

粗粒ダイヤモンド砥石によるファインセラミックスの  
超平滑研削における研削油剤の効果

2005 年 3 月

澤 武一

# 目 次

## 第 1 章 序 論

1.1 ファインセラミックの超平滑研削の動向-----	1
1.2 研削油剤の近年の動向と役割-----	5
1.3 本論文の研究目的と概要-----	10
第 1 章の参考文献-----	13

## 第 2 章 粗粒メタルボンドダイヤモンド砥石の目直し法の開発

### ー 直流電源を用いたツイン電極電解目直し法の考案ー

2.1 緒言-----	15
2.2 ツイン電極電解目直し装置の試作-----	17
2.2.1 ツイン電極法の構造的利点と基本構造-----	17
2.2.2 試作したツイン電極電解目直し装置の設計仕様-----	17
2.2.2-1 電極材料-----	19
2.2.2-2 電極材の面積-----	19
2.2.2-3 研削油剤供給方法-----	20
2.2.3 直流電源ツイン電極電解目直しシステムの構築-----	20
2.3 直流電源ツイン電極電解目直しシステムの適用-----	21
2.3.1 実験方法と目直し評価方法-----	21
2.3.2 砥粒突き出し速度に及ぼす目直し条件の検討-----	23
2.3.2-1 印加電圧と回路電流の関係-----	24
2.3.2-2 砥石作業面の電解反応と極間電気抵抗の関係-----	25
2.3.2-3 砥石周速度が回路電流に及ぼす影響-----	26
2.3.2-4 砥石周速度と砥粒突き出し速度の関係-----	26
2.3.2-5 研削液希釈倍率が目直し特性に及ぼす影響-----	30
2.3.2-6 砥石作業面の形成形態の評価-----	31
2.4 電解目直し法を適用した粗粒メタルボンド砥石の研削特性-----	33
2.4.1 実験方法-----	33
2.4.2 ツイン電極法とシングル電極法による目直し性能の比較-----	35
2.4.3 ツイン電極目直し法と立型ロータリドレッサによる目直し性能の比較-----	36
2.5 第 2 章の総括-----	38
第 2 章の参考文献-----	39

## 第 3 章 プランジ研削法における延性モード研削仕上面に及ぼす研削油剤の効果と影響

3.1 緒言-----	41
3.2 ファインセラミックの延性モード研削加工技術-----	43

3.2.1 ファインセラミックの研削加工の特異性	43
3.2.2 ファインセラミックの延性モード研削加工技術	46
3.2.3 研削油剤の役割と評価	48
3.3 実験装置および実験方法	50
3.4 工作物仕上面性状の評価装置と測定方法	52
3.4.1 ノルマルスキー式微分干渉顕微鏡(Nikon OPTIPHOT XN-UNR)	52
3.4.2 走査型電子顕微鏡 SEM(日本電子 JSM-5800)	53
3.4.3 光干渉型高精度微小表面形状測定器(WTKO TOPO-3D)	54
3.4.4 マルチモード走査型プローブ顕微鏡(NanoScope III)	55
3.4.5 ダイナミック超微小硬度計(DUH-200)	56
3.4.6 2次元研削抵抗測定用弾性八角リング	57
3.5 実験条件	58
3.6 実験結果および考察	60
3.6.1 延性モード研削実験(HPSC)の場合	60
3.6.1-1 研削油剤の供給効果	60
3.6.1-2 研削油剤の種類が延性モード研削仕上面に及ぼす影響	64
3.6.1-3 工作物速度が延性モード研削仕上面性状に及ぼす影響	65
3.6.2 延性モード研削実験(HIPSN)の場合	68
3.6.3 延性モード研削実験( $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiC}$ )の場合	72
3.6.4 延性モード研削実験(ガラス)の場合	76
3.5 第3章の総括	81
第3章の参考文献	82

#### 第4章 平面研削加工に超平滑研削法を適用した場合の炭化けい素セラミック 高平滑延性モード研削仕上面に及ぼす研削油剤の効果と影響

4.1 緒言	84
4.2 超平滑研削法	85
4.2.1 超平滑研削法の仕上面生成機構	85
4.2.2 超平滑研削条件と仕上面生成機構および研削形態の幾何学的検討	86
4.2.2-1 研削方向平行方向間欠送り量 $f_p$ および砥石設定切込み深さ $t$ について	
4.2.2-2 砥石周速度 $V_g$ および工作物研削方向直角方向送り量 $f_{Gn}$ について	89
4.2.3 延性材料の平面研削加工における超平滑研削法の適用効果	90
4.3 実験装置および実験方法	91
4.3.1 実験方法および条件	91
4.3.2 砥石作業面の観察	92
4.4 実験結果および考察	93
4.4.1 粗粒ダイヤモンド砥石による超平滑研削実験(HPSCの場合)	93
4.4.1-1 研削油剤の供給効果	93

4.4.1-2 研削油剤の種類が高平滑延性モード研削仕上面に及ぼす影響-----	96
4.4.1-3 研削油剤希釈倍率が高平滑延性モード研削仕上面に及ぼす影響-----	98
4.5 第4章の総括-----	103
第4章の参考文献-----	104
 <b>第5章 各種ファインセラミックの高平滑延性モード研削仕上面に及ぼす研削油剤 の効果と影響</b>	
5.1 緒言-----	105
5.2 実験装置および実験方法-----	106
5.2.1 実験方法および条件-----	106
5.3 実験結果および考察-----	107
5.3.1 粗粒ダイヤモンド砥石による超平滑研削実験(HIPSNの場合)-----	107
5.3.1-1 研削油剤の種類が高平滑延性モード研削仕上面に及ぼす影響-----	107
5.3.1-2 研削油剤希釈倍率が高平滑延性モード研削仕上面に及ぼす影響----	110
5.3.2 粗粒ダイヤモンド砥石による超平滑研削実験( $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Tic}$ の場合)-----	115
5.3.2-1 研削油剤の種類が高平滑延性モード研削仕上面に及ぼす影響-----	115
5.3.2-2 研削油剤希釈倍率が高平滑延性モード研削仕上面に及ぼす影響----	118
5.3.3 粗粒ダイヤモンド砥石による超平滑研削実験(ガラス)の場合-----	122
5.3.3-1 研削油剤の種類が高平滑延性モード研削仕上面に及ぼす影響-----	122
5.3.3-2 研削油剤希釈倍率が高平滑延性モード研削仕上面に及ぼす影響----	125
5.4 第5章の総括-----	130
 <b>第6章 本研究の総括</b> -----	131
6.1 本研究の成果と概要-----	131

謝辞



## 記 号 表

使用記号		単位
(第 2 章)		
E	電圧	V
I	電流	A
R	極間抵抗	$\Omega$
R <sub>vg</sub>	砥石周速度に関する極間抵抗	$\Omega$
R <sub>dd</sub>	研削油剤に関する極間抵抗	$\Omega$
R <sub>of</sub>	空気層に関する極間抵抗	$\Omega$
L <sub>r</sub>	研削油剤供給量	l/min
GE	砥石と電極の間隔	mm
T <sub>d</sub>	電解目直し時間	min
V <sub>g</sub>	砥石周速度	m/s
v <sub>wp</sub>	研削方向平行方向送り速度(プランジ研削法, トラバース研削法)	mm/s
t	設定砥石切込み深さ	$\mu\text{m}$
(第 3, 4, 5 章)		
V <sub>g</sub>	砥石周速度	m/s
v <sub>wn</sub>	研削方向直角方向送り速度	mm/s
v <sub>wp</sub>	研削方向平行方向送り速度(プランジ研削法, トラバース研削法)	mm/s
f <sub>Gn</sub>	砥石一回転あたりの研削方向直角方向送り量(超平滑研削法)	$\mu\text{m}/\text{rev}$
f <sub>p</sub>	研削方向平行方向間欠送り量(超平滑研削法)	$\mu\text{m}$
f <sub>n</sub>	研削方向垂直方向間欠送り(トラバース研削法)	$\mu\text{m}/\text{s}$
t	設定砥石切込み深さ	$\mu\text{m}$
d <sub>c</sub>	延性モード臨界砥粒切込み深さ	nm
E	ヤング率	Gpa
K <sub>c</sub>	破壊靱性値	MN/m <sup>3/2</sup>
F <sub>n</sub>	法線研削抵抗	N/mm
F <sub>t</sub>	接線研削抵抗	N/mm
$\theta_{\text{max}}$	最大研削点温度	°C
K <sub>w</sub>	温度伝達率	J/m <sup>2</sup> ·s·K
$\rho$	密度	kg/m <sup>3</sup>
c	比熱	J/(kg·K)
k	熱伝導率	W/(m·K)
v	熱源の移動速度	m/s

$v_{wp}$	研削方向平行方向送り速度(プランジ研削法, トラバース研削法)	mm/s
$l_c$	移動熱源幅	mm
$D$	砥石直径	mm
$t$	設定砥石切込み深さ	$\mu\text{m}$
$\alpha_w$	工作物への熱流入割合	
$\alpha_{w \text{ wet}}$	湿式研削における工作物への熱流入割合	
$\alpha_{w \text{ dry}}$	乾式研削における工作物への熱流入割合	
$\beta$	発生研削熱のうち, 工作物側へ熱流入する割合と, 工作物側から研削油剤へ熱流入する割合の比	
$q$	発生研削熱量	J
DH	ダイナミック硬さ	
HV	ビッカース硬さ	
Hk	ヌープ硬さ	
$P$	試験荷重	gf
$D$	押込み深さ(圧子の挿入量)	$\mu\text{m}$
$l$	くぼみの対角線長さの平均値	$\mu\text{m}$

# 第 1 章 序 論

## 1.1 ファインセラミックの超平滑研削の動向

ファインセラミックは、耐熱性、耐摩耗性や電磁気的特性等多様で優れた特性や機能を有し、携帯電話等の情報通信分野、排ガスフィルター等の環境・エネルギー分野、人工骨等の医療・福祉分野等の広範な産業分野における基盤材料として、重要な役割を担っている。その中でも、力学的機能を有する炭化けい素セラミック、窒化けい素セラミックなどは、それぞれの持つ機能に応じて適材適所に利用されている。例えば、炭化けい素は、他のファインセラミックと比べ、高温域(1000℃以上)での機械強度の低下が小さく、耐摩耗性の高い材料であり、また、共有結合性が強いことため各種ファインセラミックの中では最も硬く、耐食性に優れ、液中での摺動特性が良好である。このような特性を生かし、メカニカルシールやケミカルポンプの軸受けなどに利用され、また、半導体製造装置のウェハーフォークや耐プラズマ性が要求される部材などにも利用されている。

窒化けい素セラミックは、単に高強度で高い靱性を持つことだけでなく、低い熱膨張係数、非磁性、耐熱性、耐食性、耐摩耗性、高硬度・高弾性、低摩擦性など多くの優れた性質を同時に付与していることから、ベアリングなど摺動部材として使用されている。

このように、ファインセラミックは、金属材料に比べて、よりシナジー材料的であることを意味するといっても過言ではなく、優れた耐摩耗性は、部材自体の長寿命化を促進し、特に、窒化けい素セラミックの場合には、優れた低熱膨張と熱伝導率特性によって、システムとしての性能を安定化と、且つ長時間保持することができることから、システム自体の長寿命化も可能と考えられる。これらのことは、省資源に寄与し、微細摩耗粒子を排出しないことによる環境保全、さらには省エネルギーにつながることであり、今後の社会において極めて必要な一翼を担うことになるかと推察できる。

さらに、ファインセラミック産業は、近年の携帯電話やパソコン及びその周辺機器の著しい需要増加に伴い、既に約 2 兆円の市場規模に達しているとの調査結果<sup>1)</sup>もあり、今後、ますます先端技術産業発展の鍵を握る素材として、その可能性が大いに期待されている。

しかしながら、ファインセラミックの実用化の速度は、当初の予想に比べて十分なものとは言えない。このような実用化の遅れの原因は、ファインセラミックの工業材料としての歴史の浅さに起因し、この十数年の間に多くの解決を要する問題が明らかにされてきた。そして、これらの中の重要な問題点の一つに、セラミックの持つ難加

工性をあげることができる。

ファインセラミックは、緻密で高硬度であるばかりでなく著しい脆性をもつことから、加工能率や精度、加工変質、表面欠陥による材料強度の低下などの問題があり、また、表面欠陥は表面粗さと相関関係を持つため、表面粗さをできるだけ小さくする必要がある。さらに、セラミック材料は、成形の段階で焼結後の寸法を近似できるとしても、焼結時には10～20%の体積収縮を伴うため、形状歪みが生じ、後加工が必要となる。硬くて、脆く、取り代のバラツキが大きなセラミックは、製品に至るまでの加工に長時間を要し、能率が悪く、加工能率に依存した人件費と工具費による加工コストが70%を超える場合もあり、経済的にファインセラミックが実用の分野で普及することを阻害している。さらに、近年では、セラミック材料の機械構造部品としての需要は、高度な寸法、形状精度が要求され、この要求を満足させるためには機械加工が不可欠であり、加工技術への要求は、形状の小型化、薄型化、表面仕上げ、複雑形状へと難易度が高くなっている。したがって、これらの問題を解決する加工技術の確立することが、ファインセラミックをより広い範囲で実用化する上で必要かつ不可欠な課題である。

そして一方では、近年、機械加工の海外シフトや多品種少量生産への移行、小ロット生産、製品の短寿命化の影響で部品加工に対するコスト削減の要求はますます厳しくなっている現状がある。人件費の高さを踏まえると、国内の加工業者が生き残るには付加価値の高い製品を安く提供するしかない。

このような背景から、高品位精度加工と高能率加工を両立させる加工技術の確立が急務であり、その要望が高くなっている。

ところで、現在、ファインセラミックの加工方法としては、切削加工、レーザ加工、超音波加工、放電加工、化学反応、真空処理などの高度な技術が開発されているが、その主流は、ダイヤモンドホイールやCBNホイールといった超砥粒ホイールを用いた切断加工、研削加工、および遊離砥粒を用いたラッピングやポリッシングである。精密部品の多くは、切削加工や研削加工などの一次、二次加工の後に直ちに製品に組み込まれるわけではなく、多くの場合、精密研磨などの最終仕上工程を要する。しかしながら、近年の研磨加工の動向を見ると、平面や球面などの粗面加工においては、遊離砥粒を用いるラッピング加工と固定砥粒砥石を用いる研削加工、あるいは砥石研磨加工が使い分けられている。例えば、方向性をもつ加工痕の残留を嫌う場合には、ラッピングが好ましいと言われているが、ラッピング加工は、汚れやすく、研磨材の管理が容易ではなく、工具側の摩耗による精度劣化などの基本的な課題があり、ガラスレンズの量産現場では、砂かけと称された精密ラッピングが、ペレット状ダイヤモンド砥石を用いる砥石研磨あるいは精研削に置換えられてきた。また、シリコンウェハの加工工程では、両面ラッピングを研削に置換えるいくつかの研究報告もある<sup>2)</sup>。

そして、鏡面加工のポリッシングにおいては、加工の経済性が重視されることから、アルミニウム合金や無酸素銅など軟質金属材料の非球面のような複雑形状を加工する場合には超精密ダイヤモンドバイト鏡面切削<sup>3)</sup>が、セラミックやガラスなど硬脆材料部品の場合には、超精密鏡面研削などがポリッシングに代わって選択されている。中でも、電解インプロセス目直し法である ELID 研削はさまざまな材料や加工形態に適用でき、実用技術として広く普及するまでになったのは、周知のとおりである<sup>4)</sup>。このように、最近では、研磨加工の前工程である切削加工や研削加工が、研磨加工に置換えた事例は増えている。

とりわけ、遊離砥粒研磨加工を固定砥粒研削加工に置換えることができれば、幾何学的精度(寸法精度、平面度、形状精度)を向上させることができ、飛躍的な加工能率の向上が期待できる。すなわち、定圧切込みを基本とする研磨加工では、加工面のダレなどが生じやすいが、定位置切込みを基本とする研削加工では幾何学的に形状が創生しやすい。さらに、研削加工では、遊離砥粒を使用しないため、作業環境が改善される長所もある。また、工程間のワーク搬送の不要や段取り時間の短縮など、リードタイムの短縮に大きな効果が期待できる。そして、ワンチャッキングによる加工精度の安定性も注目すべきところである。つまり、オールプロセスワンマシン(工程集約型生産)という概念をもって高付加価値型生産を行うことが、今後、高品質・低コストの加工を行う主流となると考えられる。このように、デフレ不況といわれる厳しい経済状況下で、さらなるコストダウンを求められる現在においては、従来と同じ生産体制では利益および納期を確保することは困難な状況となっており、加工工程、加工技術の改善による合理化が不可欠となっている。

現在、ファインセラミックに対する研削加工技術を見てみると、高能率加工に関しては、高剛性、高馬力を持つグラインディングセンタと強度の高いメタルボンドのダイヤモンド砥石、および砥粒保持力の強固な粗粒砥石の組み合わせによる重研削が普及してきている。特にカップ形砥石による正面研削では、窒化けい素加工時の材料除去率が  $5625\text{mm}^3/\text{min}$  にも達することが報告されている<sup>5)</sup>。グラインディングセンタは切削加工機であるマシニングセンタがベースとなっており、また、自動目直し装置なども付随していることから、長時間の無人プログラム加工や工程の集約化が可能で、大幅な加工コストの低減が可能である。また、超音波加工やレーザや放電などと複合させ、セラミック研削の高能率化を図る試みが各種なされている。超音波研削加工<sup>6)7)8)</sup>では、通常の研削に超音波振動を付加することで加工面の微小破砕が促進され、通常の研削に比べ、研削抵抗やチッピングが小さいのでセラミックの高能率加工が可能となる。また、超音波による目直し効果や洗浄効果により砥石の目詰まり防止なども期待できる。レーザとの複合化により機械加工の高能率化を図る方法の一つとして、レーザ援用ケミカルマシニングが提案されている<sup>9)</sup>。窒化けい素など非酸化物系セラミ

ックの表面にエキシマレーザの紫外光を照射すると、Si-N または Si-C 結合が解離して周囲の酸素や水分子と反応し、脆弱な酸化膜や水和膜が形成される。この軟らかくなった層を、工具を用いて機械的に除去加工すれば、硬脆材料であるセラミックの加工能率を格段に大きくすることができる。これまでの報告では、窒化けい素および炭化けい素に 248nm の波長を持つパルス KrF エキシマレーザを 0.4W~2W のレーザパワーで照射しながらダイヤモンド針で切削し、加工能率が約 80 倍向上するという報告もある<sup>10)</sup>。また、クリープフィード研削に高速回転する CBN ホイールを取り付けた HEDG(High Efficient Deep Cut Grinding)が 10 年前にドイツで開発され<sup>11)</sup>、切削加工に取って代わろうという勢いであったが、切削加工の領域を凌駕するには至らなかった。近年では、リニアモータテーブルを採用し送り速度 100m/min の高速・高能率研削盤の実用化が図られている例もある<sup>12)</sup>。一方、切削加工では、コーティングを施した高性能な工具と高速マシニングセンタの実用化により高硬度材料の加工も可能になり、ある程度までの鏡面仕上げも可能になっている。

