は砥石作業面性状に無関係な定数と考えることができる。したがって、一つの切れ刃にかかる平均垂直研削抵抗 f_n は、

$$f_n \approx \frac{F_n}{n_p} = \frac{10^{-2} P \eta + C_1}{n_p} \quad \dots\dots\dots (4-12)$$

で表わされる。

本実験の場合の f_n は、図4-13より単位研削幅当りの研削抵抗 F_N が近似的に、

$$F_N \approx m\eta + n \quad \dots\dots\dots (4-13)$$

ここで、 $m = 0.33 \text{ (kg/mm} \cdot \%)$

$n = 0.1 \text{ (kg/mm)}$

で表わされるので、接触孤を ℓ_c とすれば、

$$\begin{aligned} f_n &= \frac{F_n}{n_p} \\ &= \frac{F_N}{n_p \cdot \ell_c} \dots\dots\dots (4-14) \end{aligned}$$

となり、本実験条件より幾何学的に計算した $\ell_c \approx 1.3 \text{ mm}$ を代入すると、次式で表わされる。

$$f_n \approx \frac{0.257 + 0.072}{n_p} \dots\dots\dots (4-15)$$

同様な考え方から、一つの切れ刃にかかる平均接線研削抵抗 f_t は、

$$\begin{aligned} f_t &\approx \mu P \cdot w_1 \cdot w_2 + \frac{C_2}{n_p} \\ &= \frac{\mu P \times 10^{-2} + C_2}{n_p} \dots\dots\dots (4-16) \end{aligned}$$

ここで、 μ ：切れ刃逃げ面における切れ刃と工作物の摩擦係数

となり、図4-14より

$$f_t \approx \frac{0.037 + 0.092}{n_p} \dots\dots\dots (4-17)$$

で表わされる。

3-2-2 切れ刃面積率と研削焼け

一個の切れ刃により被削材の単位面積に与えられる熱量 q は平均的にみて全ての切れ刃が切り屑を排出すると仮定すれば、

$$q = q_s + q_{ff} + q_r + q_{fs} \quad \dots\dots\dots (4-18)$$

ここで、 q_s : 切り屑のせん断による熱量 (cal)

q_{ff} : 切れ刃すくい面での摩擦による熱量 (cal)

q_r : 切れ刃逃げ面での摩擦による熱量 (cal)

q_{fs} : 切れ刃側面での摩擦による熱量 (cal)

と考えられる。この中で、すくい面での摩擦による熱量のほとんどは切り屑に奪われてしまうと考えられる。また、 q_{fs} は切れ刃側面の接触面積が逃げ面と比較して非常に小さいので、 q_r に対して無視し得る。したがって、(4-18) 式は近似的に次式で表わされる。

$$q \approx q_s + q_r \quad \dots\dots\dots (4-19)$$

切り屑せん断面で発生する熱量 q_s' は (4-16) 式より、

$$q_s' = \frac{C_2 \cdot \ell_c}{10J \cdot n_p} \quad \dots\dots\dots (4-20)$$

ここで、 J : 熱の仕事当量 (kg · cm/cal)

また、切れ刃逃げ面で発生する熱量 q_r' は、

$$q_r' = \frac{1}{J} \cdot \mu \cdot P \cdot w_1 \cdot w_2 \cdot \ell_c \quad \dots\dots\dots (4-21)$$

で表わされる。

これらの q_s' および q_1' の一部は工作物へ残りが切り屑ないしは切れ刃に流入するが、J.O.Jaeger¹³⁾によれば流入割合 α_s は次式によって求められる。

$$\alpha_s = \frac{k_1 \sqrt{L_1}}{0.796 k_2 + k_1 \sqrt{L_1}} \quad \dots\dots\dots (4-22)$$

ただし、

$$L_1 = \frac{V \ell}{2 K_1} > 5 \quad \dots\dots\dots (4-23)$$

ここで、 k_1 : 工作物の熱伝導率 $(cal/cm \cdot sec^{\circ}C)$

k_2 : スライダの熱伝導率 $(cal/cm \cdot sec^{\circ}C)$

$$k_1 = \frac{K_1}{C_1 \rho_1}$$

K_1 : 工作物の温度伝導率 (cm^2/sec)

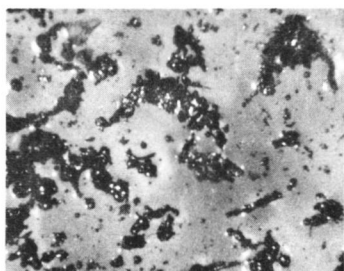
C_1 : 工作物の比熱 $(cal/g^{\circ}C)$

ρ_1 : 工作物の密度 (g/cm^3)

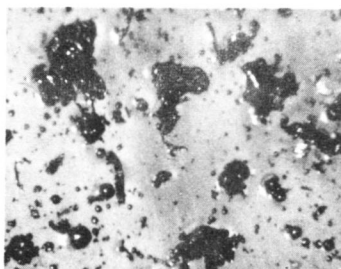
V : スライダの速度 (cm/sec)

2ℓ : スライダの長さ (cm)

切り屑せん断面におけるスライダとしては長さ w' 、幅 w_2 の切り屑が考えられ、また、切り屑せん断速度 V_s は、

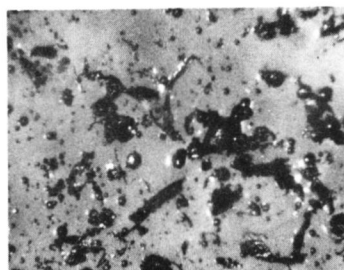


$L = 1\ m$

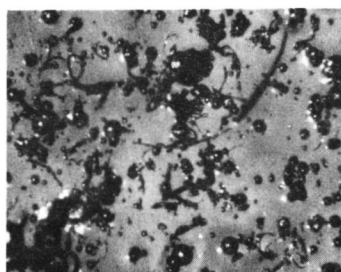


$L = 70\ m$

(a) A #10 (砥粒率40%)

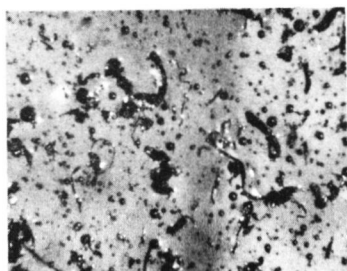


$L = 1\ m$

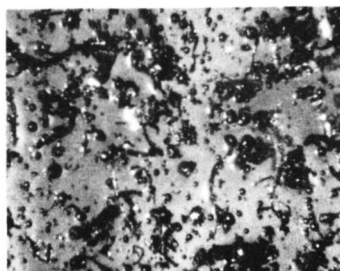


$L = 70\ m$

(b) A #20 (砥粒率40%)



$L = 1\ m$



$L = 20\ m$

(c) A46M

200 μ

図4-15 切りくずの観察

$$V_s = V \cdot \frac{\cos \beta}{\cos (\phi + \beta)} \rightleftharpoons V$$

と表わされる。 w' は図4-13より

$$w' = \bar{g}_{cs} \operatorname{cosec} \phi$$

であるので、

$$g_{cs} = 2 \times 10^{-4}$$

(cm)、 ϕ は

少し大きめに

考えて $\phi = 10^\circ$

とすると、 w'

$$= 7 \times 10^{-4}$$

(cm)を得る。

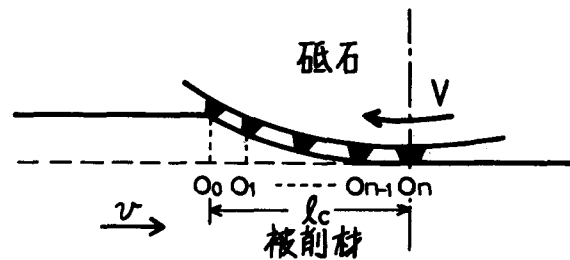


図4-16 切れ刃と工作物の接触模型図

せん断面にお

ける熱伝導率

は $k_1 = k_2$ と考えられるので、 $C_1 \rightleftharpoons 0.11$, $\rho \rightleftharpoons 0.79$ とし、工作物への流入割合 α_s を求めると、 $L \rightleftharpoons 8.4$ より、 $\alpha_s = 0.78$ である。実際には、切り屑の熱容量は非常に小さいので、切り屑温度が上昇し、工作物の熱伝導率よりもかなり小さくなる*。また、寿命時の切り屑が図4-15に示すように 大きいことから $\bar{g}_{cs}$ もかなり大きくなると思われるので、 α_s はさらに 大きくなること

* 温度が上昇すると熱伝導率は小さくなる

が考えられる。同様にして、切れ刃逃げ面での摩擦熱量の工作物への流入割合を求めると、 $\alpha_s \approx 1$ である。以上のことから、一個の切れ刃により被削材に与えられる平均の熱量 q' は近似的に、

$$q' \approx 0.8 q_s' + q_r' \quad \dots\dots\dots (4-24)$$

$$\approx \frac{1}{J} \left(\frac{8 C_2 \cdot \ell_c}{n_p} \times 10^{-2} + \mu \cdot P \cdot w_2 \cdot \ell_c \times 10^{-1} \right) \quad \dots\dots\dots (4-25)$$

である。したがって、一つの切れ刃によって工作物の単位面積に与えられる熱量 q は次のように表わされる。

$$q = \frac{q'}{w_2 \cdot \ell_c} = \frac{1}{J} \left(\frac{8 C_2}{n_p \cdot w_2} \times 10^{-2} + \mu \cdot P \cdot w_1 \times 10^{-1} \right) \quad \dots\dots\dots (4-26)$$

そこで、次に、この熱量が工作物表面に全て蓄積されると考えて、工作物表面の熱蓄積量を考えてみる。工作物がテーブル送り速度 v で移動しているとき、図4-16に示すように、研削面上の一点 O_0 が O_n まで移動する間に砥石は $\ell_c v / v$ の距離だけ回転するので、工作物が切れ刃から受ける熱量 Q は、連続切れ刃間隔を a とすると、次式で表わされる。

$$Q \approx q \cdot \frac{\ell_c \cdot v}{v \cdot a}$$

$$= \frac{\ell_c \cdot v}{J \cdot v \cdot a} \left(\frac{8 C_2}{n_p \cdot w_2} \times 10^{-2} + \mu \cdot P \cdot w_1 \times 10^{-1} \right) \quad \dots\dots\dots (4-27)$$

(83)

上式から研削焼けを考えると、研削焼けは切れ刃がかなり摩耗した状態で生じ、上式の第1項は切れ刃が摩耗すると熱量が減少するので、研削焼けは第2項の影響によって生じることがわかる。すなわち、研削焼けが生じる熱量 Q_b は次式で表わされる。

$$Q_b \approx \frac{\mu \cdot P \cdot \ell_c \cdot V \cdot w_{1b}}{J \cdot v \cdot a_b} \times 10^{-1} \quad \dots\dots\dots (4-28)$$

ここで、 w_{1b} : 研削焼けが生じる時の w_1

a_b : 研削焼けが生じる時の連続切れ刃間隔

切れ刃面積率 η (%) は、

$$\eta = \frac{w_1}{a} \times 10^2 \quad \dots\dots\dots (4-29)$$

でも表わされるので、(4-28)式は、

$$Q_b \approx \frac{\mu \cdot P \cdot \ell_c \cdot V \cdot \eta_b}{J \cdot v} \times 10^{-3} \quad \dots\dots\dots (4-30)$$

ここで、 η_b : 研削焼けが生じる時の切れ刃面積率 (%)

となり、研削焼けの熱量 Q_b は同一研削条件ならば、切れ刃面積率一定値で生じる。また、他の条件が一定ならば送り速度に反比例し、接触圧力に比例するので、図4-10にみられるように、送り速度が遅くなり、垂直研削抵抗が小