次に、高品位加工では、前述したように、ラッピングやポリッシングなどの遊離砥粒を用いる鏡面仕上げ法に比べて、形状精度が得やすく、かつ加工能率が高いこと、汎用性に富み、自動化しやすいことなど、研磨加工から固定砥粒研削加工に置換えることにより、種々のメリットが期待できる。脆性材料であるファインセラミックでは、通常の研削領域においては脆性破壊が主になって加工が進行するが、微細な砥粒で砥粒先端をそろえて微小な切込条件で研削すると、脆性材料が金属材料のように延性的に切り屑を生成し、鏡面が得られる延性モード研削が肝要であることが知られている<sup>13)</sup>。このような鏡面研削を実現するためには、微小な砥粒切込みが可能で運動精度が高く剛性の大きい研削盤と粒径 10 $\mu$ m 以下の微粒・細粒のダイヤモンド砥石および良好な型直し・目直し技術が必要となる。とりわけ、砥石の研削性能を決定する型直しと目直しは、一般的に砥石が微粒になるほど困難であるが、微粒砥石の良好な型直し・目直し法もいくつか提案されている。その一つとして、GC カップツルア法があり<sup>14)</sup>、この方法では、脱落して遊離化した GC 砥石の砥粒粉によるラッピング的なボンダ剤の除去によって、型直しが進行するため、同時に目直しも行われ、高精度の砥石形状と良好な砥粒突き出し量を同時に得られ、また、ダイヤモンド砥粒切れ刃にダメージを与えることなく、逃げ面摩耗が形成されないことが特徴である。

また、鋳鉄ファイバをボンダ剤とする砥石が開発され、これまで微粒砥石の課題であった砥粒保持力を飛躍的に改善させた。そして、電解目直しと合わせて超精密鏡面研削を可能にし、注目されている<sup>15)</sup>。この電解目直し法は、パルス電流による砥石面の陽極酸化に近いものであり、ボンダ剤に不導体膜を形成させ、その不導体膜が研削で擦り減り、ダイヤモンド砥粒の突き出しが一定に維持できる。研削の進行中にインプロセスで目直しを行うので ELID(Electrolytic In-process Dressing)として知られてい

る。ELID 研削加工では、鏡面研削用には、#4000 よりも細かい砥粒が用いられ、実験的には、クラスターダイヤモンドを砥粒に用いた #3,000,000 という砥石も開発されている<sup>16)</sup>。この加工システムによる CVD 炭化けい素の研削面の表面粗さは、 $Ra4nm$  にも達する報告がある<sup>17)</sup>。また、化学的作用を利用した鏡面研削法として、通常の砥石を用いた界面反応鏡面研削法がある<sup>18)</sup>。この方法は、加工能率が低いのが欠点ではあるが、砥石を何段階にも変える必要がないので加工精度保持に有効であり、また WA 砥石のような安価な砥石を使用できる利点がある。その中で、WA46JmV 砥石を用いたホットプレス窒化けい素セラミックの研削において、 $Rz30nm$  程度の鏡面を得ることが可能であることが報告されている。

以上概観したように、多様なセラミック研削が提案されており、近年の加工能率や加工精度の向上は目覚ましい。しかし、研削加工の領域においても、粗加工と精密仕上げ加工の区別があり、高能率形状加工と高平滑鏡面加工の双方を両立し、同時に実現できる加工方法は実現されていない。短納期・コスト削減へのニーズが益々高まる現在、こうした加工の合理化、複合加工による工程集約が注目され、従来の生産システムから脱却し、生産現場の新たな主役となる時代が到来している。大幅な工程集約によるリードタイムの飛躍的な短縮は、生産性向上の切り札と言っても過言ではない。そして、このような動向は、研削加工技術においても例外ではなく、高能率・高平滑研削加工技術の開発が急務であると考ええる。

## 1.2 切削油剤の近年の動向と役割

世界のトップレベルの品質とシェアを誇ってきた日本の製造業も、その技術が成熟化に近づいてきた現在、今後の見通しに極めて不透明さを増している。この市場競争力を維持するためコストの削減、あるいはより高い品質・機能のための固有技術の開発を推進する努力が払われている。機械加工技術の高能率化、高精度化、高品位化、情報・知能化などは懸案のキーワードであろう。しかしこの一方、地球環境・資源の問題、社会のグローバル化、高齢化社会に伴う福祉・医療問題など環境・社会構造の急変に直面しており、製造業は、これらの問題に真っ先に取り組まなければならない立場にあると言える。

こうした中、機械加工を行ううえで、高精度・高品位化や高能率化のために重要な役割を果たしてきた切削油剤は、最重要資材の一つであるといえる。なお、ここで言う切削油剤とは、日本工業規格(JIS K 2241)において指定されている通り、切削に用いる切削油剤(狭義の意味)と、研削加工に用いる研削油剤を含めて考えている。

近年では、環境問題がクローズアップされるようになり、地球温暖化に関する二酸化炭素の排出規制、廃棄物に関するリサイクル法、ダイオキシンや環境ホルモン等の環境負荷物質規制など環境を保護する法律が多数成立し、切削油剤に対する要求も大

きく変わってきた。特にダイオキシン規制・PRTR法の制定に伴う特定化学物質の除去は各油剤メーカーとも注力し、制定後は、各企業とも環境保護を重視している。企業においては、ISO14000関係あるいは欧米などとの取引において、製造に使用している切削油剤が影響する可能性もある。

切削性能を重視しすぎると環境や安全性が犠牲になり、環境や安全性を重視しすぎると性能が犠牲になり、どちらを重視すべきか世界的にも意見が分かれている状況にある。例えば、ドイツのように性能を犠牲にして環境・安全面を重視する国もあるが、精密加工技術の高精度化・高平滑化の要求を充たしていくためには、出来る限り、性能と環境・安全面をうまくバランスが取れた方向をめざすべきであると考えられる。今後、性能の追求と環境・安全性の追求を両立させるためには、切削油剤に関する質の高い技術・情報の収集が必要となるが、油剤技術は、高度な化学技術を駆使する領域でありながら、工作油剤という産業に対する一般の認識は明確なものではなく、さらに、加工技術や測定技術に比較し、油剤技術は、その情報の収集が不足し習得が遅れているように思われる。

切削油剤は、マシン油などのベースオイルに、界面活性剤や酸化防止剤、消泡剤などの添加剤を配合し、多彩な製品が油剤メーカーから提供されている。従来、切削油剤には切削性を高めるために極圧添加剤として、塩素化パラフィン等の塩素系化合物が利用されてきた。極圧添加剤は、化学反応により加工物表面に反応膜を形成し切削抵抗の低下や、構成刃先の抑制等の効果を発揮し、機械加工における油剤の一時的効果として、工作物精度、仕上面粗さ、工具寿命、機械寿命、工作物の防錆性などに寄与してきた。しかし、近年では、環境問題への関心が高まり、近年のダイオキシン問題から塩素系切削油剤は敬遠される傾向がユーザーに広がりつつある。ダイオキシンは、廃油として最終的に焼却処分される際に、「発癌性物質のダイオキシンが高濃度で生成」「酸性物質の大気放出(酸性雨、大気汚染)」の問題が指摘されたからである。また、廃油処理業者からも環境問題と合わせ、燃焼炉の酸腐食の問題から塩素含有廃液の処理業者の引き取り拒否や料金の上乗せ等が出ており、ユーザーへの負担が大きくなっていることも影響している。さらに、最近では金属加工油の切削熱でもダイオキシンが生成されているのではないかと指摘もされている。

ここで切削油剤が関係する環境負荷要因を以下に示す<sup>19)</sup>。

(1) 切削油剤自体が持つ環境負荷(直接的要因)

- ①塩素系化合物
- ②窒素系化合物
- ③PRTR対象物質

(2) 加工現場で切削油剤を使用することによって生じる環境負荷(間接的要因)

- ①加工点へ大量の油剤供給することによるエネルギーの大量消費



## (二酸化炭素の排出)

### ②切削油剤の劣化に伴う多量の廃油(廃棄物の発生)

これらへの対応として、油剤メーカーは環境負荷物質を含まない塩素フリー、窒素フリー、PRTR 対応切削油剤の開発を行い、また、廃油発生量を減らすため(水溶性切削油のロングライフ化)、シンセティックタイプ油剤、腐敗劣化しにくい切削油剤の商品化に取り組んでいる。さらに、今後、各企業のグローバル化が進めば、海外関連の環境規制を遵守せねばならず、それに伴う規制物質(環境ホルモン、水生生物に対する毒性)も増えることが予想されるため、更なる次世代環境対応型油剤の開発が必要になる。現在、販売されている環境対応型切削油剤は、塩素フリー油剤、窒素フリー油剤、PRTR 対応油剤、廃油の発生量を抑制するシンセティックタイプ油剤が挙げられる。

以下に、これら油剤について、開発の経緯と動向を示す。

#### 1.塩素フリー油剤

塩素系化合物は安価で切削性能を向上させることができるため、ダイオキシン問題が取り沙汰されるまで不水溶性切削油剤の多くに使用されてきた。しかし、ダイオキシン問題から塩素系化合物に代わる潤滑添加剤を探索し、硫黄系極圧添加剤や合成潤滑剤により構成された研削油剤が開発された。そして、水溶性切削油剤でも同様に塩素フリー油剤の開発が行われている。ただし、水溶性切削油剤での塩素系化合物含有量は不水溶性切削油剤に比べ少ないため、従来のエマルジョン型水溶性切削油剤で対応できる加工が多い。現在、塩素フリー油剤への置換えが進み、近年中には塩素系切削油剤はなくなるものと推測される。

#### 2.窒素フリー油剤

水溶性切削油剤は構成成分として窒素化合物を含んでいるものがほとんどである。水溶性切削油剤に使用されている代表的な窒素化合物はアミン(アルカノールアミン等)である。アミンは希釈液中で防錆、腐敗の抑制、pH の維持など様々な性能に関与し、脂肪酸アミン塩として乳化剤(界面活性剤)の役割も有する重要な成分である。アミン以外にも防腐剤、防錆剤および界面活性剤など窒素化合物が使用されている。窒素化合物のうちアルカノールアミンは廃液として処理される際、化学的処理方法や物理的処理方法では除去しにくい。そのため、高 COD、BOD 値を与え、富栄養化といった水質汚濁の原因になる。一方、廃液を焼却処理すると窒素酸化物( $\text{Nox}$ )を生成する可能性があり、大気汚染への影響も考える必要がある。そこでアミンを含まない(アミンフリー)油剤および窒素化合物を使用しない(窒素フリー)油剤の開発が進められている。アミンフリーおよび窒素フリー油剤は、凝集処理後の COD 値、BOD 値が従来型の油剤と比べて低く、水系への影響は少ないと考えられる。しかし、従来型の油剤に比べ耐腐敗性が劣るなど問題点も少なくない。このような問題点の改善が当面の課題である。

### 3.PRTR 対応油剤

PRTR 法に指定された化学物質は使用禁止物質ではないが、環境負荷が大きいため使用しないことが望ましい。切削油剤には、アミノエタノール、ホウ素化合物、ポリオキシエチレンノニルフェニルエーテル、モリブデン化合物が使用されてきた。しかし、各油剤メーカーはこれら指定物質を含まない商品を開発し、展開している。現在、大手の金属加工工場では、ISO14001 の取得も追い風となり、ほとんどが PRTR 対応油剤を使用している。

### 4.シンセティックタイプ油剤

環境負荷を少なくする手法の 1 つとして、廃油・廃液の発生量を減らすことがある。この観点から最近シンセティックタイプ油剤が注目されている。シンセティックタイプ油剤は、従来の油剤に比べ耐腐敗性に優れ、更液周期を延ばすことができる。シンセティックタイプ油剤とは「鉱油等の天然成分を含まず、化学合成された潤滑成分(合成潤滑剤)を適用した油剤」と定義される。切削油剤に使用される合成潤滑剤は多種類あり、各々の特長を生かした油剤が数多く販売されている。合成潤滑剤の中で比較的多く使用されているのはポリオキシアルキレングリコール(以下 POA と略記)である。POA で構成した油剤はクーラントが透明なソリューションタイプとなる。この油剤は、従来型のソリューションタイプと比較して潤滑性(切削性)が高く、耐腐敗性に優れ、機械周りが汚れ難いなどの特長を有する。特に耐腐敗性については注目すべき点である。シンセティックソリューションタイプは耐腐敗性に優れるものの、凝集処理ができないため排水処理性に劣る(高 COD 値)という問題点があり、使用上注意が必要である。しかし、合成潤滑剤(POA 等)を生化学的に分解することも考えられており<sup>20)</sup>、今後の展開が期待される。一方、凝集処理可能なシンセティックソリューションおよびシンセティックエマルジョンタイプの油剤も開発されており<sup>21)</sup>、その使用は急激に拡大している。

こうした一方で、工作機械メーカーにおいては、切削油剤を使用しないドライ加工、セミドライ加工、および極少量の切削油剤のみを使用する MQL 加工(Minimal Quantity Lubricant system, 極微量切削油供給方法)、噴霧切削<sup>22)23)</sup>、あるいは冷風切削、研削<sup>24)</sup>の検討がなされ、一部ではすでに実用化されている。しかしながら、これらの加工法にもいろいろと問題点が生じ、全ての加工をクーラントレス化することは不可能であることが報告されている。例えば、MQL 加工の場合には、平均粒径が 1 $\mu$ m 程度にミスト化し供給され、通常、ミストコレクターを設置することにより回収されるが、万一外部に漏れた場合には、工場内を浮遊し作業環境を悪化させる。さらに、不水溶性切削油剤の場合には、火災の危険性もある。そして、長時間の加工では、酸化重合が起こりノズル詰まりや機械周辺の汚れが目立つことも指摘されている。

加えて、ドリル加工、タップ加工、リーマ加工などの穴加工は、ドライ加工は困難

であり<sup>25)</sup>、また、鋳鉄の加工をドライで加工するとカーボン粉塵の飛散により塵肺の問題が生じる。そして、切削加工の将来は超高速マシンを用いた微少切込みによる加工が増える傾向にあるが、ドライ加工では高速で飛び交う微粒切り屑による肺の損傷が心配となる。さらに、寸法精度や工具寿命などの問題もある。これらの問題は、高速で砥石が回転する研削加工においても、同様に指摘されている。それでも、近年、切削加工分野では、コーティング技術などによる工具の耐熱性が大きく向上しており、冷却性に関する切削油剤の必要性が薄らいできている一方で、研削加工の場合には、使用される超砥粒はそれほど熱には強くなく、切削速度は 1000mm/min 以上と高速であり、さらに、工具形状は、無数の不定形ですくい角は負である。この結果、600℃以上の熱が発生し、特に、工作物がファインセラミックのような高硬度材になる場合には、研削点温度は 1000℃に達することは珍しくなく、切削加工に比べて非常に高温となり、適用する油剤の冷却性能が高度に要求される。さらに、研削油剤の中には、ホーニング加工用油剤のように油剤の粘度を低くし、砥粒切れ刃の食付きをよくする場合や、水溶性油剤のケミカルソリューション形油剤のように油剤の潤滑性を制限した成分で構成される油剤も多くある。

このように、切削・研削加工の理想は乾式であるが、現状では、要求される加工精度、仕上面粗さ、環境や安全面において完璧な加工方法はないと言える。昨今の機械加工現場に求められる要求は、高品位、高精度、高信頼性に加え、低コスト、短納期と厳しい状況にあり、また、一部工程のみをドライ化しても前後工程で切削油剤を供給した場合には、必ずしも環境に効果的であるとは言えない。こうした背景が、ドライ化や MQL 化の進行に歯止めをかけている現状でもある。

こうした中で、今後の機械加工においても、切削油剤の一時的効果である潤滑作用、冷却作用、溶着防止などの効果、また、二次的効果である粉塵の除去や切り屑の洗浄効果は必要であり、特に近年における機械加工に要求される高品位化・高能率化において切削油剤の役割はより一層重要である。しかしながら、一方では、今後、環境負荷の問題に関しては、無廃液化に取り組むことが必要であると考えられ、将来的には、廃棄物をゼロに近づけるための新しい切削油剤の開発や加工システムの構築が必要不可欠であるとする。

まずは、切削油剤の適切な管理、無廃液化する取り組みが重要であると共に、各加工に最も適した最適油剤の選定を行う必要があると考えられる。加工に適した切削油剤を選定することは、工具費のロスを抑制し、工作物の精度向上、さらに、機械寿命においても、機械内部腐蝕を防止し、オーバーホール費など余分な費用を抑え、機械寿命を大幅に長くするということにも繋がり、結果的に環境改善への取り組みとなることを追記しておく。

### 1.3 本論文の研究目的と概要

ファインセラミックは、多くの優れた機械的・電氣的あるいは光学的特性を持つ高品位の構造材料、機能材料として期待されている。しかし、その特性を有効に発揮させるためには、要求される形状寸法精度・仕上面粗さで、精密に加工する必要がある<sup>26)</sup>。

一般に、ファインセラミックは、素材成形のあと、各種の焼結方法で適正にプロセス制御されながら製造されるが、焼結時に起こる素材収縮が定量的に決定しえないのため、本来的にその形状精度には限界があり、必要な形状寸法精度を実現するためには、何らかの機械加工を加える必要がある。

高硬度・高脆性であるファインセラミックの高精度加工では、通常まず、ダイヤモンド砥石を用いて能率良く荒研削・中仕上研削を実施して、その後、ラッピング加工や細粒・微粒砥石による超精密加工などを行って最終的な高平滑面を得るプロセスが採られている。したがって、これらの工程では使用する砥石の変更や工作物の着脱作業が生じ、加工効率が低下して加工コストが上昇し、さらには加工精度等にも悪影響を与え、高精度加工の課題となっている<sup>27)</sup>。

ファインセラミックの高平滑研削を実現するためのひとつの方法として、延性モード研削がある<sup>28)</sup>。これは、シリコンをダイヤモンドバイトで切削する際に、工具すくい面が負の方向に大きくなるにつれ、接触面の脆性が減少して延性モード面が表れる現象に着目した考え方である<sup>29)</sup>。この加工原理については、未だ完全には明確にされていないが、こうした例から、延性モード研削加工では、砥粒切れ刃の先端を平坦に揃えることが有効であるとされ、ファインセラミックなどの高脆性材料の研削においても、延性モード研削仕上面の実現が可能であることが報告されている。