さくなくても、研削焼けが生じることがわかる。

3-3 砥石の目直し間寿命の数式化

前項までの結果から、研削抵抗、研削焼けおよび砥石半径減耗量を寿命判定基準とする砥石の寿命は砥石作業面性状からみれば切れ刃面積率一定の値で表わし得ることがわかった。そこで、次に、目直し直後から寿命までの研削長 L_f を第3章の結果を用いて数式化してみる。

(3-6) 式より、砥石半径減耗量 ΔR は

$$\Delta R = \frac{\sqrt{\eta_l} - \sqrt{\eta_2}}{\sqrt{\pi \cdot n_p} \cdot \tan \theta} \times 10^2 \quad \dots\dots\dots (4-31)$$

ただし、 ΔR : (μ)、 n_p : (個/ mm^2)、 η : (%)

と表わせるから、寿命点における研削長および切れ刃面積率を L_f (m) および η_f とし、脆弱層を除去するのに必要な研削長を C (m) とすれば、(3-2) 式より、

$$L_f = \frac{\sqrt{\eta_f} - \sqrt{\eta_c}}{\Delta R_1 \cdot \sqrt{\pi \cdot n_p} \cdot \tan \theta} \times 10^2 + C \quad \dots\dots\dots (4-32)$$

ここで、 η_c : 研削長 C における切れ刃面積率

となる。前項までの結果より、砥石寿命時の切れ刃面積率 η_f が一定値であることを見出し、また、 ΔR_1 、 n_p 、 η_c 、 θ は目直し条件によって決定される定数であることを示したので、目直し条件を決定することによって、砥石の寿命が決定し得ることが (4-32) 式よりわかる。表4-5は、寿命時の切

れ刃面積率を4%とし、第3章で求めた各定数を(4-32)式に代入して計算した目直し間寿命と研削焼けが生じるまでの研削長とを比較したものであるが、両者は非常に良く一致していることがわかる。

表4-15 砥石の研削寿命

ドレッサ- 送り速度 (μ rev)	ドレッサ- 切り込み (μ)	寿命 (推定) (m)	寿命 (実験) (m)
170	10	13	15
170	30	22	22
170	50	23	25
360	10	18	22
360	30	35	25
360	50	37	35

4 砥石作業面性状と仕上面あらさ

研削過程における仕上面あらさの変化を図4-17に示す。各砥石とも研削初期には仕上面あらさが良く、研削過程が進むにつれて仕上面あらさが悪化し、その後一定値になる傾向がある。また、仕上面あらさはA46M→A[#]20→A[#]10の順で砥粒が大きくなるにつれて悪くなり、とくに研削過程がある程度進んだ状態ではA46M砥石に比較してメタルボンド砥石の仕上面は非常に悪くなっている。

図4-18は

研削初期と寿命附近の砥石による仕上面を観察したものである。研削初期では仕上面を形成している研削条痕の幅は砥石

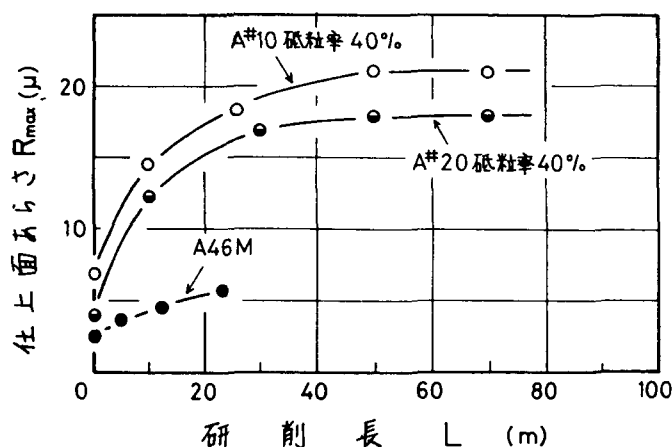
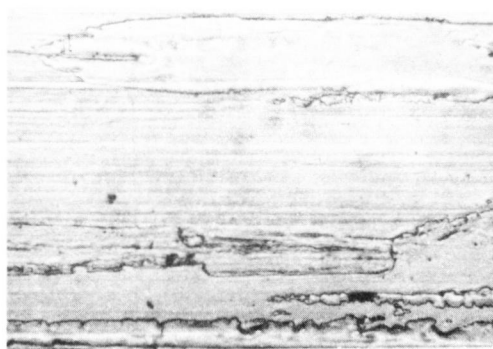


図4-17 研削過程における仕上面あらさの変化



$L = 1\ m$

(a) A #10 (砥粒率 40%)

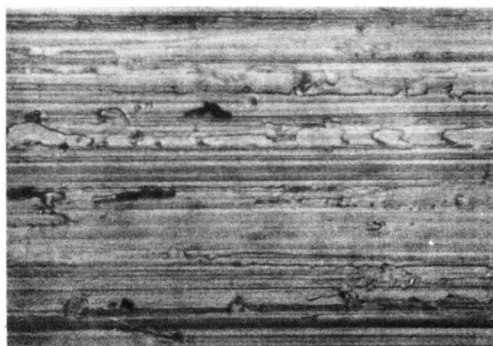


$L = 70\ m$

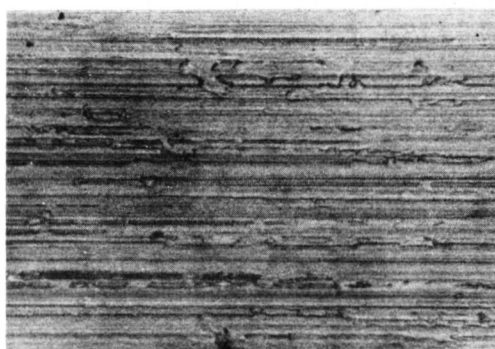


$L = 1\ m$

(b) A #20 (砥粒率 40%)

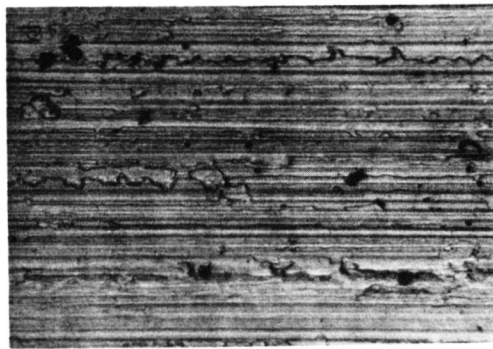


$L = 70\ m$



$L = 1\ m$

(c) A46M



$L = 20\ m$

研削方向
←

100 μ

図4-18 仕上面の観察

によって大きな差は認められないが、メタルボンド砥石の研削距離70mとA46Mの研削距離20mを比較すると大きな差が認められ、メタルボンド砥石の研削条痕が非常に大きくなっている。

切れ刃が摩耗すれば、塑性的な上すべりをする切れ刃による盛り上がり高さは大きくなる傾向を示すが、この盛り上げられた材料が

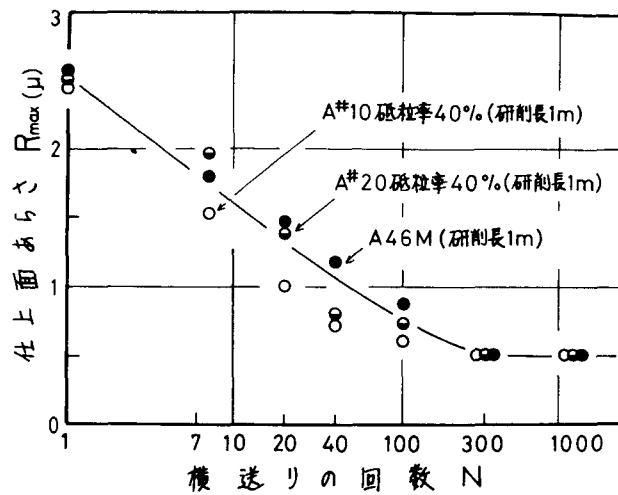


図 4 - 19 送りを与えた場合の仕上面あらさの変化 (研削長 1 m)

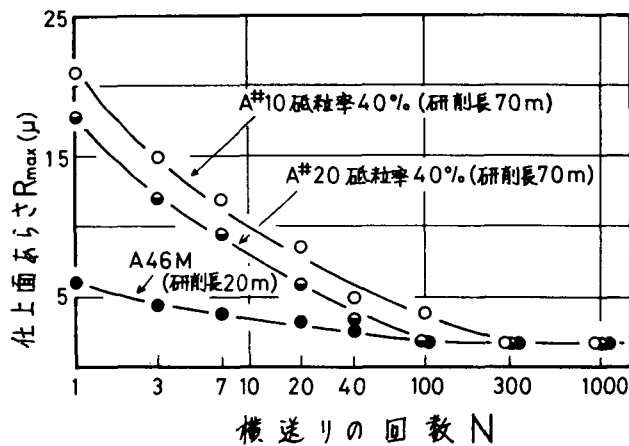


図 4 - 20 送りを与えた場合の仕上面あらさの変化 (寿命附近)

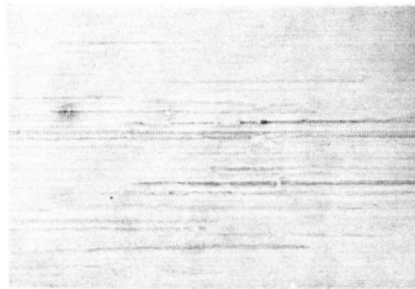
他の切れ刃によって全て切削されていないことを図は示す。とくに、メタルボンド砥石は切れ刃密度が少なく、また研削時間とともに切れ刃逃げ面面積が急速に増加するので一つの切れ刃によって仕上面に生成された大きな幅の研削条痕、言い換えれば、大きな盛り上がりが残る確率が大きくなる。それゆえ、研削時間とともに、急速に仕上面あらさが悪化するものと考えられる。

ある研削過程までブランジカット研削を行なった後、工作物に送りを与えて仕上面あらさの変化を調べた結果を図4-19と図4-20に示す。前者は研削初期の砥石、後者は研削寿命附近の砥石の場合である。ただし、工作物の送りは 1 mm/stroke である。両図から、工作物送り回数が増加するに従って、仕上面あらさは向上し、最終的にはある一定値に収束することがわかる。そして、その収束値は研削初期の砥石、すなわち、切れ刃の摩耗程度の小さい方が $R_{\max} \approx 0.5\text{ }\mu$ 、また、寿命附近の砥石、すなわち、摩耗程度の大きい切れ刃では $R_{\max} \approx 1\text{ }\mu$ であり、研削初期の砥石の方が良い。図4-21は研削初期と寿命附近の砥石に送りを与えた場合の仕上面あらさが一定値に収束した時点での工作物仕上面を観察したものである。図より、研削初期と寿命附近の状態では大きな変化が認められるが、砥石によっては大きな変化はなく、また、メタルボンド砥石ではブランジカットの場合のような広い研削条痕がみられないことがわかる。これらの結果は、ブランジカット研削では切れ刃密度が少ないため、一つの切れ刃によって大きな研削条痕が生成されるが、送りを与えた場合にはブランジカットによって生成された広い条痕上に多数の切れ刃が通過するために、広い条痕が消滅することを示す。

砥石作業面上の切れ刃分布の他に切れ刃逃げ面が仕上面あらさに大きな影響を及ぼすという以上の結果を考慮すると、トラバース研削による仕上面の向上は次のように説明し得る。

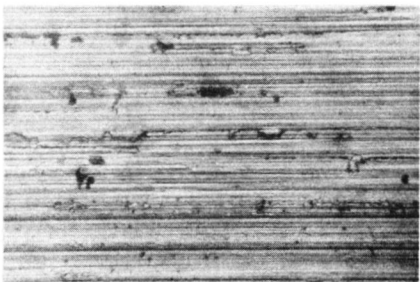


$L = 70\ m$ $N = 1000$



$L = 1\ m$ $N = 300$

(a) A #10 (砥粒率 40%)