従来、延性モード研削の実現方法として、微小な砥粒切込みが可能な粒度#1500以上の細粒ダイヤモンド砥石の使用が一般的であり<sup>30)31)</sup>、近年では粒度#10000以上の超微粒砥石の利用も検討されている<sup>32)</sup>。しかし、砥粒が細粒から微粒になるにつれ、砥粒保持力が低下し、研削中における砥粒の脱落が生じやすくなり、連続した研削加工が難しくなる。また、劣化した砥石作業面を適性に再生させるための目直し作業等も粒径が小さくなるほど容易ではない。つまり、細粒・微粒の砥石を用いた延性モード研削では、加工能率を大きく改善できないなど、基本的な課題を抱えている。

これに対し、粗粒砥石で高平滑研削が実現できれば、荒研削から最終工程まで、全ての工程を能率良く行い得え、オールプロセスワンマシーン(工程集約型生産)の可能性があると安井らによって示されている<sup>33)</sup>。さらに、安井は、従来研削加工で主流に実施されているプランジ研削法やトラバース研削法で得られる仕上面粗さの生成機構を理論的かつ実験的に検討し、粗粒ダイヤモンド砥石を用いた場合、その仕上面には、研削方向と直角方向に高さ200nm程度の研削条痕が発生するため、高平滑な鏡面、特に最大高さ $R_z$ 100nm以下の仕上面を得ることは容易ではなく、研磨加工に匹敵

する高平滑研削加工は非常に困難であることを示した<sup>34)</sup>。そして、高平滑研削加工を行うためには、研削方向直角仕上面粗さが問題であるため、この研削条痕を低減、または確実に除去し得る新たな研削加工法として、従来のトラバース研削法とは逆に、まず、砥石あるいは工作物を、研削方向とは直角方向に送り、次いで、研削方向と平行に微小な送り量だけ、工作物あるいは砥石を間欠的に移動させ、そして、再度、砥石あるいは工作物を、研削方向と直角方向に送り工作物を仕上げる超平滑研削法と呼ぶ新たな概念の超平滑研削法を考案・開発した<sup>35)36)</sup>。そして、これまでに、超硬合金や各種ファインセラミックの仕上面粗さを、50nm 以下に加工し得たことを報告している。

そこで本研究では、この超平滑研削加工法を各種ファインセラミックに適用し、超平滑研削加工のさらなる高平滑化と高能率化を目標として、超平滑研削諸条件が仕上面性状および仕上面粗さに及ぼす影響を検討するとともに、仕上面性状や研削加工形態に大きく影響を与える研削油剤の効果と影響について実験的に検証することにした。

近年、次世代環境対応型切削油剤として、新しい研削油剤が開発され、市販されているが、必ずしも従来と同等の潤滑および冷却性能を期待できない場合もある。さらに、切削油剤に関する研究報告は極めて少なく、また、現在では、急速な勢いで改善され発売される切削油剤にユーザーも追従できていない状況にある。

本実験では、合成潤滑油の成分が異なる3種類のシンセティックタイプ油剤を用い実験を行った。そして、研削油剤の選択は、工作物の仕上面性状および仕上面粗さに対し、研削条件の選択と同等以上に重要な要因であることを確認した。

本研究で得られる成果は、粗粒メタルボンドダイヤモンド砥石を用いた、高能率・高平滑研削加工技術の確立の基礎的研究であり、さらに、将来、広く普及するであろうシンセティックタイプ油剤の適切な選択方法の指針となるものと考えられ、有意義なものと判断される。

なお、本論文は6章より構成され、各章の概要は以下の通りである。

第1章では、近年のファインセラミックに求められる高能率・高平滑研削加工技術の確立の必要性和、次世代環境型切削油剤の動向および、機械加工における切削油剤の重要性について述べ、その背景に基づき、本研究の目的と意義を明らかにしている。

第2章では、粗粒メタルボンドダイヤモンド砥石の効率的な目直し法として、インプロセスで目直し可能な陰極電極非消耗型の直流電源を用いたツイン電極電解目直し法を考案し、装置試作を行い、砥粒の突出しを効率的に行うための、最適目直し電流値が存在する指針を検討している。さらに、従来電解目直し法として広く使用されているシングル電極法と開発したツイン電極法に関して、目直し特性および研削特性を実験的に検討し、その実験結果に基づき、ツイン電極電解目直し法の有効性について論じている。

第3章では、ファインセラミックである炭化けい素セラミック(HPSC)、窒化けい素

セラミック(HIPSN)、アルチックセラミック( $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiC}$ )、および近年、ハードディスク基板など、電子機器部品等に多彩に採用され、エレクトロニクス分野の技術革新を支えるガラスを工作物として、#140の粗粒メタルボンドダイヤモンド砥石を用いた場合における延性モード研削の可能性を、平面プランジ研削により実験的に検討した。検討は、テーブル速度を変化させることにより、延性モード研削の可能性を探った。さらに、乾式研削と3種類の環境対応型シンセティックタイプ油剤を用いた湿式研削を行い、実験により得られた研削抵抗値から、移動熱源理論を用いて研削点温度を理論的に算出し、延性モード研削加工形態および、延性モード仕上面性状に及ぼす研削油剤の効果と影響について考察した結果について報告する。

第4章では、本論文の中心テーマであり、開発した超平滑研削法を炭化けい素セラミック(HPSC)の平面研削加工に適用し、#140の粗粒メタルボンドダイヤモンド砥石を用いた高平滑研削仕上げに及ぼす研削油剤の効果と影響について検討した結果について述べている。検討は、乾式と3種類のシンセティックタイプ油剤を用いた湿式の超平滑実験を行い、超平滑仕上面性状および、超平滑仕上面粗さを比較することにより行った。また、3章で得られたプランジ研削による延性モード研削実験の結果と比較することにより、開発した超平滑研削法の有効性も含めて報告する。

第5章では、超平滑研削法の実用化を目的に、窒化けい素セラミック(HIPSN)、アルチックセラミック( $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiC}$ )、およびガラスの超平滑平面研削加工を行い、各種硬脆材料の高平滑研削仕上げ面に及ぼす研削油剤の効果と影響について、第4章で得られたHPSC超平滑実験結果と比較しながら、検討した結果について報告する。また、高平滑研削仕上面性状に及ぼす研削油剤希釈倍率の影響については、実験により得られた結果を基に、各種工作物の機械的特性値と延性モード研削加工形態の関係についても考察している。

そして、第6章では、第2章から第5章までに得られた主要な結論を要約し、各章の内容について総括する。

## 1 章の参考文献

- 1) ファインセラミック協会編：「ファインセラミック産業動向調査」(2000).
- 2) T.Abe : Future Technology for Silicon Wafer Processing for ULSI, Precision Engineering, 13, 4(1991)251.
- 3) オプトメカニズム時代の超精密切削技術, 工学技術コンタクト, 臨時増刊号(1991)
- 4) 大森整 : ELID 研削加工技術, 工業調査会, (2000)
- 5) 日本セラミック協会 : セラミック, 28, 9(1993)886.
- 6) 久保田護, 田村祐二, 島村則安 : ダイヤモンド工具による超音波加工, 精密機械, 42, 3(1974)197.
- 7) P.Legge : Ultrasonic Drilling of Ceramics, Ind.Dia.Rev. , 24, 278(1964)20.
- 8) 海野邦昭 : 超音波研削装置の試作とその加工特性, 精密工学会誌, 51, 1(1986)107.
- 9) 日比裕子 : 機械技術(日刊工業新聞社), 42, 11(1994)38.
- 10) 日比裕子 : 第 31 回機械技術研究所研究講演会 : 機械技術研究所における(超先端加工システム)の研究成果報告, 50, (1994).
- 11) Tawakoli T : High Efficiency Deep Grinding, VDI-verlag(1993)
- 12) 岡本工作機械製作所 : CNC 高能率研削盤 技術カタログ, 2003
- 13) 宮下正和 : ぜい性材料の延性モード研削加工技術ーナノ研削技術への道ー, 精密工学会誌, 56, 5(1990)782.
- 14) 庄司克雄 : 精密工学会誌, 54, 5(1988)1981.
- 15), 17) 大森整, 中川威雄 : 1991 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, (1991)613.
- 16) 河西敏雄 : 精密工学会誌, 59, 4(1993)28.
- 18) 杉田忠彰, 上田完次, 西川勝信 : 1981 年度精密工学会秋季大会学術講演論文集, (1981)476.
- 19) 丸尾直樹 : 最近の環境事情と切削油剤について, ユシロ化学工業メンテナンスガイド, 3(2004)
- 20) 河合富佐子 : 高分子学会論文集, 50(1993)775.
- 21) 大胡栄一 : シンセティッククーラントの最近の動向, 潤滑経済, 11(2001)16.
- 22) Jae-Yong , Um, Louis , C.Chow and I.S.Jawahir: AS ME MED, 2-1(1995)165.
- 23) 北側亮三, 藤田武雄 : 機械学会講演論文集 C54, 500(1988)976.
- 24) 奥村成史, 横川和彦, 横川宗彦 : 平成 9 年度神奈川県産学公交流研究発表会資料, 59.
- 25) 切削油技術研究会 : 第 62 回総会資料, (2000)
- 26) 吉田庄一郎, 伊藤博 : 光学部品の延性モード研削加工とその将来への期待, 精密工学会, 56, 05(1990)820.
- 27) セラミック加工研究会編 : ファインセラミックの精密加工, 工業調査会, (1990).

- 28)P.A. McKeown, K.Calisle, P. Shore and R.F.Read : Ultra-precision, High stiffness CNC Grinding Machine for Ductile Mode Grinding of Brittle Materials, 精密工学会誌 56, 5(1990)806.
- 29)C.K.Syn and J, S.Taylor : Ductile/Brittle Transition of Cutting Mode in Diamond Turning of Single Crystal Si and Glass, ASPE/IPES Conf.(1989)
- 30)大森整：超精密鏡面加工に対応した電解インプロセス目直し(ELID)研削法, 精密工学会誌, 59, 9(1993)1451.
- 31)鈴木弘, 阿部守年, 難波義治：メタルボンドダイヤモンド砥石によるガラスセラミックの延性研削, 63, 4(1997)535.
- 32)橋本洋, 竹田次郎, 今井健一郎, ケネスブルーデル：硬ぜい材料のシェアモード研削と表面性状, 59, 3(1993)455.
- 33)安井平司, 有野芳弘, 松永邦夫, 山崎豪：粗粒ダイヤモンド砥石によるファインセラミックの延性モード研削の検討, 1996 年度精密工学会秋季大会学術講演論文集, (1996)115.
- 34)安井平司, 有野芳弘, 松永邦夫：粗粒ダイヤモンド砥石によるファインセラミックの延性モード高平滑研削(第 1 報)ー粒度#140 のメタルボンドダイヤモンド砥石による延性モード研削ー, 精密工学会誌, 63, 9(1997)1270.
- 35)安井平司, 山崎豪：粗粒ダイヤモンド砥石によるファインセラミックスの超平滑研削の可能性, 69, 1(2002)115.
- 36)安井平司：研磨レス超平滑研削法の開発(第 1 報)ーその考え方とー, 二の実験的検討ー, 69, 12(2003)1713.



## 第2章 粗粒メタルボンドダイヤモンド砥石の目直し法の開発 — 直流電源を用いたツイン電極目直し法の考案 —

### 2.1 緒言

超砥粒砥石では、砥粒の長寿命という特徴を有効に利用するため、砥粒の保持力が強固なメタルボンド砥石を用いることが望ましい。また、メタルボンド砥石は、高強度、高研削比などの利点を有しており、高形状精度加工および高能率加工に適している。しかしながら、メタルボンド砥石は砥粒保持力が強固すぎるため、形直し・目直しが困難であるという欠点がある。さらに、ファインセラミックなど硬脆材料の精密研削においては、自生発刃作用が生じにくいいため、目つぶれが生じやすく、結果として、砥石の切れ味が悪くなり、加工能率が低下するとともに、チップングやクラックなど表面品質が悪くなることが問題となっている。したがって、これらの問題を解決し、品質の安定した信頼性の高い加工を行うためには、形直し・目直し作業により、メタルボンド砥石の作業面性状を常に良好に整えて、最適な状態に保つことが重要になってくる。このように、メタルボンド砥石を用いた高硬度材料の精密研削においては、砥石の切れ味を向上し、その良好な切れ味を維持させるために、いかに最適な目直し法を開発することがとりわけ重要な課題となる。

現在、メタルボンドダイヤモンド砥石の目直し法については多くの研究が行われ、実用化されている<sup>1), 2), 3), 4), 5), 6), 7)</sup>。しかしながら、生産現場では、研削加工開始後、砥石の切れ味が低下するたびに行う目直しが特に問題であり、砥石コストのみならず、加工能率や加工物品質の大幅な低下を招いているのが現実である。

そこで最近では、メタルボンドダイヤモンド砥石を用いた精密研削作業の加工能率や加工物品質を向上させるため、インプロセスで目直しを行う研究が数多く行われている。

とりわけ、メタルボンド砥石の場合には、ボンド剤が金属であるという特性から、放電作用や電解作用を利用した目直し技術が有効とされている。放電作用を利用した方法では、砥石と電極間の放電を利用してボンド剤を除去する方法<sup>8)</sup>と電極を研削しながら、切屑とボンド間の放電を利用する方法がある<sup>9)</sup>。しかしながら、放電目直しは、砥粒に与えるダメージが大きいことや、放電パターンの不均一による形直し・目直し精度の低下などの課題を残している。

一方、1950年代前半にアメリカで開発された電解目直し法は<sup>10)</sup>、目直し条件を容易に、広範囲に変更できるため、比較的目直し時間を短くでき、また、砥石と非接触で目直しができるという特徴を持っている。さらに、電解目直し法は、砥粒先端に損傷

を与える機械的な目直し法と比べ、ほとんど砥粒先端を痛めることなく、砥粒の突出しが得られる利点を有している。

たとえば岡野ら<sup>11), 12), 13)</sup>は、直流電源を採用したシングル電極法を用いて、メタルボンドダイヤモンド砥石の電解目直しを開発している。この方法では、湿式ブランチ研削による WA 砥石の目直し法に比べ電解目直しの方が、目直し能率が高いことが報告されている。しかしながら、研削油剤に食塩水(NaCl)を使用しているため、機械が錆びやすいことや、局所的な電解集中による砥石作業面のダレが生じることなどを課題として残している。また、常時砥石が通電されているため、ボンド剤の過度な溶解が生じ、オーバー目直しになりやすいことが指摘されている。

また大森ら<sup>14), 15)</sup>は、電解インプロセス目直し法(ELID 研削法)を開発し、鏡面加工を実現している。この方法の特徴は、微粒の鑄鉄ファイバボンドダイヤモンド砥石と一般の水溶性研削油剤および直流パルス電源を利用することにより、良好な砥粒の突出しを得るとともに、水酸化物および酸化物などの電解生成物(不導体皮膜)がオーバー目直しを防ぎ、砥粒摩耗に応じた電解制御を行えることである。また、水溶性研削油剤を使用することから、錆の問題を解決している。

しかし ELID 研削法では、微細超砥粒砥石を用いるため、高い仕上げ面品位が期待できるものの、加工能率に制約がある。また、この方法を粗粒の鑄鉄ファイバボンドダイヤモンド砥石へ適応する場合には、電解生成物が絶縁体である不導体皮膜を生成しやすく、十分な砥粒の突出しを得る前に電解作用がとまってしまうという不都合がある。また、精密研削における粗研削工程に用いられる粗粒のメタルボンドダイヤモンド砥石への適応に対しては、研削油剤の供給ムラによる局所的な電解集中および砥石作業面のダレが発生しやすい。そして、青銅ボンドは鉄系ボンドに比べ、酸化皮膜が固定しにくく、ボンド剤の溶出が激しく、オーバー目直しになり易いなど、現状ではまだ多くの検討課題を残している<sup>16), 17)</sup>。

加えて、ELID 研削法の場合には、カーボンブラシを用いて、高速回転する砥石へ給電を行っているため、ブラシの異常消耗により、給電が不安定になることが問題点である。さらに、導電性がある工作物の加工に際しては、加工点から火花が発生するなど、砥石と工作物および工作機械の間に、十分な絶縁対策が必要であるという不都合がある<sup>17)</sup>。

鈴木ら<sup>18)</sup>は、ブラシによる給電を改善する方法として、ツイン電極インプロセス電解目直し法を提案している。この方法では、砥石に 1 対の電極を対向させて配置し、そして研削油剤を介し給電を行うことにより、ブラシレスでの給電を可能にしている。しかし、この方法の場合には、交流電源を用いることが前提であり、そのため電極材が一時的に陽性を帯び、消耗するので、砥石が形崩れを起こしやすいという課題を残している。

このように、メタルボンドダイヤモンド砥石の電解目直し法は、非常に有効であると認められているが、まだ前述のように多くの問題点が未解決であるため、これらの問題点を改善した新たな方法を開発する必要がある。

そこで本章では、これらの電解目直し法の問題点を改善した直流電源を用いたツイン電極目直し法を提案し、その目直し特性を検討することにした。この方法の場合には、砥石を介して2極の電極材を配置し、その間に研削油剤を供給し、そして直流電源を接続する結果、回転する砥石では、陽極に接近した部分は陰性を、また陰極に接近した部分は陽性を帯びる。そのため、砥石作業面は、仮想的な交流状態になり、酸化と還元が繰り返されるので、局所的な電解集中が抑制され、電解生成物の成長が少ないという特徴を有することになる。このような考え方に基づき、一般によく使用されている粗粒のメタルボンドダイヤモンド砥石に、本目直し法を適応することにより、大きな砥粒の突出しが得られると考えられる。また、直流電源を採用するため、陰極の消耗が理論的にゼロとなるので、安定した研削油剤の供給が可能と予測される。また、同時に砥石の形崩れが抑制でき、従来指摘されていた電解目直しの問題点がより改善されると判断される。

このように、粗粒のメタルボンドダイヤモンド砥石に直流電源ツイン電極目直し法を適用することにより、目直しの高能率化、簡易化が実現できるとともに、本方法をインプロセスで適用することにより、砥石の良好な切れ味が長く持続でき、品質の安定した高能率、精密研削が可能になると考えられる。また、高い強度や耐摩耗性を有しているが故に、生産コストの低減が困難であった超硬合金やファインセラミックなどの硬質材料の精密研削において、工程の短縮化、自動化および高品位化など、多くのメリットが得られると予想される。

## 2.2 ツイン電極目直し装置の試作

### 2.2.1 ツイン電極法の構造的利点と基本構造

現在、超砥粒砥石の電解目直し法としては、図 2.1 に示すようなシングル電極法とツイン電極法が提案されている。シングル電極法は、加工物、すなわちメタルボンド砥石が陽極(+), 電極材を陰極(-)として、その間に研削油剤を供給し、そして電圧を加え、電解作用により目直しを行う方法である。このシングル電極法は、加工物であるメタルボンド砥石が常に陽極(+)であるために、加工能率は優れている<sup>19)</sup>が、陽極酸化が生じやすく、電解生成物が成長しやすいという欠点がある。また、導電性を持つ工作物の場合には、電極装置と工作物及び工作機械の間に、十分な絶縁対策が必要であるという不都合もある。

一方、ツイン電極法は、加工物であるメタルボンド砥石を介した2極の電極材に研削油剤を供給し、電圧を加えることにより、目直しを行う方法である。この方法では、

加工物すなわちメタルボンド砥石への電源供給が非接触で行えるという特徴を持っている。また、回転する砥石では、陽極に接近した部分は陰性を、そして陰極に接近した部分が陽性を帯びることになる。そのため、砥石作業面が、仮想的な交流状態になり、酸化と還元を繰り返すため電解生成物が生じにくいという特徴がある。また、ツイン電極法の場合には、理論的には、電流が電極材→砥石→電極材のように両電極間と加工物(砥石)にしか流れないため、絶縁対策が比較的簡単であるという利点もある。

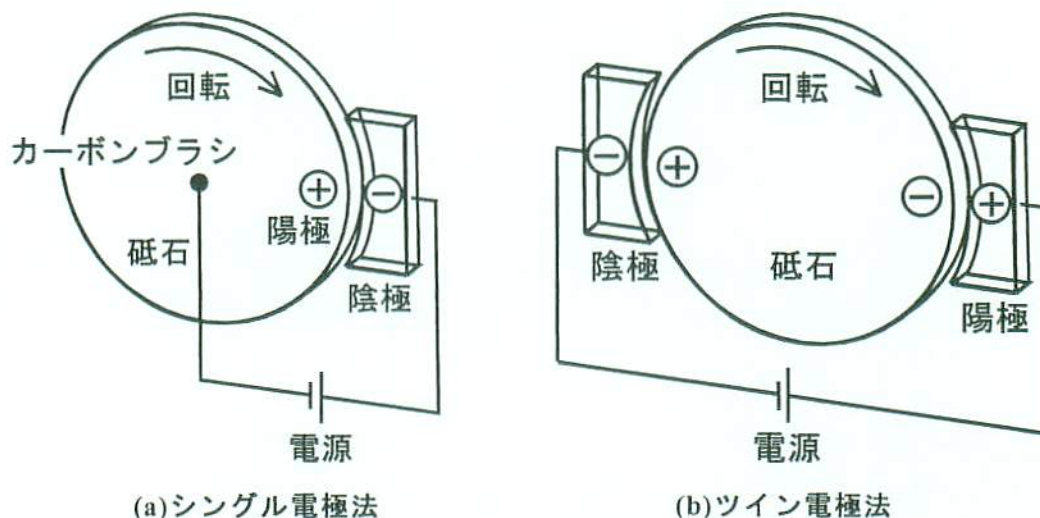


図 2.1 電解目直し法の種類と原理

図 2.2 に、今回試作したツイン電極目直し装置の外観を示す。本装置は 2 対の電極材で構成されている。陽極(+)電極は、砥石保護カバーに固定用治具を製作し取り付けている。また、陰極(-)電極は、研削盤上部に設けられている単石目直し装置を改良して取り付けた。これら両電極は、マイクロメータを用いることにより、砥石との間隔を微調節することが可能である。両電極と研削盤本体および目直し装置は、ベークライトを用いて絶縁対策を行った。試作した電極の大きさは、長さ×幅がそれぞれ 145×30mm と比較的小型で、目直し装置全体が、標準の砥石カバー内に納まるので、形状及び取り扱いと言う点では実用的で作業性がよいといえる。以上が、目直し装置の主要な構造である。次に、この試作装置の基本構成について記載する。

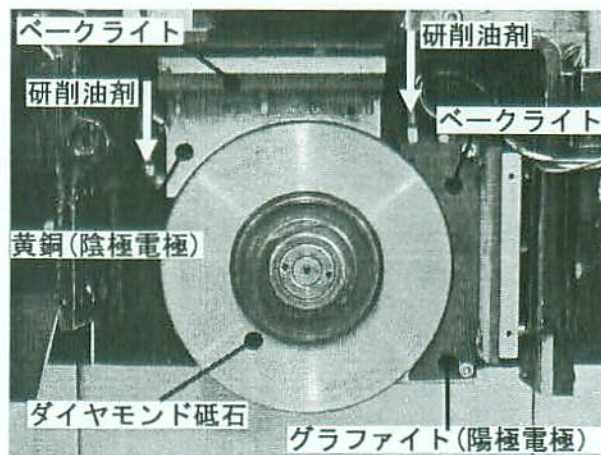


図 2.2 試作したツイン電極目直し装置



## 2.2.2 試作したツイン電極目直し装置の設計仕様

### 2.2.2-1 電極材料

電解加工に用いられる電極材料に必要なとされる特性を以下に示す。<sup>20) ,21)</sup>

- ①電導度および熱伝導度が大きいこと。
- ②電極製作を容易にするため、よい被削性および成形性を持つこと。
- ③研削油剤に対する耐食性がよいこと。

以上の特性から、電解加工の工具にあたる陰極(－)には、上記の条件を満たし、電解加工において一般的に広く使用されている黄銅(JIS H3100 C2801P 相当)(体積抵抗率  $1400\mu\Omega \cdot \text{cm}$ )を用いた。そして、ツイン電極法の場合には、電源供給の役割を果たす陽極(＋)として、金属を用いると、酸化反応が起こり電極表面に不導体となる酸化皮膜が生成するという不都合が生じるため、本装置では、放電加工用に開発された微粒で結合力が大きく、かつ電極消耗が少ないグラファイト(体積抵抗率  $6.4\mu\Omega \cdot \text{cm}$ )を用いた。<sup>22)</sup>

表 2.1 に、電極部の仕様を示す。

表 2.1 電極材の仕様

電極材質	陽極 グラファイト (放電加工用電極材) 陰極 黄銅 (JIS H3100 C2801P相当)
電極面積	弧 157 mm × 幅 9 mm
絶縁材	ベークライト

### 2.2.2-2 電極材の面積

電解目直しの性能には、砥石径や周速度との関連において電極面積が影響すると考えられている。また電極面積が小さい場合には、能率や安定性に問題が生じ、そして電極面積が大きい場合には、取り扱いが困難になるなどの問題がある。特に電解加工の工具である陰極(－)においては、電極面積が小さい場合には、砥石の形崩れを起こしやすい傾向にある。また、電解目直し法の場合には、砥石が高速で回転するため、実際の目直し時間とは違い、陰極に接近している時間が電解反応時間となる。つまり電解反応時間は、電極面積に比例するため電極面積が大きいほど目直し時間が短縮できると考えられる。

そこで今回の試作装置では、目直し時間の短縮および砥石の形崩れ防止を目的として、電極の面積はできるだけ大きくし、その長さを砥石全周の 1/4 の大きさとした。

図 2.3 に、電極材の外観を示す。

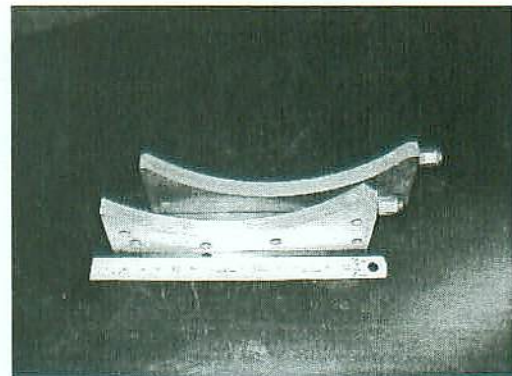


図 2.3 電極材の外観

### 2.2.2-3 研削油剤供給方法

電解加工に必要とされる油剤の機能を以下に示す。

- ①加工物と工具の間に電流を運ぶこと。
- ②加工間隙から電解生成物を除去すること。
- ③電解加工中に発生する熱を除去すること。

これらの機能は、陽極である加工物を高い電流効率において一定速度で溶解除去することに要約される。そして、電解目直し法の場合には、高速で回転する砥石に均一にこの油剤を供給することが重要になる。理想的な研削油剤の供給は、砥石と電極材の間隔に一樣に研削油剤を付着させることであるが、通常使用されているノズルで研削油剤を供給する場合には、高速回転する砥石外周面上では、砥石につれ廻る空気層があり、この空気流が砥石に供給する研削油剤が飛散することが報告されている<sup>23)</sup>。

そこで、本装置では、できるだけ研削油剤の飛散を防止するために、電極材上部に供給口を配置し、その供給口の先端をラッパ状に広げることにより、砥石作業面全体に研削油剤を供給した。また、実際に目直しを行う際には、砥石と電極をアクリル板で密閉することにより研削油剤の飛散を防いだ。

### 2.2.3 直流電源ツイン電極目直しシステムの構築

図 2.4 に、構築した直流電源ツイン電極目直しシステムの概略図を示す。図に示すように、供給される研削油剤と砥石を介して 2 極の電極材を配置したものである。本システムでは、両電極間に直流電源を接続すると、電流は、陽極電極→研削油剤→砥石→研削油剤→陰極電極のように流れることを考えるものである。本法は、砥石の回転によって砥石作業面が陽性と陰性を交互に帯びることが特徴である。研削油剤は、2 個のポン

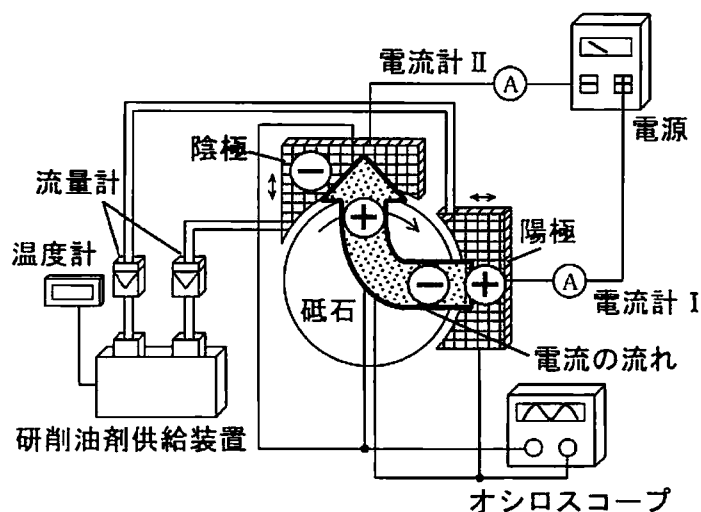


図 2.4 ツイン電極目直しシステム

プを使用し、各電極に独立して供給した。そして、その流量は、電解目直しに及ぼす研削油剤の影響を考察するため、流量計を用いて制御した。そして、電解目直し中における極間抵抗は、砥石と両電極間の電圧変化をオシロスコープで測定し、算出した。回路電流値は、回路に電流計を接続し、測定した。電解反応への影響が考えられる研削油剤温度は、液温をデジタル温度計で測定し、温度管理は温熱装置を用いることに



より制御している。使用した電源は、現在最も普及している ELID 研削用に開発された直流パルス変換が可能なものである。図 2.5 に、その外観を、表 2.4 に、その仕様を示す。

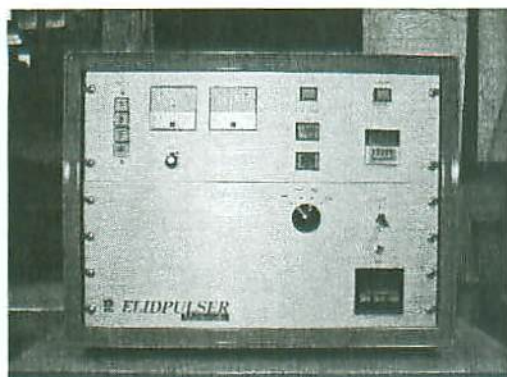


図 2.5 直流パルス電源

表 2.4 電源装置の仕様

形式	EPD-10A
出力電圧	DC60V,90V
最大出力電流	平均10A（電流調整可能）
出力パルス幅	2, 4, 8, 16 $\mu$ s(duty50%)
入力電源容量	1.2kVA
入力電圧	AC200V
周波数	60Hz又は50Hz
形状寸法	530(W)×450(L)×421(H)
重量	約45kg

## 2.3 直流電源ツイン電極目直しシステムの適用

### 2.3.1 実験方法と目直し評価方法

メタルボンドダイヤモンド砥石に試作した目直しシステムを適用し、その目直し特性を検討することを目的として、目直し実験を行った。本実験では、図 2.6 に示すような横形の精密成形平面研削盤を用いた。供試したダイヤモンド砥石は、#140 の平型メタルボンドダイヤモンド砥石(外径 200mm, 幅 9mm)である。

目直し実験の場合には、形直し後の砥石作業面性状をいかに一定にするかが問題になるが、ここでは、研削盤にダイヤモンド砥石を取り付けた後、立型ロータリドレッサを用いて十分に形直しを行い、そして砥石回転触れを 0.2 $\mu$ m 以下にした。また図 2.7 は、立型ロータリドレッサによる形直し作業の外観で、形直し条件は表 2.5 に示す通りである。



図 2.6 精密成形平面研削盤

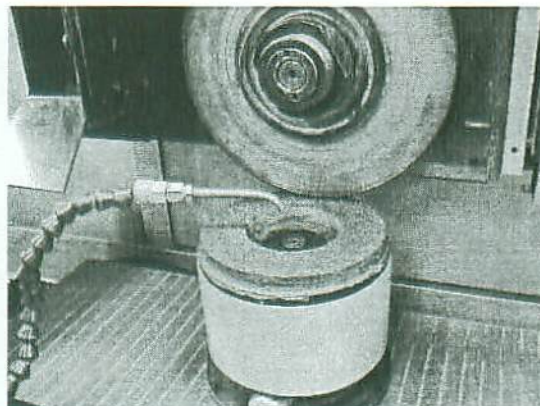


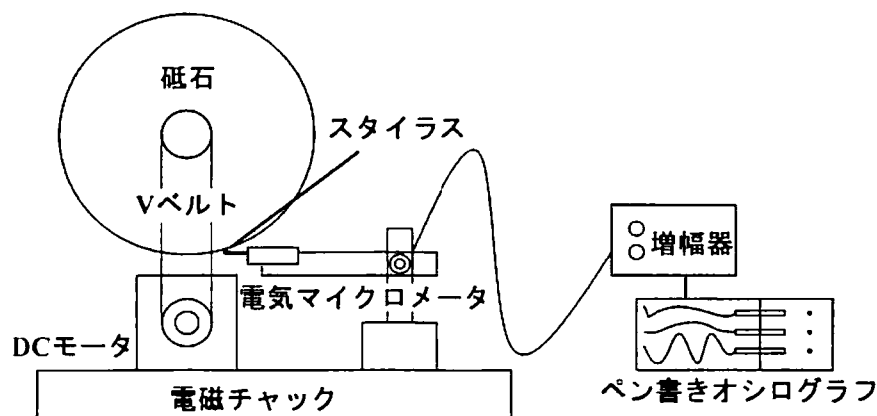
図 2.7 立型ロータリドレッサ

表 2.5 立型ロータリドレッサ形直し条件

ダイヤモンド砥石周速度	7.33m/s
形直し砥石	C80H $\phi$ 125mm
形直し砥石回転速度	1465rpm
形直し砥石周速度	4.99m/s(内周)~9.59m/s(外周)
ダイヤモンド砥石切込み量	5 $\mu$ m/pass
テーブル前後送り速度	15.3mm/s
研削油剤	Soluble type(1/50)(水道水)
研削油剤供給量	10.0 $\times$ 10 <sup>-3</sup> l/s

次に形直し作業後，砥粒の突出し高さをそろえるため，メタルボンドダイヤモンドスティック(SD60P100M)を研削することにより，マイクロ形直しを行い，そして砥粒の突出し高さを 3 $\mu$ m 以下にした．このような方法で初期的な砥石作業面性状が一定であるという条件下で電解目直し実験を行い，その特性を検討した．そして，この場合，電解目直し過程における砥石作業面の変化を，砥粒の突出し高さの測定ならびに顕微鏡を用いた表面観察により調べた．

今回は，この砥粒の突出し高さの測定を図 2.8 に示す触針法を用いて行っている<sup>24),25)</sup>．この方法は，図に示した電気マイクロメータのスタイラス先端に，半径 0.3mm の鋼球を取り付け，砥石作業面に軽く押し当てた後，砥石を DC モータと V ベルトを用いて 0.38mm/s の速さでゆっくりと駆動し，そして得られた変位を増幅器に通して，ペン書きオシログラフに記録することにより，砥粒の突出し量を含めた砥石表面のトポロジを測定するものである．



砥石周速度：0.38mm/s

スタイラス先端鋼球半径：0.3mm

図 2.8 砥粒突出し量測定システム



### 2.3.2 砥粒突き出し速度に及ぼす最適目直し条件の検討

電解加工における電解溶出量の理論値は、一般的に電気分解の法則であるファラデーの法則を用いて計算される。しかしながら、実際には加工物の溶出量は、ファラデーの法則によって計算された理論値と異なる場合が多い。これは、加工工程において、ファラデーの法則の定義を満足されていないか、副反応による電流効率の低下によるものと考えられる。

とりわけ、ツイン電極法の場合には、加工物への電源供給が非接触であるため、電流効率が 100 パーセントであるということは考えにくい。したがって、メタルボンドダイヤモンド砥石にツイン電極目直し法を適用する場合に、その目直し能率を向上するためには、電流効率を高くすることが重要な要因となる。電解溶出機構における電流効率とは、実際に回路を流れる電気量のうち、どれだけの割合が所要の目的である加工物の溶出反応に有効に使われたかを表わす尺度と定義できる。そして、電流効率は、一般に、次式によって求めることが可能である。

$$\text{電流効率} = \frac{\text{陽極金属(加工物)の溶出に使われる電気量}}{\text{回路に流れる電気量}} \times 100\%$$

試作したツイン電極目直し装置の最適電解目直し条件を検討する場合には、メタルボンドダイヤモンド砥石の基本的な電解溶出傾向を考察する必要がある。また、陽極電極としてグラファイトを用いる場合には、電解反応時に起きる遊離現象による消耗を抑制することが重要である。例えば、放電加工の場合には、電源条件におけるパルス幅が比較的長い領域では、加工物の除去量に対して電極の消耗が非常に小さいことが報告されている<sup>26)</sup>。このように放電加工では、エネルギー配分の比率を電解条件によって制御できることが知られている。

仮に、電解加工の場合に、電解条件の設定によって加工物の除去量と電極材の消耗量とのエネルギー配分の比率を制御できると考えるならば、ボンド剤の減少量を大きくし、またグラファイトの消耗量を小さくするという最適な電解条件が存在する可能性があるとの予測が成り立つ。さらに、加工物の溶出量および電極消耗に大きな影響を与える要因として、電解条件によるエネルギー配分比率のほかに、化学的条件としての研削油剤の影響が考えられる。

このような考えに基づき、本稿では、メタルボンドダイヤモンド砥石に試作した直流電源ツイン電極目直し装置を適用することを目的として、この目直し装置を用いた場合における電氣的、機械的諸条件の影響を実験的に吟味し、そして目直し性能を検討した。表 2.6 に、本実験で検討した電解目直し条件を示す。なお、今回の電解目直し実験で使用した研削油剤は、電解目直し用に開発された比較的電気伝導性の高いソリュブルタイプのものである。<sup>27)</sup> 表 2.7 に組成・成分を示す。