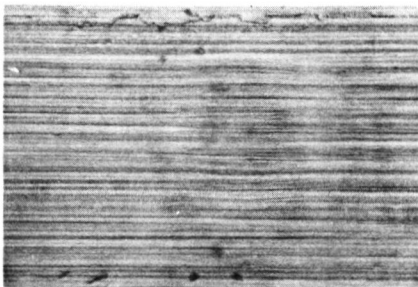


$L = 70\ m$ $N = 1000$

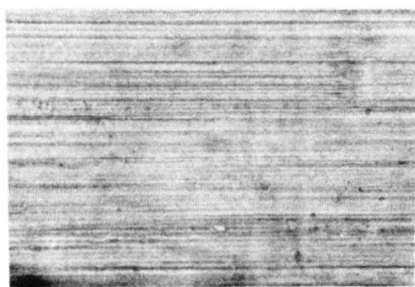


$L = 1\ m$ $N = 300$

(b) A #20 (砥粒率 40%)



$L = 20\ m$ $N = 1000$



$L = 1\ m$ $N = 300$

(c) A46M

研削方向 ← $100\ \mu$

図 4-21 横送りを与えた場合の仕上面の観察

すなわち、図 4-22

にモデルを示すように、

トラバース研削では、

通常考えられているよ

うに送り S の部分でか

なりの切削を行ない、

その他の部分では切削

されないで切り残され

た材料を多くの切れ刃

によって除去する。す

なわち、スパークアウ

トすることで仕上面あ

らさを良くする。それゆえ、仕上面あらさを良くするためには、送りを小さく

し、切れ刃分布を密にし、さらに、盛り上がりを小さくするために、切れ刃逃

げ面の大きさを小さくすればよい。しかし、この場合にも、図 4-19 と図 4

-20 よりわかるように 限界があり、その限界を決定するものは切れ刃の表面

形態であると考えられる。研削初期においては、第 2 章で述べたように切れ刃

は微小凹凸面構造をもち、寿命附近では切れ刃はほとんど摩耗している。それ

ゆえ、前者は微小な切り屑を出すことが可能であるが、後者は仕上面がある程

度まで良くなると、スパークアウトしても全ての切れ刃が上すべりし、仕上面

は微小な盛り上がり、ないしは切れ刃と工作物の凝着効果によって構成される

ようになり、微小な切り屑は排出できないと考えられる。したがって、後者は

前者よりも良い仕上面を作り出すことはできないものと考えられる。

以上、仕上面あらさに及ぼす砥石作業面性状の影響については定性的な究明

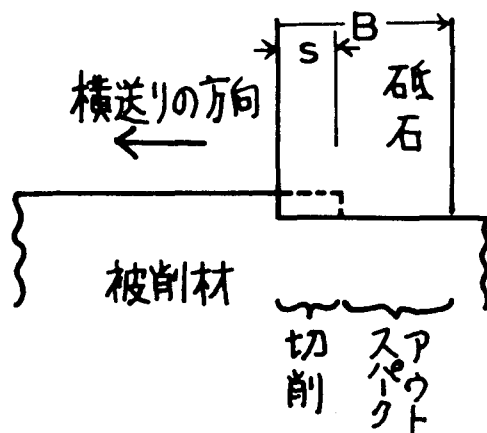


図 4-22 トラバース研削

しかなし得なかったが、さらに、追求すれば、切れ刃分布、切れ刃の表面構造など目直しと密接な関係をもつ要素と仕上面あらさ、ひいては、目直しと仕上面あらさとの定量的関係を導き出すことは十分可能であろう。

5 結 論

研削砥石の性能を定量化するため、非常に粗な切れ刃分布と同時に、大きな切れ刃面積率をもつことができるメタルボンド砥石を製作し、砥石作業面性状と研削抵抗、研削焼け、砥石半径減耗量および仕上面あらさの各寿命判定基準との関係を調べた結果、以下の事柄が明らかになった。

- 1) 切れ刃面積率が5%附近になると、研削焼けが生じ、研削抵抗および砥石半径減耗量は急上昇する。したがって、これらの寿命判定基準による砥石の寿命はほぼ同じとなる。
- 2) 切れ刃にかかる平均垂直研削抵抗 f_n および、接線研削抵抗 f_t は切れ刃面積率および切れ刃密度によって決定され、次式で表わされる。

$$f_n = \frac{10^{-2} P \cdot \eta + C_1}{n_p}$$

$$f_t = \frac{10^{-2} \mu \cdot P \cdot \eta + C_2}{n_p}$$

- 3) 切れ刃により発生する熱量が全て工作物表面に蓄積されると仮定するならば、研削焼けが生じる熱量 Q_b は次式で表わされる。

$$Q_b = \frac{\mu \cdot P \cdot \ell_c \cdot V \cdot \eta_b}{J \cdot v} \times 10^{-8}$$

- 4) 砥石の目直し間寿命は目直し条件のみで決定され、その研削長 L_f は次のように表わせる。

$$L_f = \frac{\sqrt{\eta_f} - \sqrt{\eta_c}}{\Delta R_1 \cdot \sqrt{\pi \cdot n_p \cdot \tan \theta}} \times 10^2 + C$$

したがって、砥石の研削寿命を向上させるためには、切れ刃の分布を粗にし、切れ刃の幾何学形状を鋭くできるような目直しをすればよい。

- 5) 仕上面あらさは切れ刃の通過数が増加するとともにある一定値まで向上する。そして、その一定値は切れ刃の表面性状により影響され、切れ刃が摩耗した場合よりも微小凹凸面構造をもつ方が良い仕上面あらさを得ることができると言える。

参 考 文 献

- 1) 稲崎・米津：機械学会論文集，34-263 (1968)
- 2) 小野：新潟大学工学部研究報告，6巻，123頁
- 3) 松井・庄司：機械の研究，19-10 (1967) 1341
- 4) 吉川・佐田：精密機械，26-9 (1960) 529
- 5) 貴志・江田：精密機械，38-4 (1972) 355
- 6) 吉川：精密機械，30-1 (1964) 112
- 7) 例えば 織岡：日本機械学会誌，63-499 (1960) 1185
- 8) 津和・田部・安井：精密機械，36-11 (1970) 739
- 9) 吉川：精密機械，28-5 (1962) 286
- 10) 小野：日本機械学会論文集，18-74 (1952) 15
- 11) F.P.Bowden.D.Tabor
： The Friction and Lubrication of Solids II,
Oxford (1950)
- 12) 小野：研削仕上，槇書店 (1966) 26
- 13) J.C.Jaeger: Pro.Roy.Soc., N.S.W., 76 (1942) 203

第 5 章 特殊目直し法による砥石の研削寿命の向上

1 緒 言

個々の砥石の研削性能は目直しによって一義的に決定され、砥石作業面上の切れ刃分布を粗にし、切れ刃の統計的幾何学形状を鋭くすれば、砥石の研削寿命が向上することを前章までに明らかにした。しかし、従来の単一ダイヤモンドドレッサー、多石ダイヤモンドドレッサー、インプリドレッサーによる目直しでは、目直し条件を苛酷にしても切れ刃分布に大きな変化はなく、大きな寿命向上は望めない¹⁾。また、クラッシュドレッシングでは目直し直後の切れ刃分布は粗にすることができるが、少量研削後においてはダイヤモンドドレッサーの場合とあまり変わらなくなる欠点がある²⁾。

そこで、本章においては、切れ刃分布や統計的幾何学形状を調節することの可能な特殊目直し装置を二種類考案し、それらの装置で特殊目直しを施した場合の砥石作業面性状の変化を調べるとともに砥石の寿命試験を行なった。その結果、両装置とも市販のビトリファイド砥石の研削寿命を大きく向上させ得ることがわかり、考案した特殊目直し装置の有用性が明らかになるとともに、前章までの裏付けが得られた。

2 ドレッサー回転目直し法

2-1 実験装置および方法

2-1-1 ドレッサー回転目直し装置

単一ダイヤモンドドレッサーで目直しをする場合、ドレッサー先端幅が砥石一回転当りのドレッサー送り量よりも大きいときには、砥石作業面は巨視的に平坦になるので、砥石作業面上の切れ刃の分布はドレッサーによる砥粒の脱落ないしは欠損によってしか変化しない。

そこで、切れ
刃の分布をさら
らに大きく調
節する方法と
しては、図5
-1に示すよ
うなドレッサ

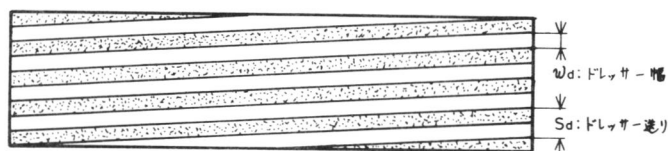
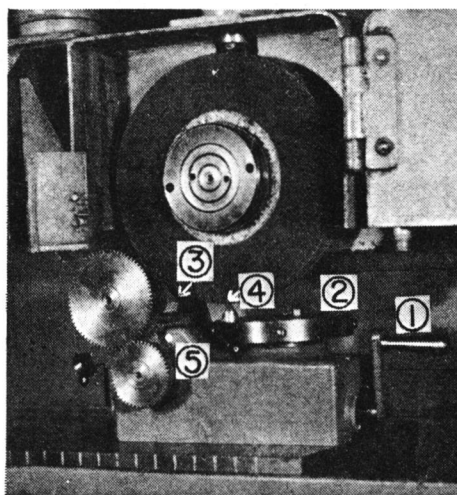


図5-1 ネジ切り状目直しが施された砥石

ー先端幅がドレッサー送り量よりも小さい、いわゆる、ネジ切り状の目直しが考えられる。この方法では、図における斜線部分がドレッサーによってすべて除去され、残った部分の砥粒の一部が切れ刃として作用するため切れ刃分布を大きく調節することは可能である。しかし、一般にドレッサー送り速度に対して砥石周速が非常に大きいことと、ドレッサーの摩耗がドレッサー先端幅が小さい場合に大きいことを考えると常にネジ切り状の目直しを施すことは困難である。この場合、現在使用されている研削盤のドレッサー送り機構を速くし、ドレッサーが摩耗してもネジ切り状の目直しができるように改良することが考えられるが、研削盤のテーブルの慣性力



1. ハンドル 2. 回転円板 3. ゴムローラ
4. ドレッサ 5. 歯車

図5-2 ドレッサー回転目直し装置の外観

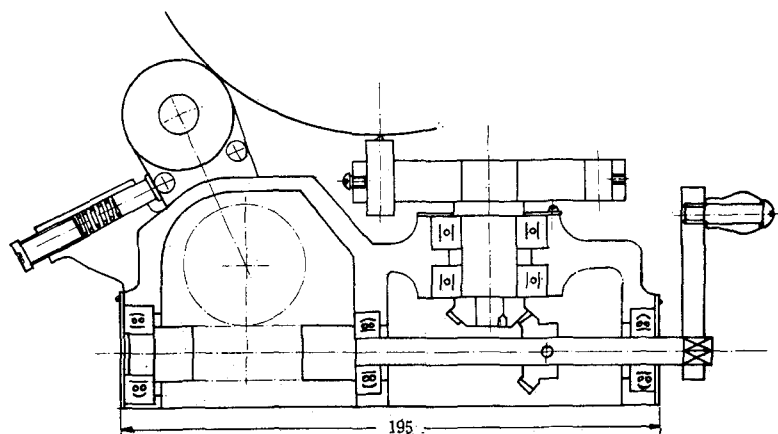


図 5 - 3 ドレッサー回転目直し装置の構造

が大きく、急発進、急停止装置を考えなければならず、目直しの精度、高価という点で問題があると思われる。

そこで、図 5 - 2 および図 5 - 3 に外観と構造を示すようなドレッサー回転目直し装置を考案した。図 5 - 2 においてハンドル①を回せば回転円板②と砥石駆動用ゴムローラ③が同時に回転し、