表 2.6 電解目直し条件

ダイヤモンド砥石周速度	5m/s, 10m/s, 20m/s, 30m/s
極間間隔	0.5mm
電源	DC60V
パルス幅	0 $\mu$ s, 2 $\mu$ s, 8 $\mu$ s, 16 $\mu$ s
電解液流量	0.5 l/min(電極につき)
研削油剤	ELID用研削油剤
研削油剤希釈倍率	30,50,100,200倍希釈(水道水)
研削油剤温度	18℃～
ドレッシング時間	60min

表 2.7 研削油剤の組成・成分

項目/試料	
無機塩A	5～10%
無機塩B	1～5%
アミン	10～20%
非鉄金属防食剤	微量(1%以下)
防腐剤	微量
純水	60～70
一般性状	
密度 g/cm <sup>3</sup> 15℃	1.1
pH 30倍希釈(純水)	9.9

### 2.3.2-1 印加電圧と回路電流の関係

まず初めに、構築した目直しシステムにおける印可電圧と回路電流の関係を調べた。図 2.9 に、直流電源  $E=60V$  を負荷した場合の、砥石周速度 10m/s における回路電気抵抗  $R$  の変化が、回路電流値  $I$  に及ぼす影響を示す。図より、回路電流は、抵抗値の増加に伴って減少し、ほぼ  $I=E/R$  が成立し、構築したシステムは基本的な電気回路を構成していると言える。

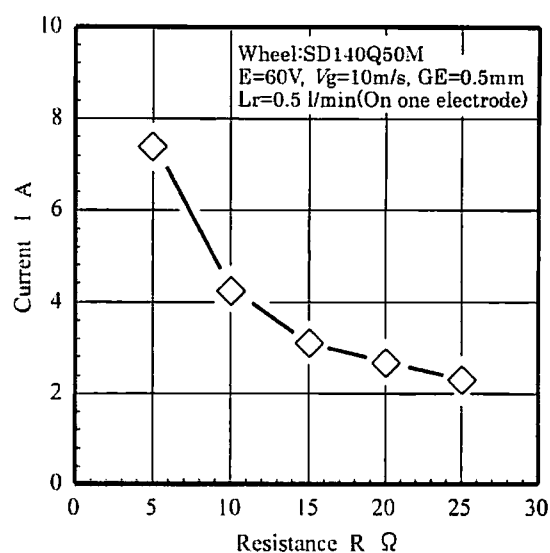


図 2.9 印可電圧と回路電流の関係

### 2.3.2-2 砥石作業面の電解反応と極間電気抵抗の関係

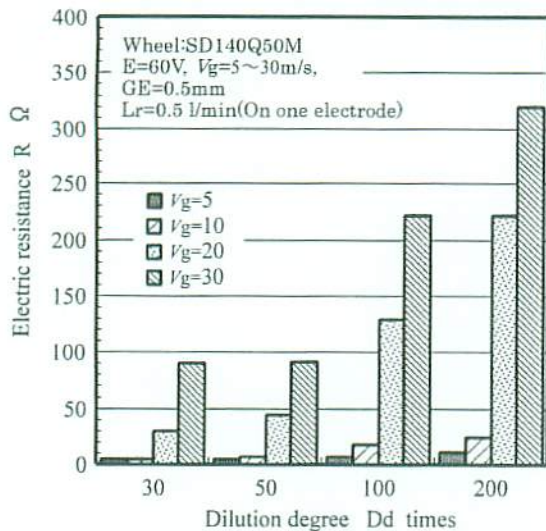


図 2.10 砥石周速度と極間抵抗の関係

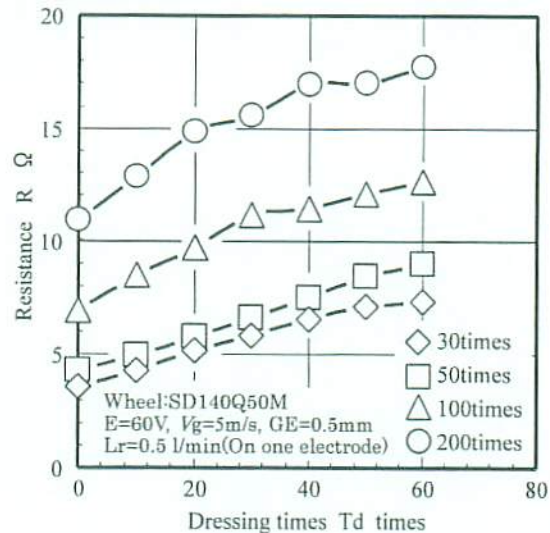


図 2.11 研削油剤希釈倍率と極間抵抗の関係

次に、電解反応の進行に伴う回路全体の極間電気抵抗の変化を調べた。

図 2.10 に、各研削油剤希釈倍率において、砥石周速度を 5m/s～30m/s まで変化させた場合の極間電気抵抗の変化を示す。図より、砥石周速度が 20m/s 以上になると極間電気抵抗が極めて高くなることがわかる。これは、20m/s 以上の砥石周速度になると、砥石に連れ廻る空気量が増大し、電極材と砥石との極間抵抗が急激に増大することによるものと考えられる。

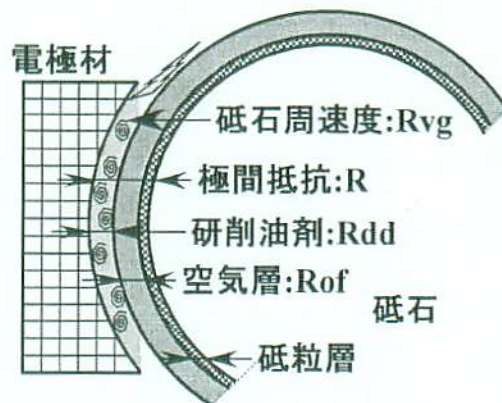


図 2.12 極間電気抵抗の模式図

図 2.11 に、砥石周速度 5m/s の条件において、研削油剤希釈倍率を 30 倍から 200 倍まで変化させた場合の目直し時間と極間電気抵抗の関係を示す。図より、まず、目直し前( $T_d=0$ )の極間電気抵抗は、研削油剤希釈倍率が高くなると、大きくなるのがわかる。このことより、研削油剤希釈倍率は、研削油剤の電気伝導度に関係していることが考えられる。さらに、各研削油剤希釈倍率において、目直し時間の経過に伴い極間電気抵抗が増加していくのが確認できる。このことより、電解反応により砥石作業面上に電解生成物が形成され、極間電気抵抗が増加していくことが考えられる。

以上のことより、極間電気抵抗  $R$  は、図 2.12 にモデルを示すように、砥石周速度に關係する項  $R_{vg}$ 、研削油剤希釈倍率に關係する項  $R_{dd}$ 、および電解生成物に關係する項  $R_{of}$  の三因子に影響され、次式のような關係があることが推察される。

$$R \propto R_{vg} + R_{dd} + R_{of} \text{-----(1)}$$

### 2.3.2-3 砥石周速度が回路電流に及ぼす影響

図 2.13(a)に、研削油剤希釈倍率が 30 倍から 200 倍までにおける各砥石周速度の目直し時間と電流の関係を示す。なお、電流値は、最大値で求めている。図で、まず、砥石周速度 5m/s の場合をみると、希釈倍率が小さい方が、目直し前の電流値は大きい。いずれの希釈倍率の場合でも、目直し時間の経過に伴い、電流値が減少する傾向にあることが見出される。これは、いずれの希釈倍率の場合でも、目直しにより、電解生成物が生成し、極間電気抵抗が大きくなっていくためと考えられる。これと同じ結果は、砥石周速度 10m/s の場合の希釈倍率が 50 倍以下の場合にも見られる。しかし、砥石周速度 10m/s で、希釈倍率 100 倍および 200 倍の場合や砥石周速度の 20m/s 以上の各希釈倍率では、目直し時間が増えても電流はほとんど変化しない。この結果は、目直しによる電解生成物が、極間電気抵抗に影響していないことを意味するものと考えられる。すなわち、電解生成物は形成されるが、形成速度が遅く、電流によって、形成された薄い生成膜も除去されて行くため、結果的に、電解生成物が極間電気抵抗に影響せず、目直し時間が経過しても、電流が変化しないような機構が推測される。このような結果が生じ始める臨界電流値は、図 2.13(a)から考えると、4A 付近と考えられる。なお、砥石周速度 20m/s 以上では、各研削油剤希釈倍率の場合とも電流が非常に小さくなるが、これは、上述のように、砥石に連れ廻る空気量の増大により、電極材と砥石との極間電気抵抗  $R_{vg}$  が極めて大きくなるためと考えられる。

### 2.3.2-4 砥石周速度と砥粒突出し速度の関係

図 2.13(b)に、図 2.13(a)と同時に調べた、研削油剤希釈倍率が 30 倍から 200 倍までにおける砥石周速度と砥粒突出し速度の関係を示す。図より、まず、砥石周速度が 5m/s の場合をみると、希釈倍率が 30 倍や 50 倍の場合には、目直し時間にほぼ比例して砥粒突出し高さが増加する。しかし、希釈倍率が 100 倍や 200 倍のように、希釈倍率が高くなると、目直し時間が初期の間には、砥粒突出し高さは増加するが、ある時間を越えると、増加しなくなり、ほぼ一定の突出し量に留まるようになる傾向を示す。このような、希釈倍率による突出し速度の変化は、図 2.13(a)よりわかるように、砥石周速度が 5m/s の場合は、目直し時間の経過により、いずれの希釈倍率の場合でも、電解生成物の厚さが増加し、電流が減少していくことを考えると、基本的には、目直し時間の経過により、突出し高さの増加速度が減少することが考えられ、希釈倍率が 100 倍や 200 倍のように、希釈倍率が高い場合の結果は、その考えと一致する傾向にある。これに対して、希釈倍率が 30 倍や 50 倍の場合のように低い場合には、上述のように、電解生成物厚さが増加しても突出し高さが増加していくことから、電解生成膜の増加があっても、電流がある程度以上大きければ、強度な電解反応により、ボンド材の溶出が進むものと推測される。このようなことを考えて、砥石周速度が 10m/s の場合を

みると、ほぼ一定の突出し量になる傾向は、目直し時間の経過により電流が減少していく、希釈倍率が30倍と50倍でみられる。しかし、目直し時間の経過により電流が変化しない希釈倍率が100倍以上では、初期の突出し速度は小さいものの、目直し時間の経過により突出し量が増加していくのがわかる。その結果として、砥石周速度10m/sで希釈倍率100倍の場合に、砥石周速度5m/sの希釈倍率30倍よりも、砥粒突出し量が大きくなり、目直し時間60分後においては、砥粒突出し高さが、約35 $\mu\text{m}$ という高い値となるような特徴的な結果が生じている。以上の結果より、砥石周速度10m/sで、研削油剤希釈倍率100倍や200倍の場合のような、目直し時間に伴って、突出し速度が変化しない傾向は、目直し時間の経過により電流値が変化しない砥石周速度20m/s以上の場合にも見られ、砥粒突出し速度に対する電解生成膜の影響についての考え方は、妥当であると思われる。

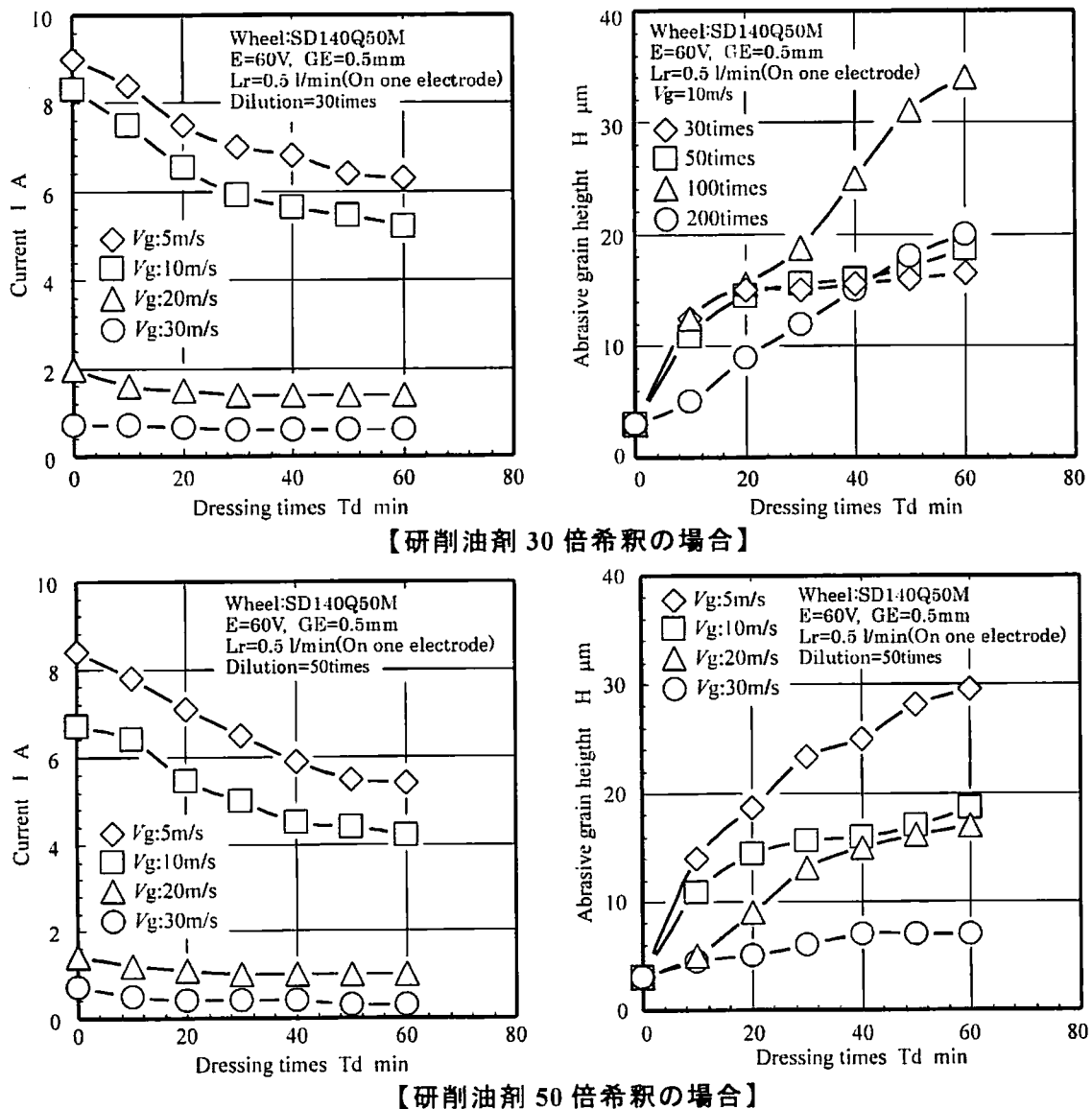
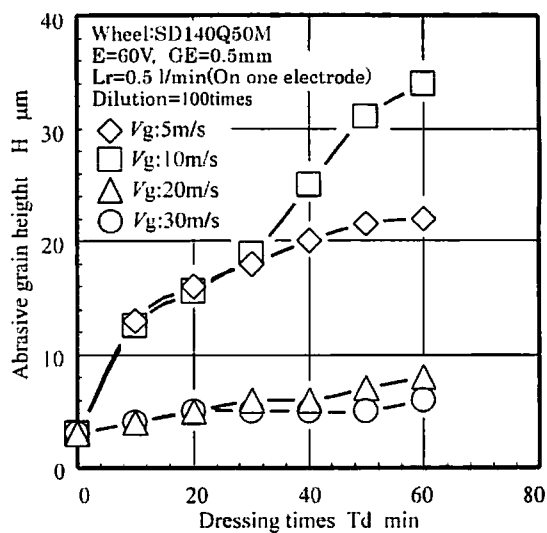
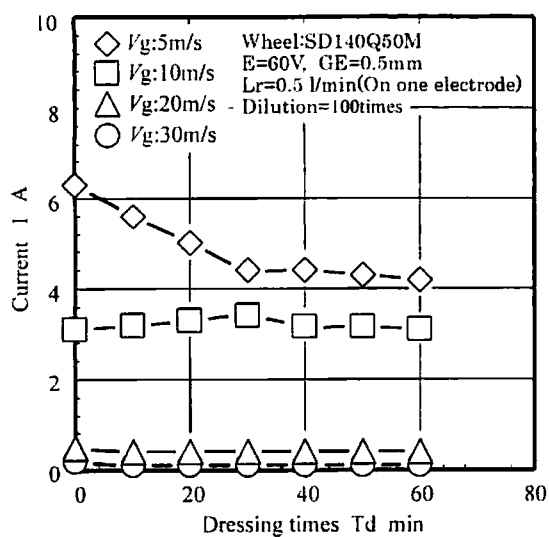
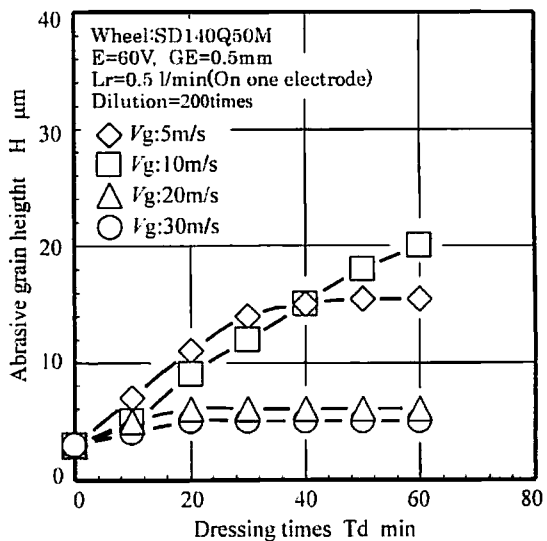
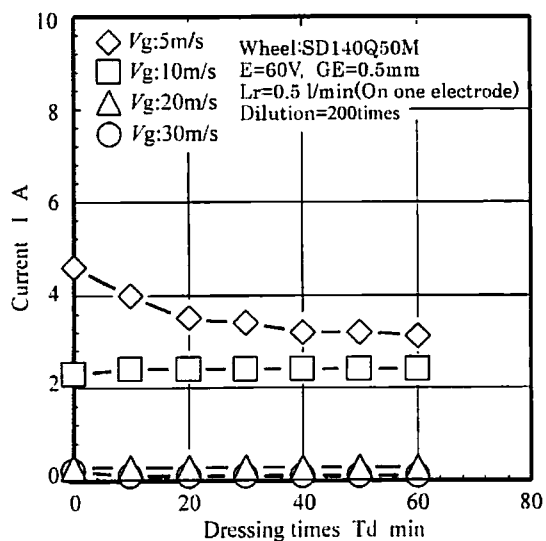


図 2.13 各砥石周速度の目直し時間と電流および砥粒突出し速度の関係



【研削油剤 100 倍希釈の場合】



【研削油剤 200 倍希釈の場合】

図 2.13 各砥石周速度の目直し時間と電流および砥粒突出し速度の関係



図 2.14 に、突出し高さを約  $35\mu\text{m}$  が得られた場合の砥石作業面の写真およびプロフィール示す。一般的に、マトリックスタイプの超砥粒砥石の場合には、目直しにより、平均砥粒径の  $1/3$  程度の砥粒の突出しを確保することが適当であると言われている。今回使用したダイヤモンド砥石の粒度は #140 であり、平均砥粒径が約  $90\mu\text{m}$  であるので、 $35\mu\text{m}$  という砥粒の突出し高さから判断して、試作した目直し装置は、有効であるといえる。

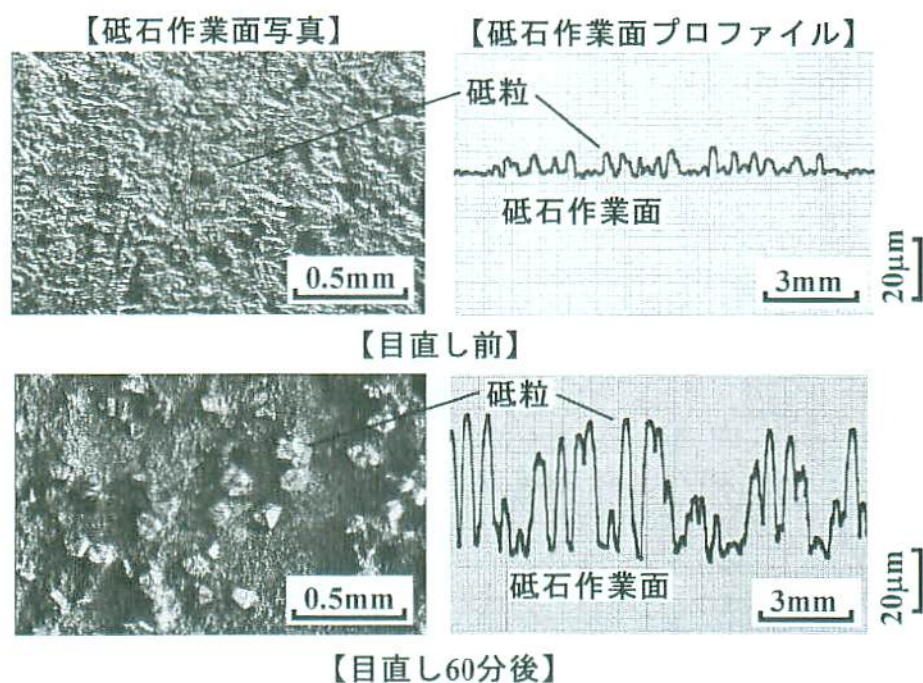


図 2.14 ツイン電極法を施した砥石作業面写真とプロフィール

[SD140Q50M  $V_g=10\text{m/s}$ ,  $G_e=0.5\text{mm}$ ,  $E=60\text{V}$ ,  $D_d=100\text{times}$ ,  $L_r=0.5\text{ l/min}$   $T_d=60\text{min}$ ]

### 2.3.2-5 研削油剤希釈倍率が目直し特性に及ぼす影響

図 2.15 に、砥石周速度 10m/s の場合の電流と砥粒突出し速度の関係を、図 2.13 を書き換えて示す。図より、研削油剤希釈倍率 30 倍や 50 倍の方が、100 倍や 200 倍の場合よりも、電流値が大きいにも拘わらず、目直し時間 60 分後の砥粒の突出し量は、小さくなってしまふことがわかる。これは、上述のように、電解生成物が突出し速度に影響するためと考えられ、研削油剤の成分および性状が電解反応に与える影響<sup>10)</sup>が重要であることが確認できる。

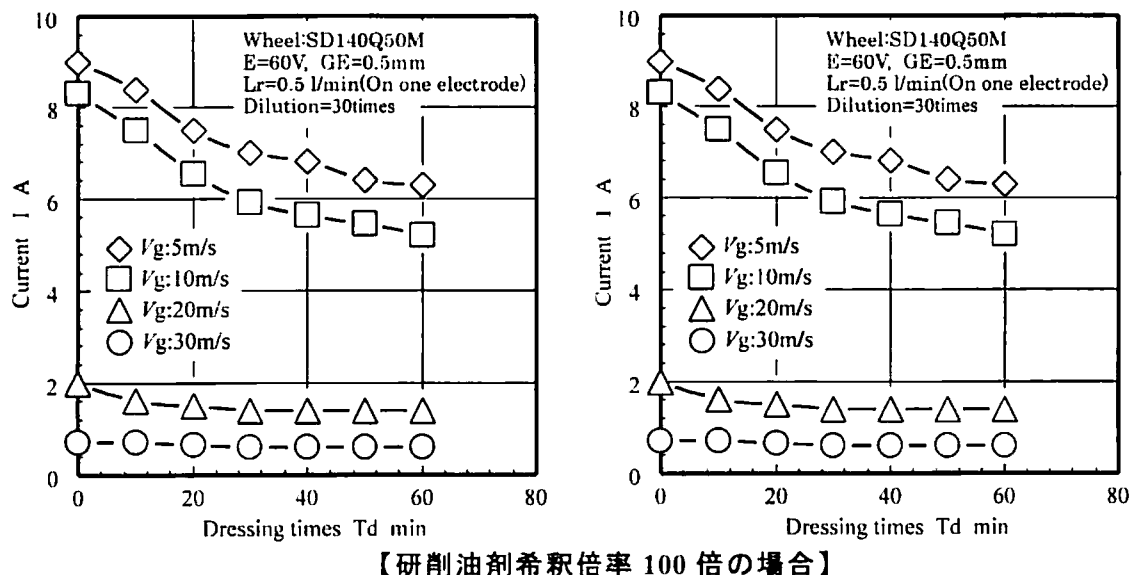


図 2.15 各砥石周速度の目直し時間と電流および砥粒突出し速度の関係

図 2.16 に、砥石周速度 10m/s の場合の研削油剤希釈倍率が砥石作業面形状に及ぼす影響を示す。図より、研削油剤希釈倍率 30 倍では、砥石作業面にダレが見られるのに対して、突出し量が、30 倍より大きな研削油剤希釈倍率 100 倍では、比較的均一に電解されていることが見出され、大きな電流での目直しでは、ダレが大きくなることが考えられる。



図 2.16 研削油剤希釈倍率が砥石作業面形状に及ぼす影響



図 2.17 に、砥石周速度 10m/s の場合の研削油剤希釈倍率 100 倍の場合における電解目直し前後のグラファイトの外観を示す。図より電解目直し後のグラファイト表面には、複数の凹凸が発生していることがわかる。この現象は、研削油剤希釈倍率が低い(濃度が高い)条件において顕著に認められ、大きな電流での目直しでは、この点でも問題であることが考えられる。

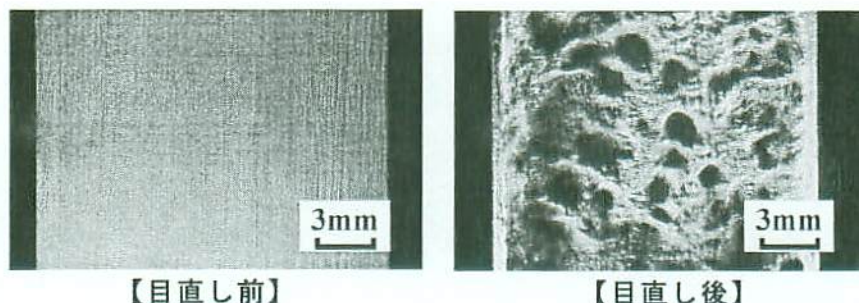


図 2.17 目直し前後におけるグラファイトの外観の比較

図 2.18 に、各研削油剤希釈倍率における目直し前後のグラファイト(陽極)電極の消耗量を示す。図より、研削油剤の濃度が高い場合に電極消耗量が大きくなることがわかる。現象についての詳細は明確ではないが、この点でも、小さな電流での目直しのほうが良いことが考えられる。このようなことから、本実験の範囲では、電解生成膜の影響が少なく、小さな電流値で目直し時間に拘わらず、一定の突出し速度が得られ、大きな突出し量が可能な、砥石周速度 10m/s で希釈倍率 100 倍程度が、最良の目直し条件と考えられる。

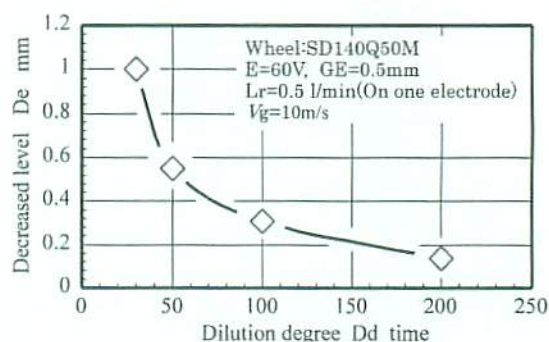


図 2.18 各研削油剤希釈倍率における目直し前後のグラファイト(陽極)電極の消耗量の関係

### 2.3.2-6 砥石作業面の形成形態の評価

図 2.19 に、カーボンブラシを用いたシングル電極法とツイン電極法で目直した場合の、砥石作業面の写真および触針法により得られたプロファイルをそれぞれ示す。目直し条件は、上述の結果から、最良と考えられる砥石周速度 10m/s で希釈倍率 100 倍の研削油剤で行った。なお、プロファイルを測定する際には、電解反応により発生した電解生成物をブラシで除去し、砥石作業面の洗浄を行っている。図における砥石作業面の写真より、シングル電極法の場合には、電解目直し後の砥石作業面に緑青と思われる電解生成物が発生していることが確認できる。これはボンド材の主成分である銅が、電解反応により酸化し発生したものであると考えられる。またプロファイル

より、シングル電極法は、ツイン電極法に比べ、ボンドベース面すなわち砥石作業面の表面に深い溝が発生していることがわかる。この原因は、シングル電極法の場合には、カーボンブラシにより直接砥石に通電しているため、加工物である砥石が常に陽極(+)となることから、この陽極酸化により生じたものであると考えられる。すなわち、メタルボンド砥石の結合剤は、銅と錫の合金であるため、金属のイオン化傾向の違いによる局所的な電解集中が発生し、その結果、砥石作業面上で部分侵食が進んだものと考察される。一方、ツイン電極法の場合には、電解目直し後において、電解生成物の発生が非常に少なく、またボンドベース面に発生する溝の深さが小さいことが確認できる。これは、ツイン電極法の場合には、非接触で砥石に通電しているため、砥石作業面上では陽性と陰性が交互に生じることになり、その結果、砥石作業面上では、酸化溶解と還元とが交互に起き、局所的な電解集中が小さくなるものと考えられる。しかしながら、このメカニズムを解析するには、電解生成物およびボンドベース部の組成分析や構造解析に基づく、より詳細な吟味が必要であるので、この考察については今後の課題としたい。

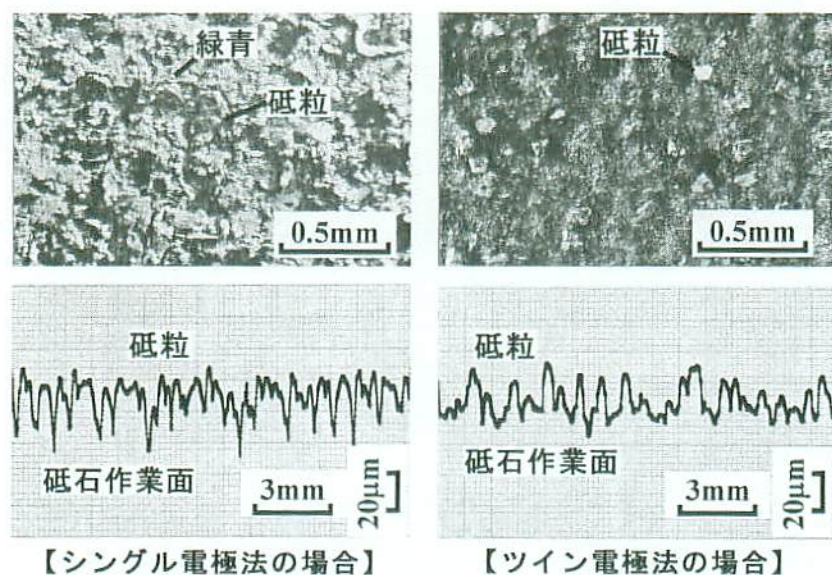


図 2.19 シングル電極法とツイン電極法により目直しを施した砥石作業面およびプロファイルの比較



## 2.4 電解目直し法を適用したメタルボンド砥石の研削特性

### 2.4.1 実験方法

電解目直し法は、砥石のボンド材を電解反応により溶解し、砥石作業面に砥粒を突出させるため、ボンド材に与えるダメージなど、目直し性能が研削特性に及ぼす影響など不明な点がある。そこで、上記の図 2.16 で電解目直しを施したダイヤモンド砥石により、湿式平面プランジ研削実験を行い、砥石の研削性能を検討した。

本実験では、まず、シングル電極法とツイン電極法の性能比較を行った。両目直し法の性能を比較する場合、本質的には、ともに最適電解条件下での比較が妥当であるが、今回は便宜上、電解時間を除く、他のすべての電解条件を同じ設定とした。なお、砥石の研削性能を比較するためには、通常、砥粒の突出し高さをできるだけ同一にする必要があるため、電解時間に関しては、シングル電極法の場合には 10 分、またツイン電極法の場合には 20 分と設定した。これは予備実験において、目直し後の砥石作業面の砥粒突出し高さを約 20~25 $\mu\text{m}$  得るために必要な時間であることを確認している。なお、シングル電極法の場合には、カーボンブラシを用いて砥石に給電を行い、絶縁対策を十分に考慮して行っている。

次に、機械的目直し法との性能比較を検討するために、立型ロータリドレッサを用いた目直し法との性能比較を行った。

表 2.9 に、立型ロータリドレッサ法の見直し条件を示す。立型ロータリドレッサの見直し作業の方法は、前述の形直し作業の場合と同じである。今回の目直し条件では、砥粒およびボンド剤に与えるダメージを比較的小さくするために、通常、レジンボンド砥石に適用されるものを採用した。

図 2.20 に、実験装置の写真を、表 2.8 に、研削条件を示す。

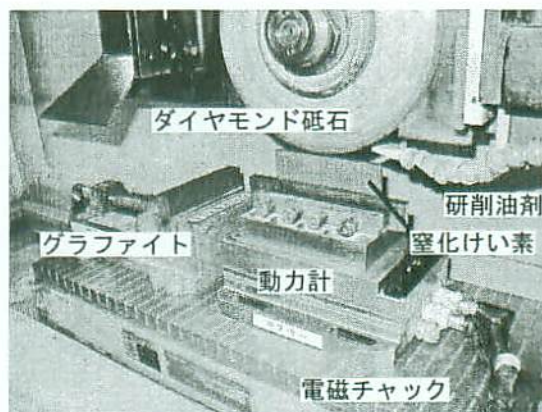


図 2.20 実験装置の外観

表 2.8 ロータリドレッサ目直し条件

ダイヤモンド砥石周速度	7.33m/s
目直し砥石	WA220G $\phi$ 125mm
目直し砥石回転速度	1465rpm
目直し砥石周速度	4.99m/s(内周)~9.59m/s(外周)
ダイヤモンド砥石切込み量	5 $\mu\text{m}$ /pass
テーブル前後送り速度	15.3mm/s
研削油剤	Soluble type(1/50)(水道水)
研削油剤供給量	14.3 $\times 10^{-3}$ l/s

表 2.9 研削実験条件

研削実験	平面プランジ研削
砥石周速度	30m/s
工作物速度	0.2m/s
砥石切込み量	5 $\mu$ m/pass
研削油剤	Soluble type 50倍希釈(水道水)
研削液供給量	4.8 l/min

研削実験に際しては、図に示すように、研削動力計を研削盤のテーブル面に設置し、その上に工作物を固定した。そして、この工作物をプランジ研削し、研削動力計から検出される法線抵抗および接線抵抗出力を増幅器に通してペン書きオシロに記録した。さらにこれと同時に主軸モータの消費電力の変化を微小電力計により測定し、増幅器を通してペン書きオシログラフに記録した。このように、研削加工量の増加にともなう研削抵抗の変化をモニタリングすることにより、ダイヤモンド砥石の研削性能を考察した。また、研削加工にともなう砥石摩耗量を算出するために、研削動力計の横にグラフィイトを固定し、一定切込みごとに砥石の作業面をグラフィイトに転写した。そして、そのグラフィイトの研削面を表面粗さ計で測定し、そのトポロジの変化を調べた。すなわち、砥石の摩耗量の間接的な測定を行った<sup>28)</sup>。また、研削加工中、一定切込みごとに研削方向に垂直な方向に対して表面粗さを測定した。研削条件の設定にあたっては、通常の精密研削を念頭に起き、ダイヤモンド砥石の切込み量を5 $\mu$ mとしている。

今回の実験では、工作物として、セラミックの中でも比較的耐摩耗性がある常圧焼結の窒化けい素(京セラ製 SN220)を用いた。表 2.10 に、工作物の機械的特性を示す。なお工作物の寸法は、研削方向の長さが98mm、研削方向に垂直方向の幅が5mmである。

表 2.10 工作物の機械的特性  
(KYOCERA 材料特性表より抜粋)

SN220	窒化けい素セラミック
ビッカース硬さ	12.7GPa
3点曲げ強度	590MPa
圧縮強度	3820MPa
ヤング率	290GPa
ポアソン比	0.28

#### 2.4.2 ツイン電極法とシングル電極法の目直し性能の比較

図 2.21 に、研削量と法線抵抗  $F_n$  の関係を示す。図より、研削量の増加に伴い法線抵抗値が増加し、ある研削量まで、ほぼ一定となることがわかる。これは研削量に伴い砥粒切れ刃が摩耗し、砥石の切れ味が低下して研削抵抗が増大するものと考えられる。そして、シングル電極法の場合には、研削量が約  $1500\text{mm}^3/\text{mm}$  のところで研削抵抗のピーク値に達し、その後減少する傾向にあることが認められる。この研削抵抗の低下は、砥粒の脱落によるものと思われる。