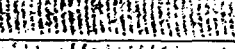
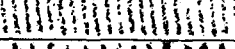
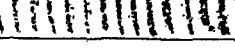
	砥石表面 削減率(%)	ピッチ (mm)
	0	—
	25	4.2
	33	2.8
	40	2.1
	45	1.4
	50	1.0
	60	2.8
	75	4.2
	75	6.3

図 5 - 4 ドレッサー回転目直し装置で目直しが施された砥石作業面

回転円板上に取り付けられたドレッサー④が砥石作業面を砥石軸方向にある間隔で溝を切っていく。この溝の間隔は歯車⑤を交換することにより任意になされる。本装置は静的なものであるが、ハンドルの部分にモーターを直結し、駆動させれば、砥石を回転させながら

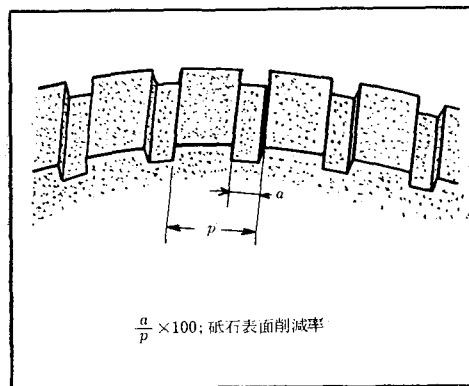


図 5-5 砥石表面削減率の概念

目直しすることも可能であり、実際の目直しに使用することも可能であると考えている。図 5-4 にドレッサー回転目直し装置で目直しを施した砥石作業面の転写図を示す。この図で、黒色部がすべて切れ刃になるとは限らないが、削減率 0 の普通目直しを施した砥石では、切れ刃が非常に密分布しているのにドレッサー回転装置を用いた砥石では削減率に応じて切れ刃が減少しており、この装置を用いれば種々の切れ刃分布をもつ砥石を作り得ることがわかる。なおここで、削減率とは図 5-5 に示すようなドレッサー回転目直し装置で目直しが施された砥石作業面における溝の間隔の周期（ピッチ）を P 、溝の幅を a とした場合の砥石表面削減率 $a/P \times 100$ （本章において名付ける）の略称である。

2-1-2 実験方法

実験条件を表 5-1 に示す。なお、目直し条件は前回の影響によって切れ刃に附着した溶着金属や空孔のあいだの切り粉などを取り除くため、単一ダイヤモンドドレッサーを使用する普通目直しをドレッサーの切り込み 20μ で数

回行ない、最後の一回をドレッサー切り込み 10μ で行なった。ドレッサー回転目直し装置による目直しは、このような通常の目直しを施したのちに切り込み 100μ で行なった。

表 5 - 1 実験条件

砥 石	A46MmV	205×19×50.8
被 削 材	炭素工具鋼 SKI(Hrc $\approx$ 62)	幅×長さ 10×100
研削条件	砥石周速	1900 m/min
	テーブル造度	8 m/min
	切り込み	10 μ /stroke
研削方式	乾式平面研削	ブランジカット方式

連続切れ刃間隔および切れ刃面積率は津和が考案した原理を応用した図 5 - 6 に示す砥石アナライザーを用いて測定した²⁾。砥石半径減耗量は第 3 章で述べた方法で測定した。ただし、基準面としては目直し直後の砥石作業面を用い、脆弱層は考慮していない。消費電力は研削盤に取り付けたアンメーターでモーターに流れる電流を測定した。その電流値に電圧を掛けることによって求めた

なお、
 本実験では研削量の表示を研削回数で示すが、研削一回は 10 cm の長さの被削材を 10μ の

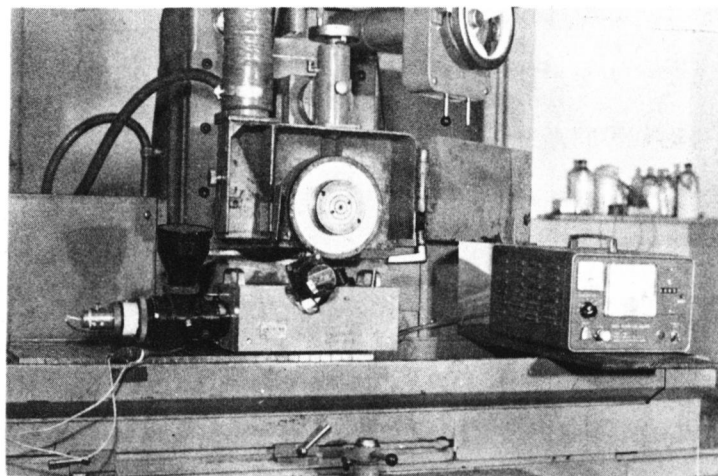


図 5 - 6 砥石アナライザーの外観

切り込みで研削した場合の研削量を表わす。

2-2 ドレッサー回転目直し装置で目直しを施した砥石の連続切れ刃間隔と切れ刃面積率

ドレッサー回転目直し装置で目直しを施した砥石の研削過程における連続切れ刃間隔および切れ刃面積率の変化を図5-7および図5-8に示す。両図の最終プロットは工作物全面に青色の研削焼けが生じた研削回数であり、図中の数字は削減率とピッチを示す。連続切れ刃間隔および切れ刃面積率は研削過程が進むにつれて、前者は減少、後者は増加し、前章までの結果と同じ傾向を示す。そして、それらの減少率および

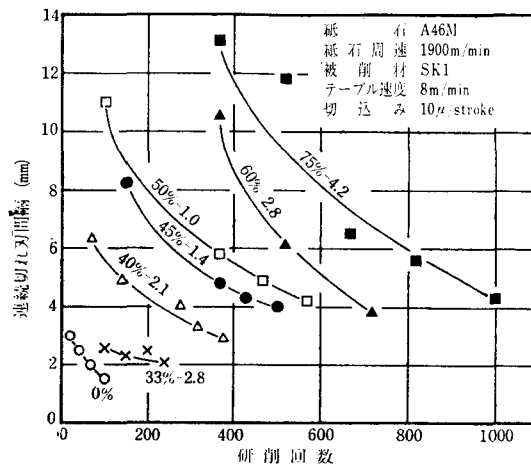


図5-7 研削過程における連続切れ刃間隔の変化

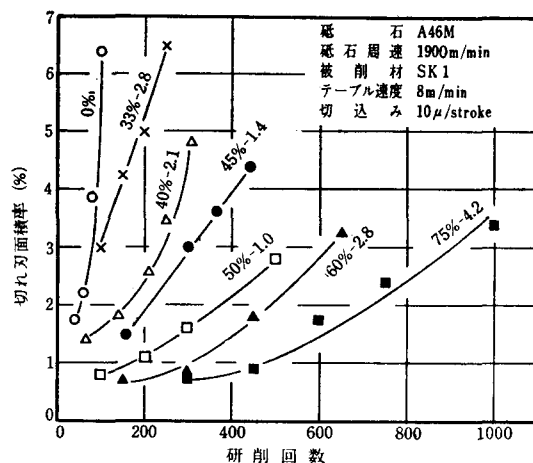


図5-8 研削過程における切れ刃面積率の変化

び増加率は削減率が多い。すなわち、目直しによって形成された砥石作業面上の切れ刃密度が小さい程少ない。また、全面研削焼けが生じた最終プロットの連続切れ刃間隔および切れ刃面積率は削減率が増加するにしたがって、前者は増加、後者は減少する傾向がある。これは、被削材の幅が広いので、研削焼けが幅全体にわたって瞬間的に生じることは少なく、被削材上に部分的に生じ、その部分から全面に広がる傾向があるので、部分的に焼けが生じてから全面に焼けが生じるまでに、削減率の少ない方が切れ刃面積率が急速に増加するためと考えられる。すなわち、普通目直しの条件が同じであるので、統計的幾何学形状は削減率にかかわらずほぼ一定と考えられ、また、部分的に焼けが生じはじめる以降においては砥石半径減耗量も大きな差はないと考えられるので、第3章(3-6)式より切れ刃面積率は切れ刃密度のみに影響されるため、削減率の少ないもの程切れ刃面積率が大きくなり、また、連続切れ刃間隔が短かくなっているものと考えられる。

2-3 ドレッサー回転目直し装置で目直しを施した砥石の研削性能

図5-9はドレッサー

回転目直し装置で目直しを施した砥石の寿命試験を行ない、砥石表面削減率と寿命点までの総研削量との関係を示したものである。この図から、総研削量と削減率との間には二次曲線で近似し得るような関係があり、普通

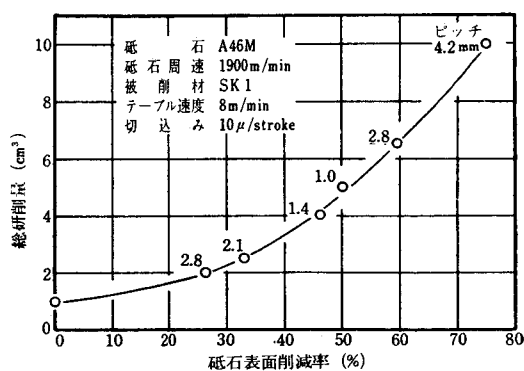


図5-9 砥石表面削減率と目直し間寿命の関係

目直しの場合と比較してド
 レッサー回転目直し装置で
 目直しを施した場合には寿
 命が数倍から 10 倍ものび、
 砥石作業面上の切れ刃密度
 を粗にすればするほど砥石
 の研削寿命が大きいこと
 がわかる。ただし、寿命
 までの総研削量が溝の幅
 a や周期 P に影響されず
 に削減率のみに関係してい
 る傾向があるが、これは、
 本実験における a や P
 が小さく、また、一様
 な間隔で目直しを施し
 ているため、切れ刃の
 分布が一様となり削減
 率が切れ刃の分布や切
 れ刃面積率に一義的に
 関係するためであろう。
 例えば、極端な場合で
 あるが砥石作業面の半
 円だけを削除し、残り
 の半円で研削を行なっ

表 5-2 砥石表面削減率と砥石半径
減耗量の関係

削減率(%) および ピッチ(mm)	研削回数	砥石半径 減耗量(μ)
0	100	7.5
40	200	12.0
2.1	100	6.5
46	430	27.0
1.4	100	11.0
50	450	42.0
1.0	100	27.0
33	200	16.5
2.8	100	10.5

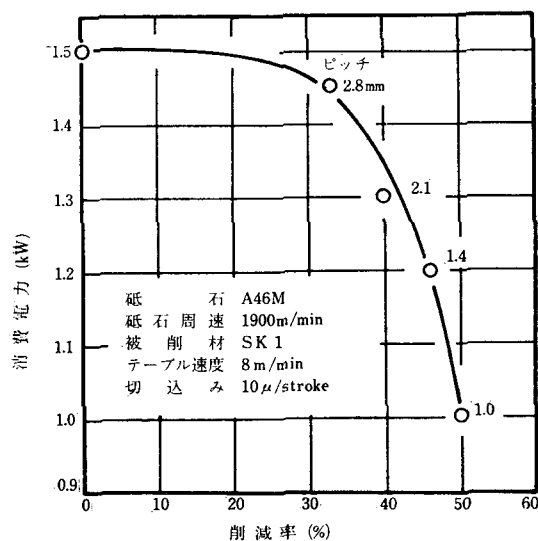


図 5-10 砥石表面削減率と消費電力の関係

た場合には、まったく寿命がのびないという結果がでている。

表 5-2 に砥石半径減耗量と削減率の関係を示す。研削過程における砥石半径減耗量を追跡していないので、詳細に検討することはできないが、研削 100 回では砥石半径減耗量は削減率によってバラツキを示す。とくに、ピッチ

1 mm、削減率 50 % の場合には大きな砥石半径減耗量を示すが、これは、図 5-4 からわかるように非常に細かいピッチで砥石表面が削減されているために、砥粒を保持している結合剤の除去が行われたり、また、切れ刃先端の鋭利なものが増加したりし、研削初期における切れ刃の破碎、脱落が大きくなるためと考えられる。

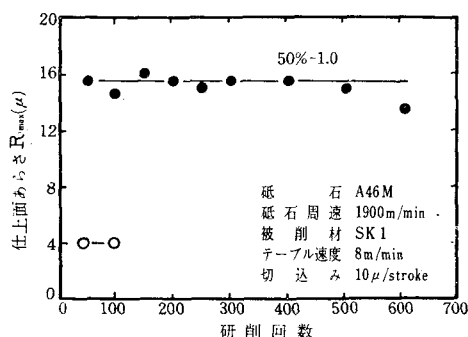


図 5-11 研削過程における仕上面あらさの変化

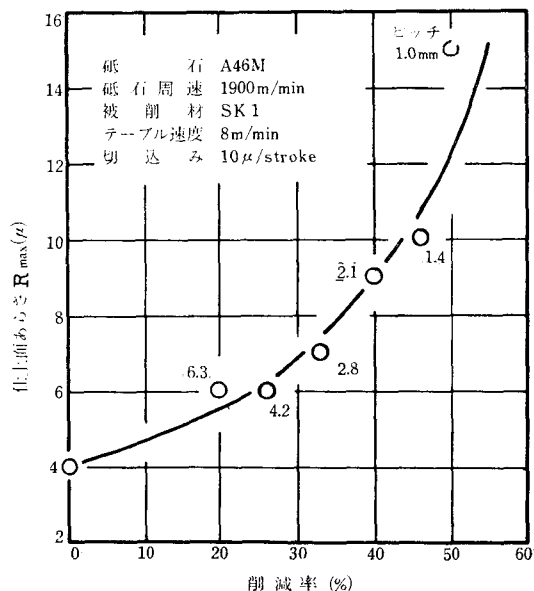


図 5-12 砥石表面削減率と仕上面あらさの関係

る。しかし、研削 100 回以後の研削過程においては定常的に摩耗し、研削 100 回

につき $5\ \mu$ の砥石半径減耗量を示し、削減率にかかわらず定常的な摩耗を行っているものと考えられる。図 5-10 は研削初期における削減率と消費電力の関係を示すものである。削減率 50 % では消費電力は約 30 % 下がり、ドレッサー回転目直し装置で目直しを施した砥石の研削性能はこの点でも普通目直しのものより良好な結果を示す。

以上のように、ドレッサー回転目直し装置を用いれば砥石の研削寿命は大きく向上するが、ここで、この装置を用いた場合の仕上面あらさを検討しておく。図 5-11 は、ピッチ 1 mm、削減率 50 % の場合と普通目直しの場合の研削方向に直角な方向の仕上面あらさを研削回数で表わしたものである。両方の場合とも研削回数が増加しても初期の仕上面あらさは変化せず、仕上面あらさは研削初期の砥石作業面性状によって決定されるようである。ただし、前章で述べた結果では、研削初期には良く研削過程が進むにつれて悪くなり、その後、ある一定値に達しているが、図における研削初期はこの一定値附近の研削過程に近いものであり、前章の結果と矛盾しないものと思われる。図 5-12 は、削減率と研削方向に直角な方向の仕上面あらさの関係を示したものである。この図から、削減率が増加するにしたがって仕上面あらさが悪くなることがわかる。したがって、ドレッサー回転目直し装置を使用すれば砥石の研削寿命は向上するが、仕上面あらさは悪くなり、この点では問題を残す。しかし、前章で述べたように、仕上面あらさは工作物を送れば良くすることができ、また、一般の研削においては最終工程の目直しだけは細かい目直しをすることが多いので、普通目直しの場合でも最終工程では目直し条件を変えねばならず、最終工程以外では仕上面あらさが多少悪くても問題にならないことを考えると、ドレッサー回転目直し装置は非常に有用な目直し装置であると考えられる。

3 振動目直し法

3-1 振動目直し装置と切れ刃の分布および形状の調節概念

振動目直し装置を図5-13

13に示す。振動目直し装置はダイヤモンドドレッサー②、ドレッサーに大きな振幅を与えるための振幅拡大ホーン③、そのホーンに振動を与える振動子④、振動子に振動を発生させる超音波振動発振器⑦および振動子取付台⑤によって

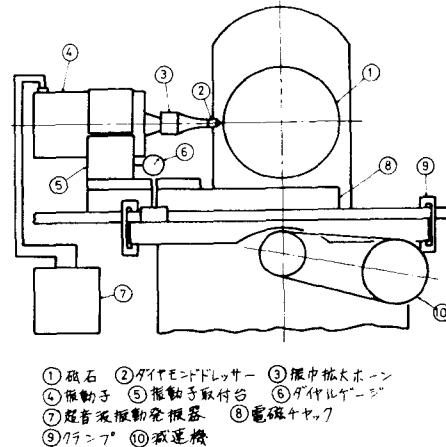


図5-13 振動目直し装置

構成される。振動目直しは振動子取付台を研削盤のテーブル

上の電磁チャック⑧で固定し、まず、ドレッサーに振動を与えないで普通の目直しを行ない、ドレッサーの砥石作業面に対する位置を決め、その後、ダイヤルゲージ⑥で所定の切り込みを設定し、ドレッサーに振動を与えながらテーブル縦送りをす

ることによってなされる。この際、テーブルの横送りがあるとドレッサー切り込み量が変わるので、横送り

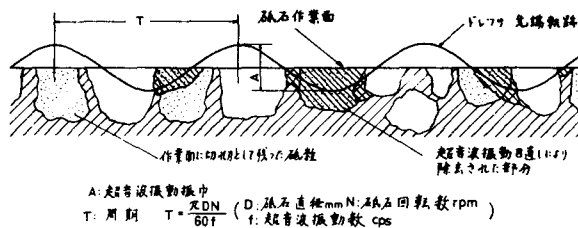


図5-14 振動目直しの概念

はクランプ⑨によって固定される。また、テーブル縦送りは減速機⑩の速度比を変えることによって種々に変化させることができる。

この振動目直し装置による目直しを、普通目直しの後にドレッサー切り込みを与えずに行うと、理論的には図5-14に示すような砥石作業面附近のドレッサー先端の軌跡に従って、目直しが行われる。図5-14は砥石作業面を展開したものであるが、この図において、ドレッサー先端の軌跡は

$$y = A \sin\left(\frac{\pi}{T} x + \alpha\right) \quad \dots\dots\dots (5-1)$$

ここで、 y, x : 任意の時間 t における砥石作業面に対する垂直および平行な方向のドレッサーの位置

α : 時間 $t = 0$ におけるドレッサーの角位置

A : ドレッサーの振幅 (μ)

f : ドレッサーの振動数 (cps)

D : 砥石直径 (mm)

N : 砥石回転数 (rpm)

$T = \frac{\pi D N}{60 f}$: 周期

の正弦曲線で表わされる。それゆえ、普通目直しのように砥石作業面上における全ての砥石が目直しされるわけではなく、ドレッサー先端が砥石に接触する部分のみが除去される。したがって、普通目直しの場合よりもはるかに大きく切れ刃の分布を調節することができる。また、振動目直しでは、普通目直しのように砥石作業面と平行な方向から砥粒がドレッサーに衝突するのではなく、砥粒に交差角 θ (砥石作業面とドレッサー先端軌跡がなす角度) で衝突するの

で、普通目直しの場合よりも切れ刃の平坦部および形状が図5-14で示したように小さくかつ鋭くなると考えられ、切れ刃の統計的幾何学形状を鋭利にさせ得る可能性がある。ただし、交差角 θ は

$$\theta = \tan^{-1} \left[\frac{\pi A}{T} \cos \left(\sin \frac{\lambda}{A} \right) \right] \dots\dots\dots (5-2)$$

で表わされ、本実験の場合には $T = 1.4 \text{ mm}$ 、 $A = 40 \mu$ であり、普通目直し後のドレッサー切り込みを0とすると $\theta = 5^\circ$ となり、切り込みを 10μ とすると $\theta = 1.5^\circ$ となる。

振動目直しによる切れ刃の分布および形状の調節は、以上のことを基礎概念として、実際には、ドレッサーの切り込み、送り、先端幅、振幅および振動数などの各運動条件の組み合わせによって行われる。ドレッサー切り込みは図5-15に示すように砥石作業面の削除率に影響する。そして、砥粒の破壊が理論通り行われるなら

ば、図より、ドレッサー振幅の $A/2$ を越える切り込みによって形成される切れ刃分布は $A/2$ の時の切れ刃分布に普通目直しによって切れ刃分布が粗になっていることを考慮するだけで決定される。

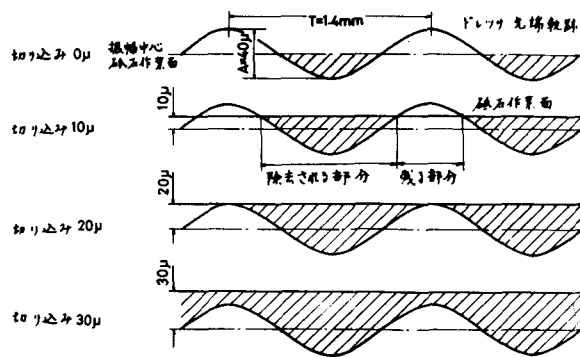


図5-15 ドレッサー切り込みと砥石作業面の巨視的形状

次に、ド
 レッサー送
 送りおよ
 び先端幅
 は普通目
 直しの場合と同様、
 砥粒の破
 壊形態の
 数量的変
 化に関係
 し、切れ
 刃分布に

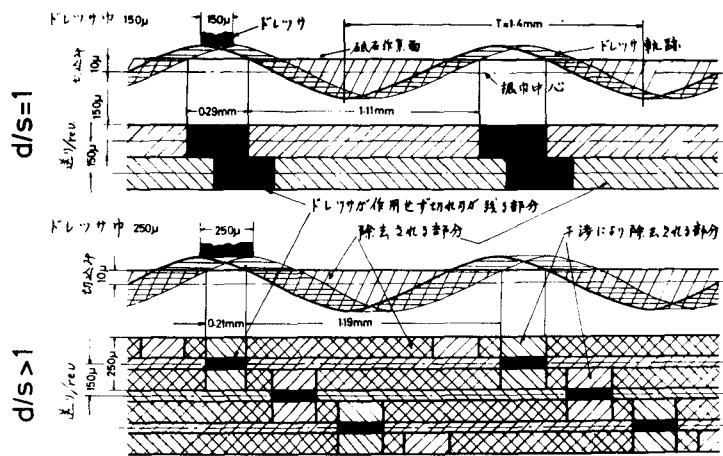


図 5 - 1 6 砥石作業面の巨視的形狀に及ぼす
 d/s の影響

影響するが、振動目直しの場合にはこの他にドレッサー送り s とドレッサー先端幅の比 d/s が砥石作業面の除去率と直接的に関係し重要な値となる。図 5 - 1 6 は d/s の値を考慮した場合の砥石作業面の 模型展開図である。図よりわかるように、ドレッサーの軌跡どおりに砥石作業面が形成されるならば、 d/s の値によって砥石作業面の形成形態は三種類にわかれる。すなわち、 $d/s < 1$ 、 $d/s = 1$ 、 $d/s > 1$ に分類され、 $d/s < 1$ の場合は ネジ切り状目直しとなるので、振動目直しでは不適切である。 $d/s > 1$ の場合にはドレッサー軌跡の干渉現象により切り刃の分布を非常に粗にすることが可能である。最後に、ドレッサー振幅および振動数についてであるが、前者は交差角と除去深さに影響し、後者は交差角および除去率に関係する。