図 2.22 に、研削量と工作物の仕上面粗さの関係を示す。図よりツイン電極法とシングル電極法を比較すると、仕上面粗さの値はほとんど同じであるが、ツイン電極法の場合の方が、総研削量の変化に伴う粗さの変動が小さいことがわかる。以上の結果より、シングル電極法の場合に砥粒の脱落が早く生じ、さらに総研削量の変化に伴う粗さの変動が大きくなるのは、図 2.19 に示した砥石作業面の部分腐食に起因する砥石作業面性状の差異によるものと推測される。さらに、この研削条件下において、切込み深さ  $100\mu\text{m}$  まで研削した時の研削比を求め、比較した結果を、図 2.23 に示す。図より、ツイン電極法は、シングル電極法と比較して約 1.3 倍の研削比を得られることがわかる。以上の結果から、メタルボンドダイヤモンド砥石にツイン電極法を適用することは十分に有効であると考えられる。

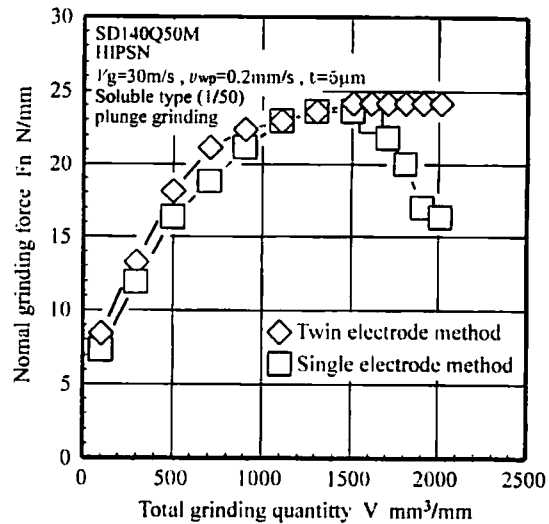


図 2.21 研削量と法線抵抗  $F_n$  の関係

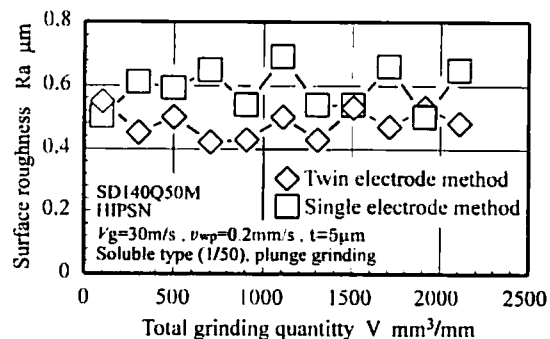


図 2.22 研削量と仕上面粗さの関係

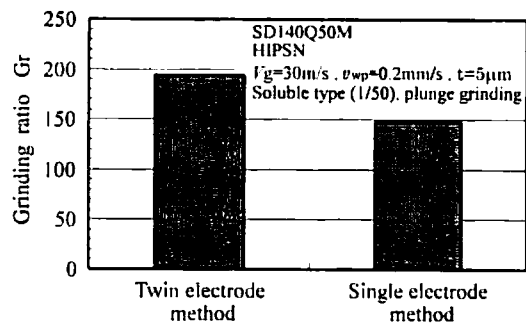
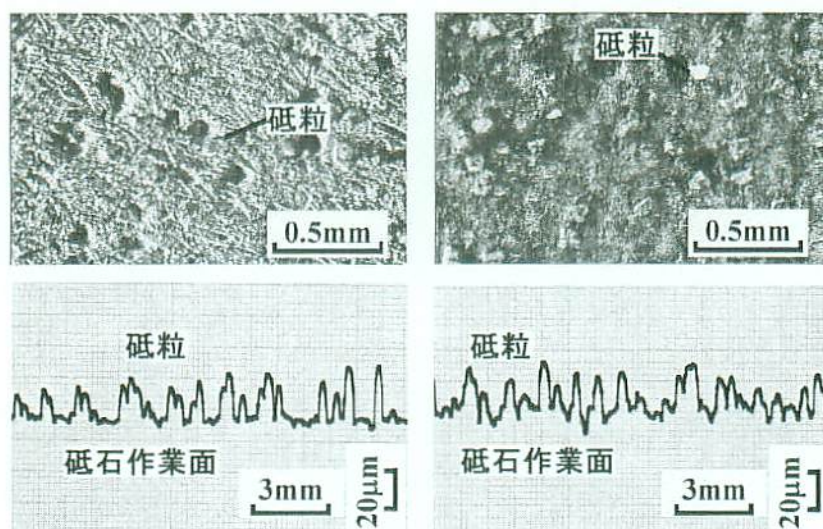


図 2.23 シングル電極法とツイン電極法で目直しをした砥石の研削比の比較



### 2.4.3 ツイン電極目直し法と立型ロータリドレッサ目直し法の性能比較



【立型ロータリドレッサの場合】      【ツイン電極法の場合】

図 2.24 立型ロータリドレッサとツイン電極法により目直しを施した  
砥石作業面およびプロファイルの比較

図 2.24 に目直し後の砥石作業面の写真および触針法により得られたプロファイルを示す。図において、砥石作業面のプロファイルは、上側に凸が砥粒である。なおプロファイルを測定する際には、それぞれ目直し後において、砥石作業面をブラシにより洗浄をしている。図の作業面写真およびプロファイルより、立型ロータリドレッサ法の場合には、比較的平坦なボンドベース面から砥粒が突き出していることが確認できる。そしてツイン電極目直し法の場合では、立型ロータリドレッサ法と比較すると、目直し後の砥石作業面性状は明らかに異なり、電解作用によってボンドベース表面が荒れている様子がわかる。特に触針法による砥石作業面のプロファイルを見ると、立型ロータリドレッサを用いる場合には、ボンドベース面が一定であるのに対し、ツイン電極目直し法の場合では、砥石作業面に小さな溝が生じていることが確認できる。これは前述のように、電解目直しの場合には、イオン化傾向の高い金属から溶解されるため、局所的な電解集中が生じるためであると考えられる。

次に、このような砥石に対するそれぞれの目直し特性が研削性能に及ぼす影響を考察するため研削実験を行った。研削条件は表 2.9 に示した通りである。

図 2.25 に、研削量と法線抵抗  $F_n$  の関係を示す。図より、全体的に研削量の増加にともない法線抵抗  $F_n$  が大きくなることがわかる。しかしながら、シングル電極目直し法の場合に見られた様な、研削量の増加にともなう、研削抵抗  $F_n$  の急激な低下は見られない。このことから、ツイン電極目直し法は、立型ロータリドレッサ法と同等の研削性能を有すると言える。

さらに、研削の進行にともなう窒化けい素セラミック研削面の表面粗さの変化および砥石半径の摩耗量を調べた。

図 2.26 に、設定研削量と工作物表面粗さの関係を示す。図よりツイン電極目直し法および立型ロータリドレッサ法とも比較的安定した表面粗さを維持し、同じような傾向を示していることが認められる。しかしながら、立型ロータリドレッサ法の場合には、研削量が約  $1700\text{mm}^3/\text{mm}$  を過ぎるころから表面粗さが上昇傾向にあることが確認できる。

図 2.27 に、設定研削量と研削比の関係を示す。図より、ツイン電極目直し法は、立型ロータリドレッサ法と比較し、約 1.4 倍の研削比を得られることがわかる。この結果より、強制的にボンド剤を除去する機械的な目直し法と電解作用によりボンド剤を溶出し除去する電気的な目直し法とを比較すると、電解作用を用いた目直し法の方がボンド剤に与えるダメージが小さいと推測できる。以上の結果から、メタルボンドダイヤモンド砥石にツイン電極法を適用することは十分に有効であると考えられる。ここで、図 2.26 で示した窒化けい素セラミック研削面の表面粗さが研削量  $1700\text{mm}^3/\text{mm}$  を過ぎるころから上昇する傾向にあることを、研削比の結果を踏まえて考察すると、立型ロータリドレッサ法の場合は、研削量の増加に伴い、砥石の磨耗量が大きいため、研削量  $1700\text{mm}^3/\text{mm}$  から砥粒脱落の発生初期段階に達すると考えられる。したがって、電解目直し法を用いた場合の電解作用は、ダイヤモンド砥粒切れ刃には直接作用しないため、砥粒に対するダメージが少なく、砥粒の脱落も非常に少ないと推察することができる。

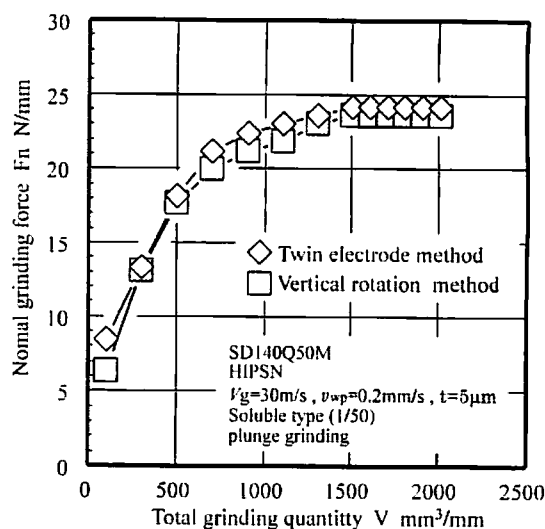


図 2.25 研削量と法線抵抗  $F_n$  の関係

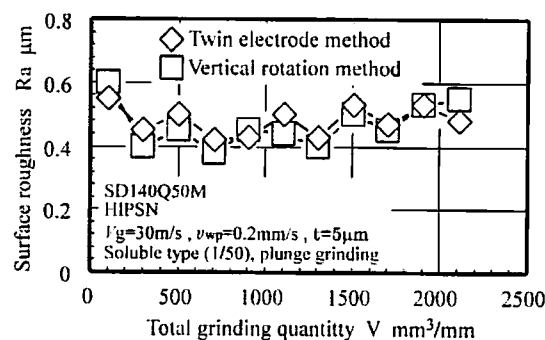


図 2.26 研削量と仕上面粗さの関係

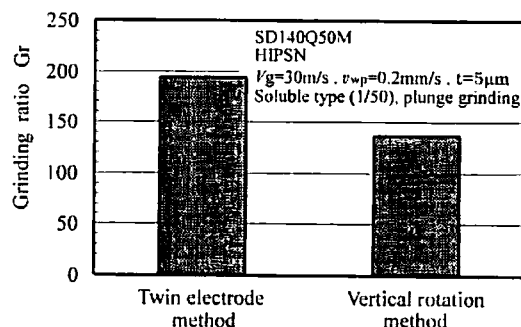


図 2.27 シングル電極法と立型ロータリドレッサ法で目直しをした砥石の研削比の比較

## 第2章の総括

本章では、現在、研削加工の高能率化・高精度化等、その多様な要求に基づき、メタルボンドダイヤモンド砥石は、高強度、高研削比という大きな特徴を有しており、高能率研削および高形状精度研削に適していることを示した。そして、このメタルボンド砥石に対応した新たな高能率インプロセス電解目直し法の開発を目的として、陰極電極非消耗型の直流電源を用いたツイン電極目直し法を考案し、装置試作を行い、その有効性を実験的に検討した。以下に、得られた結果を示す。

- 1) ツイン電極間の電気抵抗は、砥石周速度  $V_g$ 、研削液希釈倍率  $D_d$ 、生成酸化膜厚さ等に関係して決まる。
- 2) ある臨界電流値以下では、目直し時間が増加しても、生成酸化膜厚さが増加せず、電流値は、目直し時間によって、ほとんど変化しない。
- 3) 砥粒の突出しを効率的に行うための、最適目直し電流が存在し、そのための砥石周速度  $V_g$  と研削液希釈倍率  $D_d$  が存在する。
- 4) 考案したツイン電極目直し法は、粒度#140 砥石の平均砥粒径の約 1/3 である約 35 $\mu$ m 以上の砥粒突き出し高さの形成が可能であり、メタルボンドダイヤモンド砥石の目直しに法として十分に適用できる。
- 5) ツイン電極法で目直しを行った砥石は、従来の電解目直し法であるカーボンブラシを用いたシングル電極目直し法、および既存の目直し法である立型ロータリドレッサの場合と比較し、目こぼれを評価基準とした場合の目立て間寿命が長く、仕上面粗さも安定し、研削比が高いことなど優れた効果を発揮することを明らかにした。

以上の結果から、本章において新しく提案し、試作した直流電源ツイン電極目直し装置の有効性を確認することができ、この装置が十分に実用化可能であることは明らかである。しかしながら、開発したツイン電極目直し法の最終的な目標は、インプロセス目直しを適用した自動化、無人化による研削加工技術であり、今回の実験では、インプロセスでの適用については、検討を成し得ていない。インプロセスで本装置を適用する場合には、各種工作物に基づき、各種電解条件が研削性能に及ぼす影響を定量的に把握すること、電解条件を制御し、砥粒の目替わり速度を最適な値に設定するための適応制御装置の開発が必要となる。また、研削条件と電解条件の相関関係を考えた場合、砥石の周速度が低いほど、電解強度が高まり、砥石の切れ味は向上することになるが、除去能率は必然的に低下する。そのためツイン電極インプロセス目直しに最適な砥石周速度が存在することが予測される。すなわち、電解量と砥石摩耗量がバランスする研削条件に応じた最適な砥石周速度が存在することも推察される。今後、このような課題に向けての詳細な検討を継続する必要がある。



## 第2章の参考文献

- 1) 海野邦昭:ファインセラミックスの高能率機械加工, 日刊工業新聞社, (1986)100.
- 2) 東江真一, 海野邦昭, 篠崎襄:ダイヤモンド砥石の目直しに関する研究ー縦型ロータリドレッサの試作ー, 精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (1989)699.
- 3) 庄司克雄, 周立波:ダイヤモンド砥石のツルーイング及び目直しに関する研究(第2報)ーメタルダイヤモンド砥石におけるツルーイングおよび目直しのメカニズムー, 精密工学会誌, 55, 12, (1989)2267.
- 4) 田牧純一, 近藤和久:ハイブリット電極を用いた接触放電ツルーイング/目直し, 砥粒加工学会学術講演会講演論文集(1998)120.
- 5) 田牧純一, 杉野豪:電着 CBN クイルの YAG レーザ目直し, 砥粒加工学会学術講演会講演論文集(1994)134.
- 6) 例えば吉田雄二:ケミカル目直しの開発, 精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (1992)63.
- 7) 例えば稲葉文夫, 金井彰:遊離砥粒によるメタルボンド砥石の砥粒突出し高さの制御, 砥粒加工学会学術講演論文集, (1994)159.
- 8) 森英治, 北島弘一:電解放電目直しに関する基礎的研究ー櫛歯型電極による目直しの試み(第一報)ー, 精密工学会春季大会学術講演会講演論文集(1990)977.
- 9) 久保田護, 田村祐二:メタルボンド砥石の放電目直しについて, 精密工学会春季大会学術講演会講演論文集(1986)631.
- 10)例えば岡野啓作, 堤千里:ファインセラミックスの加工技術(第2法)ーメタルボンド切断砥石のインプロセス電解目直しー, 機械技術研究所所報, 42, 3(1988), 97.
- 11)岡野啓作:超砥粒砥石の電解目直し・放電目直し, 精密工学会誌, 55, 6, (1989), 998.
- 12)日立製作所:電解研削用砥石の目直し方法及び目直し装置, 公開特許公報, 昭和 51-70591, 特許出願昭和 49 年 12 月 16 日-143422.
- 13)岡野啓作:メタルボンド切断砥石の電解目直し, 精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (1983)371.
- 14)大森整:超精密鏡面加工に対応した電解インプロセス目直し, 精密工学会誌, 59, 9(1993)1451.
- 15)大森整:ELID 研削加工技術ー高能率研削と鏡面加工ー, 日本機械学会講習会教材, (1995)No82-95.
- 16)大森整, 中川威雄:青銅ボンド砥石の電解目直し, 精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, (1989)321.
- 17)高橋一郎, 大森整, 中川威雄:直流電源による青銅ボンド砥石の電解目直し効果, 精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, (1990)729.
- 18)例えば鈴木清, 植松哲太郎:ツイン電極法による電解/放電目直しの研究(第1報)ー

- インプロセス電解目直しの試みー，精密工学会春季大会学術講演会講演論文集，(1989)711.
- 19)谷口紀夫:ナノテクノロジーの基礎と応用ー超精密・超微細加工とエネルギー加工ー，工業調査会，(1988)243.
- 20)J. F. Kahles: Metals Handbook vol. 3, edited by T. Lyman(American Society for Metals(1967), 234.
- 21)古橋一尊:電解加工技術研究会第一回講習研究会テキスト，(1967)39.
- 22)イビデン株式会社セラミック事業部：放電加工用電極カタログ.
- 23)横川和彦，横川宗彦:研削加工のすすめ方，工業調査会，(1992)255.
- 24)植松哲太郎，鈴木清:超砥粒砥石の突出し量の検討ー第1報(各種砥石と測定法)，砥粒加工学会学術講演会講演論文集，(1997)109.
- 25)植松哲太郎，鈴木清:超砥粒砥石の突出し量の検討ー第2報(突出しに関する幾何学的考察)，砥粒加工学会学術講演会講演論文集，(1997)113.
- 26)夏恒，国枝正典:放電加工における実加工中のエネルギー配分の測定，精密工学会誌，62，8(1996)1141.
- 27)中西雅秋，横山健三:電解目直し用研削液の開発(第3報)ー電解皮膜生成に及ぼす無機塩の影響ー，精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集，(1992)851.
- 28)川村末久，矢野章成:研削加工と砥粒加工，共立出版株式会社，(1984)109.