3-2 実験方法

実験条件を表5-3に示す。

切れ刃の分布はガラス板上に厚さ約 10μ の媒をつけ、その上に砥石作業面を転写し、顕微鏡でガラス板上の切れ刃の跡を観察することによって測定した。詳述すると、砥石作業面上の3個所の部分で $30 \times 10 (mm^2)$ の面積を取り出し、切れ刃密度はこれらの面積内に含まれる総個数を総面積で割ることで、また、連続切れ刃間隔は長さ $30mm$ 、幅 40μ の線上の個数を $1mm$ 間隔ごとに10個所測定し、総切れ刃数で総測定長さを割る

表5-3 実験条件

機 使 器 用	平面研削盤	Jung
	超音波発振器	超音波工業社
	ニッケル磁歪振動子	同上
砥 石	砥石の種類	A46MmV
	外 径	180mm
目 直 し 条 件	普通目直し	砥石周速度 1900m/min
		送り速度 0.15mm/rev
		切込め 10 μ (軽回)
		ドレッサー 単石ダイヤモンド
	超音波振動目直し	発振器出力 350W
		周 波 数 22.5KC
		振 幅 20 μ
		砥石周速度 1900m/min
		送り速度 0.15mm/rev
		切込め(普通目直し後) 0.10, 20, 30 μ
振 削 材	材 質	SK3 材料 H _v 800
	寸 法	100X10mm ²
研 削 条 件	研削速度	1900m/min
	切込め	10 μ /stroke
	送り速度	(マシ研削)
	テーブル速度	8 m/min
	研削 剤	なし

ことで求めた。この転写法は第2章で述べたように脆弱層の除去および切れ刃の破壊を伴う可能性があり、定量的測定には問題があるが、本実験では砥石作業面に小さな凹凸ができるため、顕微鏡による直接観察では切れ刃の判別が難しいことと、多少の誤差が生じたとしても定性的には切れ刃分布の測定値が信頼し得るという考えからこの方法を採用した。

3-3 振動目直しされた砥石の切れ刃分布

振動目直しを施した砥石の砥石作業面の状態を図5-17に示す。前項で述べたドレッサー先端幅 d とドレッサー送り s による干渉効果を考慮して、 $d =$

150~200 μ の $d/s \approx 1$ と $d \approx 300\mu$ の $d/s \approx 2$ および $d/s \approx 1$ で2回目直しを施した場合のドレッサー切り込み0 μ , 10 μ , 30 μ の条件について示してい

る。また、参考のため普通目直しを施した場合も示した。図より、普通目直しよりも振動目直しを施し

た方が砥石作業面上の

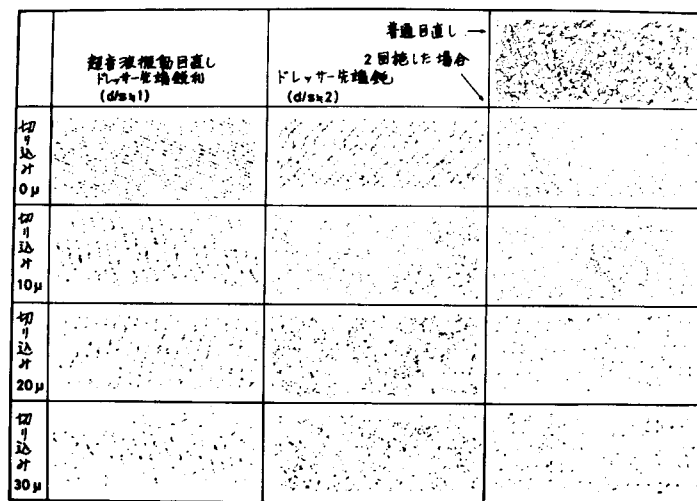


図5-17 砥石作業面の性状に及ぼす振動目直し条件の影響

切れ刃分布が粗になることがわかる。縞模様が観察されるのは、振動目直しによって砥石作業面上の砥粒が間欠的に破壊ないしは脱落させられていることを示し、前項で述べた概念に従って砥石作業面が形成されていることを明らかにしている。それゆえ、他の条件で縞模様が観察されないのは、ドレッサー軌跡が干渉し、模様が消去されるか、または、砥粒の破壊が大きく模様を形成するだけの切れ刃が残留しなかったためと考えられる。

これらの分布状態を数量的に取り扱うため、顕微鏡で切れ刃の分布を測定した結果を図5-18および図5-19に示す。図5-18は目直し条件と切れ刃密度との関係を求めたものである。振動目直しを施した場合には切れ刃密度が非常に粗になり、振動目直し装置を使用すれば切れ刃分布を広範囲に調節し

得ることがわかる。また、振動目直し条件に対する切れ刃密度はドレッサー切り込みを増加すれば、 $d/s \rightleftharpoons 1$ の1回および2回目直し、 $d/s \rightleftharpoons 2$ の目直しのいずれの場合も同じような傾向で粗になるが、ドレッサー切り込みを一定にすれば、 $d/s \rightleftharpoons 2$ の目直しは $d/s \rightleftharpoons 1$ の目直しよりも密になり、 $d/s \rightleftharpoons 1$ の1回および2回目直しではほとんど変化がないことがわかる。 $d/s \rightleftharpoons 2$ の目直しはドレッサー軌跡の干渉現象があるため、 $d/s \rightleftharpoons 1$ の目直しよりも理論的には切れ刃分布が粗になるべきであるが、実際の目直しではドレッサー軌跡通りに砥粒が破壊しないで大きく破壊する可能性が強いことと、砥石作業面の理論的除去率が非常に大きくなることで、普通目直しによって形成された砥石作業面が全てなくなり、理論的には除去された砥石作業面部の砥粒が切れ刃として新作業面に

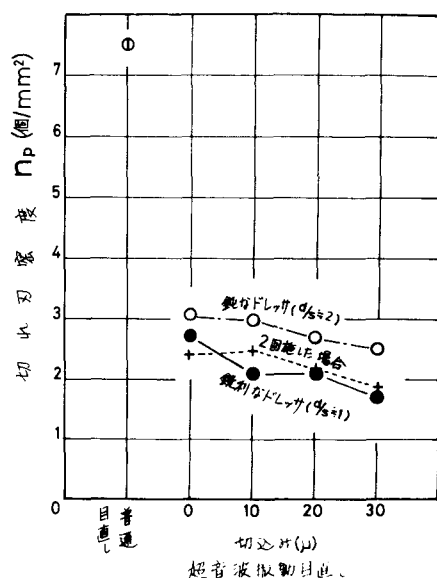


図5-18 振動目直し条件による切れ刃密度の変化

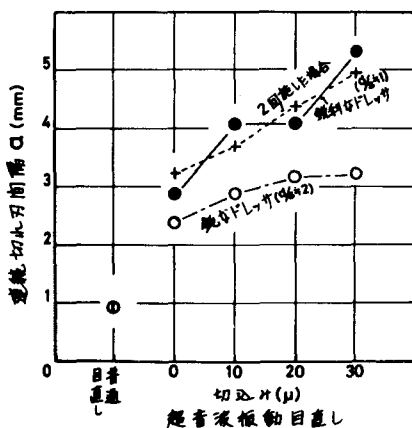


図5-19 振動目直し条件による連続切れ刃間隔の変化

顕出するため、切れ刃密度が密になると考えられる。この考察は $d/s \approx 1$ の 1 回目直しでは縞模様が観察されるのに、 $d/s \approx 2$ では ドレッサー 切り込み 0μ を除いて縞模様が消却されることから妥当であると考ええる。 $d/s \approx 1$ の 2 回目直しが 1 回目直しと切れ刃密度に大きな変化がないのも同様のことと考えられる。

図 5-19 は図 5-18 と同じ砥石作業面の 連続切れ刃間隔を 振動目直し条件によって比較したものであり、図 5-18 と同様なことが考察されるが、その他に ドレッサーの切り込み量を多くすると $d/s \approx 2$ の場合には 連続切れ刃間隔があまりのびていないのに、 $d/s \approx 1$ の 1 回および 2 回目直しの場合には大きくのびているのがみられる。ドレッサー切り込み量の増加に対する切れ刃密度の減少率は同様な傾向を示すにもかかわらず、連続切れ刃間隔の増加率に変化がみられるということは、切れ刃の大きさの分布が目直し条件によって異なるということであり、振動目直しによって切れ刃形状の調節が可能であることを示す。すなわち、 $d/s \approx 1$ の場合、ドレッサー切り込みを増加すれば切れ刃の統計的幾何学形状が鋭くなることがみられ、目直し条件を種々に変えることによって切れ刃の統計的幾何学形状をさらに変化させ得ることは可能と考えられる。

以上、ドレッサーの送り速度、振幅および振動数を一定にし、ドレッサーの切り込みと先端幅を変化させた場合の切れ刃分布を調べたが、さらに、一定にした三つの条件を変化させると砥粒の破壊形態の数量的調節、すなわち、切れ刃の分布や統計的幾何学形状の調節を細かく広範囲にし得ることは十分考えられる。

3-4 研削過程における切れ刃の挙動

ドレッサー切り込み 0μ で 振動目直しを施した砥石で寿命試験した場合の研

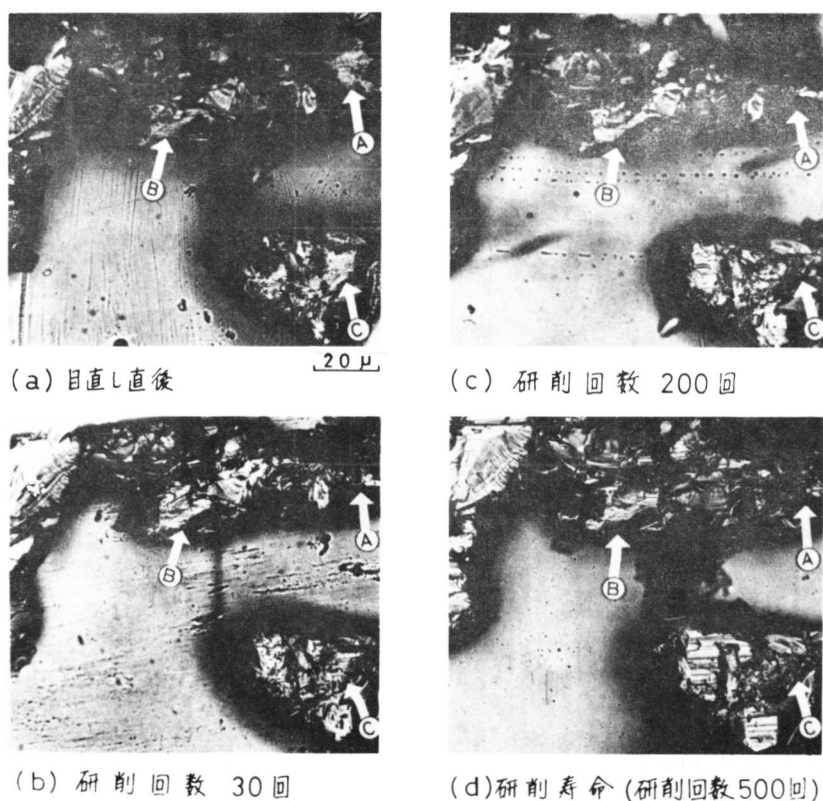


図5-20 研削過程における切れ刃の挙動

削過程における切れ刃の挙動を図5-20に示す。(a)は目直し直後の砥石作業面に煤をつけ、その面をレプリカに取り観察したものである。それゆえ、(a)の切れ刃で煤がついて黒くなっている部分は砥石作業面上の切れ刃であるが、煤がうまくつかない場合や第2章で述べた脆弱層がガラス面上への転写やレプリカ採取の際に除去された可能性もあるので、煤がついていない部分も切れ刃として存在することが考えられる。このため、目直し直後の切れ刃を明確に把握することは困難であるが、切れ刃面上に条痕が観察されることから考えて、定

性的に砥石作業面を観察することは可能である。そこで、(a)上で観察される三つの平坦で条痕をもつ砥粒または結合剤（明確には区別し難い）の部分の研削過程

における変化を調べたのが(b)、(c)、(d)である。これら三個所のうち、(A)・(C)の二個所は研削30回で全て、または、ほとんど除去され、残る(B)は研削過程においてほとんど影響を受けず、寿命時になって始めてその一部が影響を受ける。したがって、(B)の部分は振動目直しを施され

た谷の部分と考えられ、振動目直しによっても第2章で述べた目直し条痕がつくことがわかる。

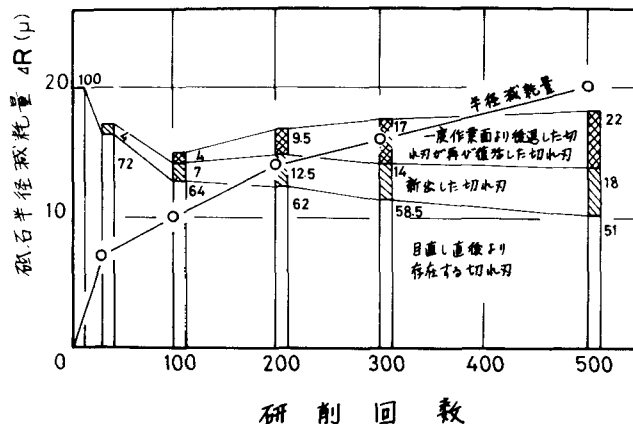


図5-21 研削過程における砥石半径減耗量と切れ刃の挙動
(ドレッサー切り込み0μ)

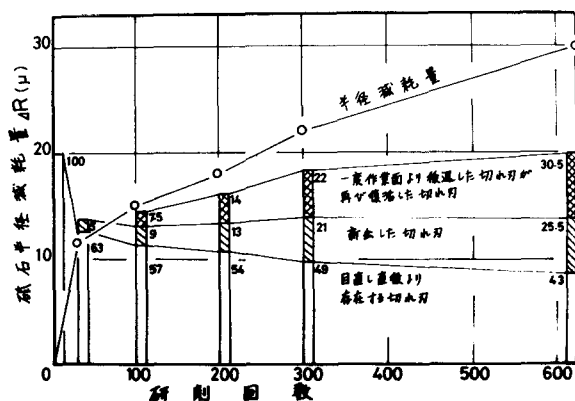


図5-22 研削過程における砥石半径減耗量と切れ刃の挙動
(ドレッサー切り込み10μ)

このような切れ刃の挙動を砥石半径減耗量の変化とともに数量的に調べた結果が図 5-21 および図 5-22 である。両図は目直し直後の切れ刃数に対する研削過程における切れ刃数の百分率をドレッサー切り込み 0μ と 10μ について示したものである。ただし、目直し直後の切れ刃数はそれぞれ 128 個と 121 個である。両条件の場合とも、研削初期の砥石半径減耗量が多く、切れ刃数が減少している。砥石半径減耗量が多いのは普通目直しの場合と同じであるが、切れ刃数が減少するのは第 3 章で述べた普通目直しの場合と異なっている。これは、普通目直しによって生成された切れ刃が研削初期の過渡的挙動を経ると極く小さい部分しか切れ刃として残留しないことを考えると、普通目直し後振動目直しを施す場合、振動目直しによってその小さな切れ刃として作用する部分が除去される可能性が強いことと、振動目直しによって切れ刃の形状が鋭くなり、研削することによって破壊することが原因と考えられる。研削初期以後においては、切れ刃の破壊が非常に少なくなるのに対して、一度砥石作業面より後退した切れ刃や新出切れ刃が砥石作業面に顕出し、寿命附近においては目直し直後の切れ刃数とほぼ同数になる。したがって、研削初期以降においては、振動目直しの場合においても巨視的には切れ刃は摩耗過程を示すものと考えられる。

3-5 切れ刃の分布と砥石の研削性能

振動目直し条件に対する砥石の目直し間寿命の変化を図 5-23 に示す。図より、砥石に振動目直しを施せば普通目直しに比較して寿命が飛躍的に向上し、その向上率はドレッサー切り込み量が増加するにつれて上昇することがわかる。図 5-24 と図 5-25 に振動目直しによって形成された砥石作業面上の切れ刃間隔と砥石の目直し間寿命の関係を示す。総体的には、切れ刃密度が減少し、連続切れ刃間隔が長くなれば寿命がのびるが、 $d/s \approx 1$ で 2 回目直しを施し

た場合にはほとんどのびない。

これは、前述したように、2回目直しをする場合にはドレッサー軌跡の干渉現象のため、新砥石作業面と谷との深さが浅くなり、少量の研削で谷の部分の砥粒が切れ刃として顕出し、振動目直しによって、切れ刃密度を粗ないしは連続切れ刃間隔を長くした効果が消滅する結果と考えられる。その他にも、切れ刃の幾何学形状が鋭いため研削初期に破壊し、砥石半径減耗量が非常に大きくなる結果、谷の部分の砥粒が切れ刃として顕出し、切れ刃密度が急速に密になることも考えられる。しかし、図5-18および図5-19より切れ刃の統計的幾何学形状が1回目直しと2回目直しではほとんど変化がないので、

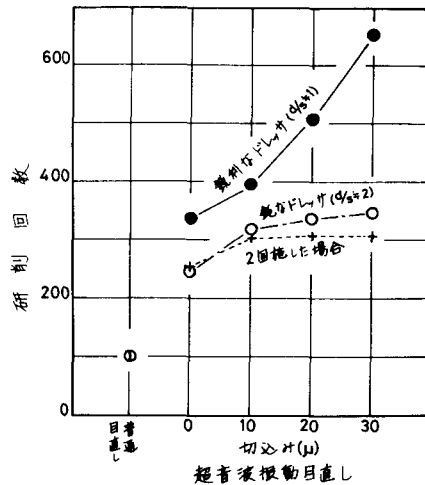


図5-23 振動目直しを施された砥石の目直し間寿命

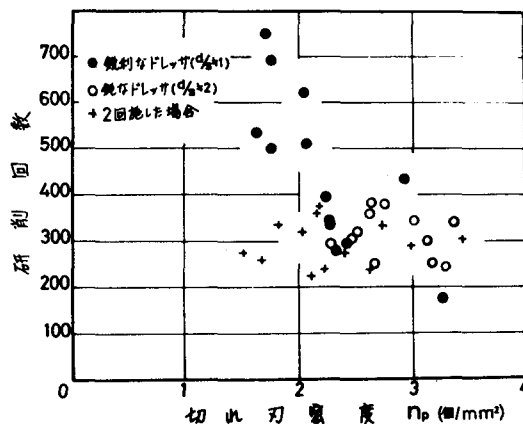


図5-24 切れ刃密度と目直し間寿命の関係

切れ刃の幾何学形状による影響は少ないものと考えられる。図5-26はドレッサー切り込み 30μ で2回目直しを施した場合の砥石半径減耗量を他の目直し条件と比較したものである。研削初期における砥石半径減耗量は普通目直しの場合が最も少ないが、振動目直しの中では前述したように

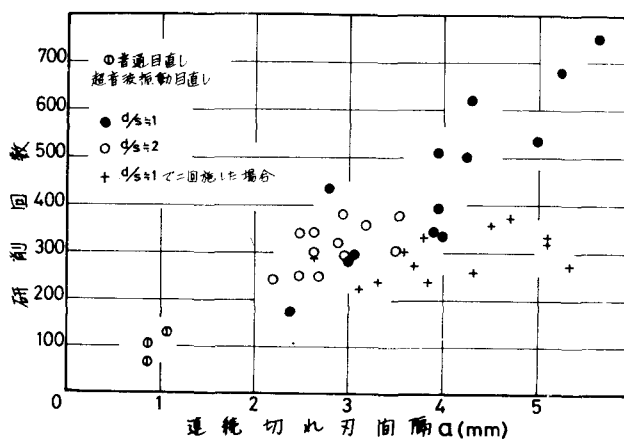


図5-25 連続切れ刃間隔と目直し間寿命の関係

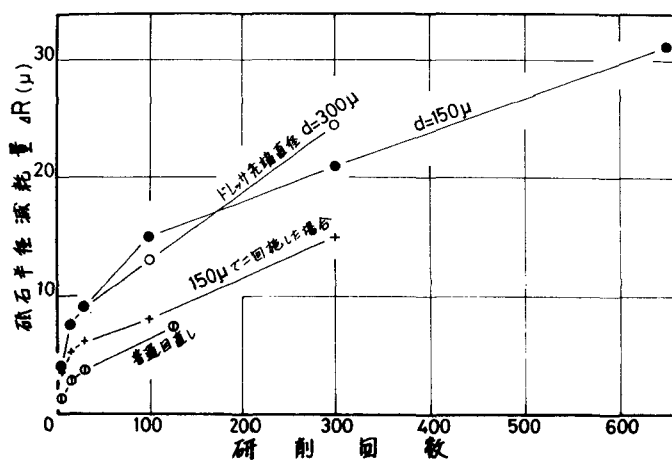


図5-26 目直し条件と砥石半径減耗量の関係 (ドレッサー切り込み 30μ)

切れ刃分布が最も粗であるにもかかわらず、寿命が他の振動目直し条件の場合と比較してほとんどのびないドレッサー先端幅 150μ で2回目直しの場合に

砥石半径減耗量が最も小さく、上述の考察を裏付けている。なお、 $d/s \approx 1$ の場合には砥石半径減耗量が大きくても、新砥石作業面と谷までの深さが深いために寿命がのびることも同図から明らかになっている。

ドレッサー切り込み深さの目直し間寿命に及ぼす影響は以上の通りであるが、次に d/s の影響を図 5-27 に示す。ただし、この実験で使用したドレッサーは頂角 110° の円錐形に整形したダイヤモンドであり、 d/s はドレッサー先端を摩耗させ、先端幅を変えることによって変化させた。図において、連続切れ刃間隔は $d/s \approx 1.8$ 附近で、また、砥石の目直し間寿命は $d/s \approx 1$ 附近で最大値を示している。連続切れ刃間隔が $d/s > 1$ で最大値を示すのはドレッサー軌跡の干渉現象のためであるが、 $d/s > 1.8$ で連続切れ刃間隔が短くなるのは、すでに述べたように干渉が大きすぎ新砥石作業面と谷底との深さが浅くなるためと考えられる。また、 $d/s \approx 1$ 附近で寿命が最大値となるのも、すでに述べたように $d/s > 1$ では干渉現象のため切れ刃分布は粗になるが新砥石作業面から谷底

までの深さが浅くなるので、研削過程における切れ刃の顕出率が高くなるためと考えられる。

砥石の目

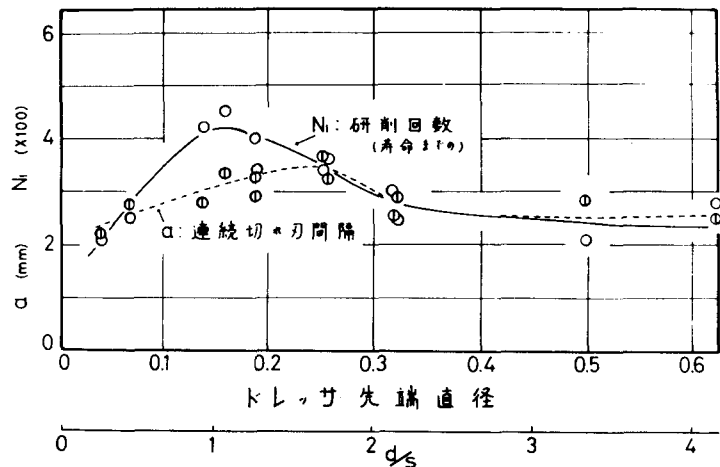


図 5-27 目直し間寿命に及ぼす d/s の影響

直し間寿命に及ぼすドレッサー切り込みおよび d/s の影響を調べた以上の結果より、振動目直しの場合には切れ刃分布を調節するだけでなく、研削過程における新出切れ刃の数が問題となり、これを考慮に入れた振動目直し法が今後要求される。しかし、いずれにしても切れ刃分布および形状の調節は可能であり、砥石の研削寿命を向上させ得ることは明らかである。この一方、仕上面あらさは、振動目直し法の場合もドレッサー回転目直し法と同様仕上面あらさが普通目直しよりも悪くなるという結果を得ている。プランジカット研削では切れ刃分布を粗にすれば仕上面あらさが悪くなるのは前節においても示しているが、第4章で述べたように、テーブル送りを与えることによって仕上面あらさを良くすることは可能である。また、原田³⁾によって、ドレッサーのかわりに超硬板を使用すれば鏡面研削が可能なが明らかにされている。したがって、今後さらに改良すべき点は多々数えられるが、振動目直し法は砥石の目直しに非常に有用であると考えられる。

4 結 論

砥石の研削寿命を向上させるために、切れ刃分布や切れ刃の統計的幾何学形状の調節が可能と考えられるドレッサー回転目直し装置と振動目直し装置を考案し、それらの装置で目直しを施した砥石作業面性状を調べるとともに、砥石の寿命試験を行った結果、次の事柄が明らかになった。

- 1) ドレッサー回転目直し装置を使用すれば切れ刃分布を非常に粗に調節し得る。また、振動目直し装置を使用すれば、切れ刃分布の他に切れ刃の統計的幾何学形状の調節もできる可能性がある。
- 2) これらの特殊な目直し装置で目直しを施すと、普通目直しの場合と比較して、砥石の研削寿命は大きく向上し、その向上率は数倍から10倍に

もなる。

- 3) これらの特殊な目直し装置で目直しを施した砥石の研削過程における切れ刃の挙動は破壊や脱落も多少あるが、巨視的なみかたをすれば摩耗過程とみなせる。
- 4) ドレッサー回転目直し装置で目直しを施した砥石の研削寿命は砥石表面削減率の増加、すなわち、切れ刃分布の減少とともに伸び、消費電力は減少する。また、砥石半径減耗量は研削初期には砥石表面削減率によって影響されるが、それ以降は影響されない。
- 5) 振動目直しされた砥石の研削寿命は目直し直後の切れ刃分布だけでは判断し得ず、目直し後の砥石作業面と谷までの深さも考慮に入れねばならない。
- 6) 両特殊目直し装置で目直しを施された砥石の仕上面あらさは普通目直しと比較して悪くなる。

参 考 文 献

- 1) 横尾・瀬戸・田戸：精密機械，36-9 (1970) 643
- 2) 田中・津和・河村：精密機械，31-5 (1965) 397
- 3) 原田：精密機械，34-3 (1968) 166

第 6 章 総 括

研削盤の自動化による研削作業の高能率化が近年著しく発展しているのに対して、研削作業条件はまだ経験的な設定がなされており、研削現象を考えた理論的設定方法の確立が切望されている。

研削作業条件を理論的に設定するためには、各作業条件における砥石の研削性能を定量化する必要がある。この定量化に際しては、砥石の研削性能が砥石作業面性状によって変化することを考えると、各作業条件のもとでの砥石作業面性状の変化の定量化ならびに砥石作業面性状と研削焼けや仕上面あらさ等の各寿命判定基準との関係を定量的に明らかにしなければならない。従来、これらに関する多くの研究がなされているが、まだ十分でない。とくに、目直し条件と寿命時の砥石作業面性状の関係や研削による砥石作業面性状の変化に及ぼす目直し条件の影響など、目直しに関する事柄が明確になっておらず、研削作業条件の理論的設定に対して、大きな問題となっている。

そこで、本研究は最適研削条件の理論的設定方法の確立をめざし、通常良く使用される単一ダイヤモンドドレッサーで目直し作業を行なう場合の目直し条件と砥石の研削性能の関係を砥石作業面性状を媒介として定量化し、さらに、その結果を用いて砥石の研削性能を向上させ得る目直し装置の開発を試みたものである。

本研究の結果明らかになった事柄はそれぞれの章の結論で述べたので、ここではそれらを通観して主要な事柄のみを記述する。

- (1) 第 2 章では、目直し切れ刃を数種の顕微鏡で直接観察し、目直し切れ刃の表面形態が従来報告されているような微小凹凸面で構成されているのではなく、条痕は有するが非常に平坦な面であることを明らかにした。また、

走査型電子顕微鏡による目直し切れ刃の表面形態、ならびに、研削初期の砥石の非定常損耗領域における切れ刃の追跡を行うことによって目直し切れ刃の表面構造を究明し、平坦な面は微小亀裂または微小砥粒によって構成され、非常に脆弱であることおよびその脆弱層の下層部には微小凹凸面が存在することを示した。そして、レプリカ法で目直し切れ刃の表面形態を観察することによって、従来行われているレプリカ法では脆弱層が除去されるため、微小凹凸面が観察されることを確めた。さらに、目直し切れ刃の脆弱層が研削抵抗に及ぼす影響を調べ、研削初期には脆弱層が影響するため、研削抵抗が高くなることを示した。

- (2) 第3章では、まず同一目直し条件で目直しを繰り返した場合の砥石作業面性状の変化を調べた。そして、総目直し切り込み量が小さい時には目直し前の砥石作業面性状の影響を受けるため砥石作業面性状は変化するが、ある程度総目直し切り込み量が大きくなると砥石作業面性状は目直し過程に影響されずほぼ一定の状態になることを各種目直し条件および砥石について見い出した。また一般に使用される目直し条件を用いて砥石作業面性状を調節するには、目直しによって形成される砥石作業面性状のバラツキを考えれば、目直し条件を大きく変化させる必要があることを示した。とくに、過渡目直し過程では砥石作業面性状のバラツキが大きいことから、希望する砥石作業面性状を目直し過程において目直し条件を変化させることによって得ることは困難であることを明らかにした。さらに、同一目直し条件で目直しを繰り返し、一定の状態になった砥石作業面性状を目直し過程の基準にとれば、砥石作業面性状を目直し過程を含む目直し条件で決定し得ることを明らかにした。

次に、目直し直後から研削焼け以後の研削過程までにおける切れ刃密度、

切れ刃面積率および砥石半径減耗量などを測定し、以下の事柄を見い出した。

- (i) 研削過程における切れ刃密度は研削初期には、多少変化するが、それ以後はほとんど変化せず一定とみなせる。そして、その一定値は目直し条件と対応する。
- (ii) 切れ刃面積率は研削初期には脆弱層が除去されるため減少するが、それ以後研削焼けが生じる附近までは漸増し、研削焼け以後に急増する。
- (iii) 砥石半径減耗量は研削焼けが生じる附近で勾配が変わるが、研削過程に対して近似的に直線関係で増加する。
- (iv) 砥石半径減耗量と切れ刃面積率は近似的に二次関数で表わし得る。

そして、これらの結果より、研削による砥石作業面性状の変化は切れ刃逃げ面摩耗面積、言い換えれば、切れ刃面積率の増加による変化とみなせること、また、切れ刃の統計的幾何学形状が円錐台や角錐台などの非常に簡単な模型で表わせることを明らかにした。さらに、円錐台の模型を使用して、研削による砥石作業面性状の変化が目直し条件によって決定される n_p, θ, η_2 を用いて、

$$\eta_l = (\sqrt{\pi \cdot n_p \cdot \tan \theta \cdot \Delta R} \times 10^{-2} + \sqrt{\eta_2})^2$$

で表わし得ることを示し、目直し条件によって、一義的に決定されることを明らかにした。

- (3) 第4章では、まず、通常使用されているビトリファイド砥石では作成困難である粗な切れ刃分布とともに大きな切れ刃面積率をもつことのできるメタルボンド砥石の作成方法を示した。そして、ビトリファイド砥石とメ

タルボンド砥石を使用し、研削焼けが生じる砥石作業面性状を詳細に究明し、研削焼けは切れ刃面積率 5 % 附近で生じ、連続切れ刃間隔にはほとんど影響されないことを明らかにした。また、砥石作業面性状と研削抵抗の関係を調べ、研削焼けが生じる附近までは研削抵抗は近似的に直線的に増加し、研削焼けが発生する附近で急増することを示した。これらの結果、砥石半径減耗量の変化が研削抵抗と同様な結果であることが前章で得られていることを考えると、研削焼け、研削抵抗および砥石半径減耗量を砥石の寿命判定基準とする場合には砥石の寿命は切れ刃面積率 4 ~ 5 % の間にあり、目直し間寿命はほぼ同じであることが明らかになった。

次に、砥石作業面性状と研削抵抗の関係を解析し、さらに、その解析結果を利用して、工作物表面に研削焼けが発生する熱量が近似的に次式で表わせることを示した。

$$Q \approx \frac{\mu \cdot P \cdot \ell_c \cdot V \cdot \eta_b}{J \cdot v} \times 10^{-3}$$

また、前章の結果を用いて研削焼け、研削抵抗および砥石半径減耗量を寿命判定基準とする場合の目直し間寿命を次式で表わした。

$$L_f = \frac{\sqrt{\eta_f} - \sqrt{\eta_c}}{\Delta R_1 \cdot \sqrt{\pi \cdot n_p} \cdot \tan \theta} \times 10^2 + C$$

上式より、目直し間寿命を長くするためには、切れ刃分布を粗にし、切れ刃の統計的幾何学形状を鋭くすれば良いことが明らかになった。

最後に、砥石作業面性状と仕上面あらさの関係を調べ、仕上面あらさには切れ刃分布、切れ刃逃げ面の大きさおよび切れ刃の表面形状が影響する

ことを確かめた。そして、仕上面あらさを良くするためには切れ刃分布を密にし、切れ刃逃げ面面積を小さくし、さらに、逃げ面を微小凹凸面構造にすればよいことを示した。

- (4) 第5章では、前章までの結果を考え、砥石の研削寿命を向上させ得る二種類の特殊な目直し装置を考案した。ドレッサー回転目直し装置と振動目直し装置で、前者は切れ刃分布を非常に粗にし得るもので、後者はその他に統計的幾何学形状も調節可能なものである。そして、これらの目直し装置で目直しを施した砥石の寿命試験を行い、その研削寿命は単一ダイヤモンドドレッサーで目直しを施した場合に比較して数倍から10倍も向上することが明らかになった。また、消費電力を比較すると少なく、定常損耗領域における砥石半径減耗量はほとんど変化しないことを確かめた。さらに、切れ刃の挙動を調べたが、研削による破壊や脱落は少なく摩耗する切れ刃が多いことが見いだされた。

結

言

終りに本研究の遂行にあたり、終始かわらぬ御指導、御鞭撻を頂いた恩師大阪大学津和秀夫教授に深甚の謝意を表わすとともに、いろいろ御教示を賜った大阪大学田中義信名誉教授、山田朝治教授、築添正教授、井川直哉教授、牧之内三郎教授、中川憲治教授ならびに精密工学科の諸教官に厚く御礼申し上げます。また、明田勇蔵助教授、難波義治助教授、大森義市講師はじめ津和研究室ならびに井川研究室の方々に厚く感謝する次第です。

最後に、本論文を作成するにあたり、御助言と御助力を賜った熊本大学松尾哲夫教授を始め熊本大学工学部生産機械工学教室の諸教官に厚く御礼申し上げます。