### 第3章 プラズマ研削法における延性モード研削仕上面に及ぼす研削油剤の効果と影響

#### 3.1 緒言

代表的な除去加工である切削加工・研削加工・研磨加工はそれぞれ独自の除去機構を利用し、概して互いに補完的な役割を担ってきた。しかし、近年では、機器の高品位化に伴い、それぞれの加工技術の高精度化への要求から、独立して高平滑鏡面加工技術の確立が切望されている。

こうした背景の一例として、複雑微細な形状の高精度加工を行うことや加工工程の削減による製品のコストダウンを実現する上で、ラッピング、ポリッシング等の圧力転写型加工からシングルポイント工具による切削や砥石による研削などの運動転写型加工への移行が進められている。例えば、切削加工では、シングルポイント工具を利用した超精密旋削により、アルミ・銅などの延性材料から、ファインセラミック、光学レンズ、シリコンウエハ等の硬脆材料、および近年需要が増しているチタン合金の鏡面加工技術へ発展している<sup>1)</sup>。一方、研削加工は精密切削加工と異なり、微小な多刃の砥粒で除去加工を行うがゆえに、無数にある微小砥粒切れ刃の管理・徹底が難しく、超精密研削加工の実用化は超精密切削加工に比べ困難となっていた。しかしながら、研削加工により高平滑鏡面加工を行う試みは古くから行われており、特に近年では、硬脆材料の鏡面仕上げを効率化させたいという現実的な強い要求や超精密研削加工は、超精密切削加工と比較し広範な作業領域を持つことから、研削加工による超平滑精密加工が注目されている。

ところで、ファインセラミックなどの硬脆材料における超平滑高品位精密加工では、マイクロクラック等の表面欠陥がない延性モード加工が肝要であり、脆性-延性遷移点(工作物切込み厚さを脆性的な加工と延性的な加工の境界)以下に制御する必要がある<sup>2)</sup>。このために、研削加工では、砥粒切れ刃の先端を揃え、同時切れ刃数を多くすることとみなすことができ、この対策として、PVA樹脂を使ったスポンジ砥石<sup>3)</sup>や#800よりも細粒の砥石が使用され、近年では、粒径がサブミクロンの超微粒砥石<sup>4)</sup>も検討されている。

しかし、PVA砥石の場合には、弾性に富み砥石形状の維持が非常に困難であり、細粒・微粒砥石では、砥粒保持力が低下するため、研削中の砥粒の脱落が生じやすくなり、連続した研削加工が難しく、劣化した砥石作業面を適性に再生させるための目直し作業等も粒径が小さくなるほど容易ではなくなる。さらに、細粒・微粒砥石では、加工能率を大きく改善できないなど、基本的な課題を抱えている。従って、従来研削技術の

延長では、高平滑鏡面の創生と加工精度の両立、さらに加工能率までを期待することは現実的に不可能であった。

これに対し、砥粒保持力の高い粗粒メタルボンド砥石で高平滑延性モード研削が実現できれば、粗加工から最終鏡面加工まで、全ての加工工程を能率良く行い得る可能性があり、近年では、安井らによって実現できることが提案されている<sup>5)</sup>。これまでの研究報告では、粗粒メタルボンド砥石を用いた場合に、延性モード研削面が得られる条件として、砥粒切れ刃の先端を平坦に揃えること、また、砥石周速度によらず、速度比(テーブル速度  $v_{wp}$ /砥石周速度  $v_g$ )小さくすることが有効であることが示されている<sup>6)</sup>。

そこで、本章では、粗粒メタルボンド砥石を用いた場合における各種ファインセラミックおよびガラスの高能率・高平滑延性モード研削加工を目的として、加工形態に大きな影響を与える研削油剤に注目し、延性モード仕上面に及ぼす研削油剤の効果と影響について実験的に検討した。

今回、実験に用いた研削油剤は、近年開発された環境対応型のシンセティックタイプ(オイルフリー)のものを3種類である。湿式研削に供給される研削油剤の種類や組成、また希釈倍率(濃度)によって研削特性や仕上面性状が変化することは周知の通りであり、これまで多くの研究者によって報告されている。しかしながら、近年、環境問題をはじめとした数々の法律が制定され、特にダイオキシン規制・PRTR法の制定に伴う特定化学物質の除去により、研削油剤の組成・成分は大きく変化している現状がある。こうして新たに開発された研削油剤が、必ずしも従来の研削油剤に匹敵する研削性能の水準に達しているとは言えないという指摘もあり、また、その研究報告も至って少ない。そこで、これまでの研究成果に加えて、新たに開発された研削油剤の効果と影響について検討する必要があると考える。

従って、本章で得られる成果は、次章で述べる超平滑研削加工に及ぼす研削油剤の効果と影響の把握の指針として、また、現在開発されている研削油剤の最適選択方法の基礎資料として、有意義なものになると考えられる。

## 3.2 ファインセラミックの延性モード研削加工技術

### 3.2.1 ファインセラミック研削加工の特異性

近年、代表的な新素材としてセラミックが注目されており、その多岐にわたる特性から、センサなどの機能性材料、IC 基板などの完全物性材料、そして切削工具、セラミックエンジン等に代表される構造用材料など、急速にその用途が拡大しつつある。この際、種々の焼結法によってつくられるセラミック素材が、そのまま機器構成部材として使われることもあるが、大抵の場合には焼結成形品の寸法精度の低さから二次的に何らかの機械加工が必要となる。

特に、完全物性材料や構造用材料として使われる場合には、機械加工が不可避であり、加工精度と目的に応じて、研削、ラッピング、ポリッシングなどの微小量加工が実施されている。中でも、研削加工は、セラミックの切削技術について未だ十分な成果が出ていない現在、主要な機械的成形加工技術として期待されており、その加工分野も、高能率研削を含め極めて幅広い範囲にわたっている。

しかし、表 3.1 に示すセラミック素材の代表的な機械的性質からもわかるように、セラミック材料は高硬度で塑性変形抵抗が大きく、しかも一般に脆性であるなど、一般の金属材料とはかなり異なり、加工性の面からいくつかの課題を抱えている。したがって、従来の金属を対象とした機械加工の概念が適用できない部分が多く、それは工具選択や加工条件の設定、さらには工作機械自体の設計まで、広範な分野に影響を与えることになる。上記のように、微小量加工がその加工技術の主体になっていることも、このようなセラミックの特異性の反映だと考えることができる。セラミックの材料物性を比較すると、金属は低硬度・高靱性であり、セラミックは高硬度・高脆性であるが、このセラミックを微小切削したときの材料除去機構は、常に脆性破壊によるものばかりとは限らない。

表 3.1 各種材料の機械的特性

材料	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	ヤング率 (GN/m <sup>2</sup> )	引張りまたは 曲げ強度 (MN/m <sup>2</sup> )	ビッカース 硬度 (GN/m <sup>2</sup> )	破壊靱性値 K <sub>IC</sub> (MN/m <sup>3/2</sup> )
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.0	340	500	22	3.5
Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	3.3	314	1000	20	5.0
ZrO <sub>2</sub>	6.1	200	1180	18	13.0
SiC	3.3	425	400	41	3.4
Ni-Cr-Mo 鋼	7.8	230	1300	4	47.0
低炭素鋼 (焼入れ)	7.8	210	350	1	200 以上

一般的な平面研削における研削抵抗(grinding force)を考えると、酸化物・窒化物系セラミックは、硬度・抗折力・破壊靱性値ともに近い値であり、法線抵抗( $F_n$ : normal force)、接線抵抗( $F_t$ : tangential force)ともに同等の値をとるが、金属材料の研削抵抗に比べ、法線抵抗  $F_n$  が接線抵抗  $F_t$  より大きいことが知られている。セラミックと金属の研削抵抗比(grinding force ratio)を比較すると、鋼など一般的な金属材料では、抵抗比  $F_n/F_t$  が 2 倍程度であるのに対し、高強度のセラミックでは 5~10 倍にもなるといわれている。これは、切削工具材などの高硬度のセラミックについて知られている現象であり、その原因として、砥粒が工作物に喰い込むのに大きな力を必要とするため、結果として、法線抵抗が大きくなると考えられている。したがって、一般に、セラミックの研削に用いる研削盤や砥石などの剛性は高いことが要求される。

また、工作物が研削しやすいかどうかはその材料のその他の性質にも依存する。例えば、そのときの材料除去機構が脆性的であるか、塑性的であるかによって大きく研削能率が異なってくる。特に、セラミックのような脆性材料の場合には、その破壊しやすさの目安となる破壊靱性値(fracture toughness) $K_{IC}$  と研削のしやすさの目安となる研削比(grinding ratio)の間には密接な関係があることが知られている。 $K_{IC}$  が高い場合、材料は靱性に富んでいて脆性破壊を生じにくく、材料除去のための破壊に要するエネルギーが大きくなり、砥石に大きな研削抵抗が作用して、砥粒の脱落や摩耗を引き起こし、結果として研削比(効率)が低下する。

同様のことは、一般的に材料の曲げ強度と研削比の関係においてもみられる。セラミックは、組織感受性の高く、強度と破壊靱性が非常に似た状態にあるため、組織構造の状態の影響を受けやすく、同一化学組成のものでも、多孔質であるか緻密質であるかによって、強度も破壊靱性も大幅に異なってくる。たとえば、多孔質の反応焼結  $Si_3N_4$  と緻密質のホットプレス  $Si_3N_4$  では、強度も破壊靱性値も、大きく異なる。前者は後者の 1/2~1/3 の強度であり、脆性破壊しやすく、結果として研削比は大幅に大きくなる。このように、セラミックの機械加工上の性質を知るには、従来の工具材としての研究による頼るしかなく、とりわけ、ファインセラミックの研削加工上の諸性質を知るには、前述した材料組織による機械的性質の大きな変動もあり、その加工性は予測が難しく、現状では、実際に個々の材料ごとにその用途に適応した条件を求めるしかないようである。

本研究では、表 3.2 に示すようなファインセラミック<sup>7), 8)</sup>を対象として、高平滑研削加工の可能性を検討した。供試材料は、ホットプレス法を用いて焼結した炭化けい素(以下、HPSC と記す)、熱間静水圧法で焼結した窒化けい素(以下、HIPSIN と記す)、そしてアルミナを主成分とするアルミナチタンカーバイド(以下、 $Al_2O_3$ -TiC と記す)などである。これらのセラミックは一般的に、曲げ強度・破壊靱性などの機械的強度に優れ、熱的・電気的特性にも優れた性質を持ち、電子材料等への利用が進んでいる。

しかし、その優れた機械的性質のために、一方で、いずれも加工が難しく、とくに研削加工における難削性が問題となっている。また、近年、広い温度範囲で熱膨張係数が極めて小さいことを特徴に開発された低熱膨張性ガラスの高平滑加工も検討した。

表 3.2 に示された数値はメーカーの公称値であり、本実験で用いたファインセラミックの中では、ヤング率等から見て HPSC は剛性が高く、熱伝導率や熱膨張係数から見た加工時の熱特性は安定していることが推察できる。これに対し、HIPSIN は、曲げ強度が高い一方で、ヤング率が低く、熱伝導性が HPSC の 1/4 と極めて低く、加工時の熱特性が、HPSC に比べかなり異なることが予想される。また、 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiC}$  は、HIPSIN よりも熱伝導率がさらに低く、幾分硬脆なセラミックであると言える。

表 3.2 ファインセラミックの機械的特性

	HPSC	HIPSIN	$\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiC}$	ガラス
密度( $\text{g/cm}^3$ )	3.23	3.3	4.24	2.55
比熱( $\text{J/g}\cdot\text{K}$ )	0.60	0.68	0.90	0.879
熱伝導率( $\text{W/m}\cdot\text{K}$ )	100	25.4	21.0	1.70
熱膨張係数( $\times 10^{-5}/\text{K}$ )	4.7	3.4	0.78	0.008
曲げ強度(MPa)	540	1100	835	143
破壊靱性( $\text{MN/m}^{3/2}$ )	3.2	7.5	5.0	1.0
ヤング率(GPa)	441	310	392	90
ビッカース硬さ(Hv)	3302	2380	2600	680
ヌーブ硬さ(Hk)	2500	1800	1950	600

### 3.2.2 ファインセラミックの延性モード研削加工技術

超精密加工を計画する上で、材料除去の破壊特性は、いわゆる母性原理における転写精度を支配する重要な因子であり、ファインセラミックに代表される脆性材料の破壊機構の解析は、古くからダイヤモンド錐体の押込み、引掻き実験による破壊過程を対象に数多く研究されている<sup>9), 10)</sup>。これらの目的は、ラッピング、ポリッシングなどの圧力転写型表面創生原理の加工工程における材料除去メカニズムが、砥粒の押込み、引掻き現象を基礎に置く考え方から、加工条件の一般的法則性を見出す意図があった。そのため、この押込み、引掻き実験では、入力情報はいずれも荷重であり、出力は材料の破壊形態となっている。

一方で、能率的な脆性材料破壊機構が切望され、加工圧力による材料除去率を制御するラッピング、ポリッシングなどの圧力転写型表面創生原理から、強制切込み量を制御して除去加工を行う切削加工、研削加工などの運動転写型表面創生原理の考え方が報告されている。これにより、切込み深さを入力信号とした切削実験が行われ、材料破壊形態を出力とする脆性材料の破壊機構が検討されている。

これらの検討から、表面創成原理は、圧力転写原理と運動転写原理という2つに大別できる。以下に、それぞれの特徴を示す。

#### 1) 圧力転写型表面創成加工(ラッピング、ポリッシング等)

工具・工作物間の接触圧力をパラメータとして材料除去率を制御する。

脆性破壊モードと延性破壊モードの遷移点は延性・脆性圧力遷移点  $p_c$  によって決定される。

#### 2) 運動転写型表面創成加工(切削、研削等)

工具・工作物間の強制切込み量を制御して除去加工を実施する。

脆性破壊モードと延性破壊モードの遷移点は、工具・工作物間の干渉量であり、延性・脆性切込み深さ遷移点  $d_c$  によって決定される。

ファインセラミックに代表される脆性材料の延性モード加工を実現するためには、圧力転写型表面創成加工においては、個々の作用砥粒の加工圧力を延性・脆性圧力遷移点  $p_c$  値以下に制御することが必要である。そして、運動転写型表面創成加工においては、個々の切れ刃の工作物との干渉量を  $d_c$  値以下に制御することが必要であり、これらを制御できる条件を、工作機械、および研削砥石等の仕様が満たし、これを支える技術的対策が整っている必要がある。

このような考え方から、研削加工の場合、延性モード研削を実現するには、砥石作業面上の有効切れ刃と工作物の干渉量が、延性・脆性切込み深さ遷移点  $d_c$  以下になるように、形直し直後から砥石摩耗過程を通じて満たさなければならない。

ここで、使用する砥石について見てみると、砥粒粒径が  $d_c$  値よりも小さな細粒・微粒砥石を用いる場合と、 $d_c$  値よりも大きい粗粒砥石を用いる場合に分けて考えられる。



現在、一般的に、延性モード研削を実現するには、粒度#1500以上の細粒・微粒砥石が用いられている。しかしながら、細粒・微粒砥石の場合には、砥粒保持力が低下し、微小な研削抵抗で砥粒切れ刃が脱落し、連続した加工の実現が困難となる。また、劣化した砥石作業面を適性に再生させるための目直し作業等も粒径が小さくなるほど容易ではない。このように、細粒・微粒の砥石を用いた延性モード研削では、加工能率を大きく改善できないなど、いくつかの基本的な課題を抱えている。

こうした課題からも、砥粒保持力が強い粗粒砥石を用いることが好ましいと考えられる。しかし、砥粒粒径が $d_c$ 値よりも大きい粗粒砥石を用いる場合には、研削中の脱落砥粒、破碎砥粒の大きさが $d_c$ 値より大きく、仕上面にスクラッチなどの割れを伴う傷が発生する危険性がある。従って、砥粒の破碎による自生発刃を前提とする従来の研削加工の概念は適用できないことが考えられる。

このようなことから、連続的延性モード研削が可能な研削砥石を利用する新概念の研削技術の開発が必要不可欠であり、また、砥石作業面上の砥粒切れ刃高さ分布および砥石回転振れを $d_c$ 値以下にする超精密形直し・目直し技術の開発も重要である。

図 3.1 に、粗粒砥石による従来の研削加工と新概念の研削加工モデルを比較して示す。そして同時に、このモデルは、粗粒砥石の脆性モード目直しモデルと延性モード目直しモデルの比較ともいえる。

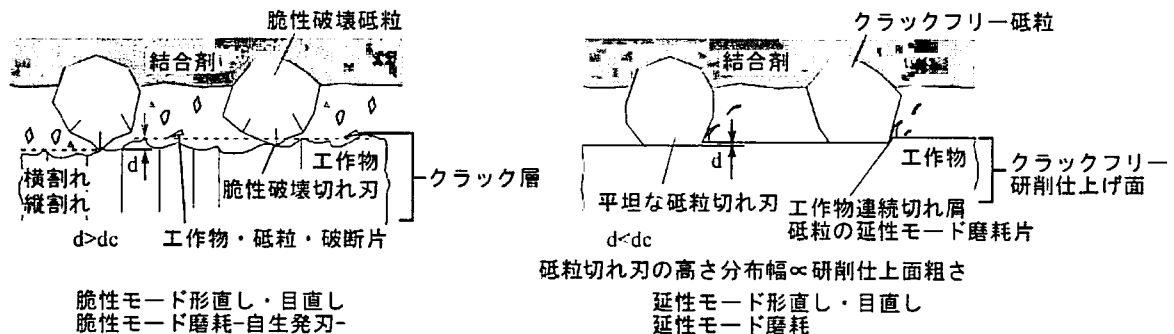


図 3.1 粗粒砥石による従来の研削加工と新概念の研削加工モデルの比較

ここで、この臨界砥粒切込み深さ  $d_c (\times 10^4 \text{ nm})$  は、材料固有のものであり、ヤング率  $E(\text{GPa})$  とヌープ硬さ  $H_k(\text{GPa})$ 、破壊靱性値  $K_c(\text{MN/m}^{3/2})$  によって次式で算出できる<sup>11)</sup>。

$$d_c = 0.15 \left( \frac{E}{H_k} \right) \left( \frac{K_c}{H_k} \right)^2 \dots\dots (3)$$

このように、硬脆材料の延性モード研削においては、各種材料により、臨界砥粒切込み深さ  $d_c$  が異なる。

ここで、本実験で使用するファインセラミックおよびガラスの臨界砥粒切込み深さ  $d_c$  を(3)式を用い、第 3 章 3.2 節で示した機械特性表より算出すると、

$$\text{HPSC: } dc = 0.15 \left( \frac{E}{H_k} \right) \left( \frac{Kc}{H_k} \right)^2 = 0.15 \left( \frac{441}{25} \right) \left( \frac{3.2}{25} \right)^2 = 460 \text{ nm}$$

$$\text{HIPSIN: } dc = 0.15 \left( \frac{E}{H_k} \right) \left( \frac{Kc}{H_k} \right)^2 = 0.15 \left( \frac{310}{18} \right) \left( \frac{7.5}{18} \right)^2 = 4484 \text{ nm}$$

$$\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Tic: } dc = 0.15 \left( \frac{E}{H_k} \right) \left( \frac{Kc}{H_k} \right)^2 = 0.15 \left( \frac{392}{19.5} \right) \left( \frac{5.0}{19.5} \right)^2 = 1982 \text{ nm}$$

$$\text{ガラス: } dc = 0.15 \left( \frac{E}{H_k} \right) \left( \frac{Kc}{H_k} \right)^2 = 0.15 \left( \frac{90}{6} \right) \left( \frac{1}{6} \right)^2 = 625 \text{ nm}$$

となる。

この算出結果を見ると、臨界砥粒切込み深さ  $dc$  は、HIPSIN が最も大きく、次いで  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Tic}$ 、ガラス、そして、HPSC が最も小さくなることがわかる。

### 3.2.3 研削油剤の役割と評価

研削加工の高精度化、高能率化に伴い、研削作業における研削油剤の役割は増大し、その性能向上は強く望まれている。しかし、研削油剤の性能を解析し得る有効な方法が確立されていないため、経験的な手法で行なわれているのが現状である。このため、明確な指針を持って、定量性のある研削油剤性能の計れる試験装置が必要とされている。一般に、研削油剤供給効果には潤滑効果、冷却効果、浸透および洗浄効果等が挙げられる。これらの効果により、寸法精度や仕上げ面粗さの向上、研削焼けや割れの防止、加工変質層や残留応力の抑制、砥石寿命の延長および加工速度の向上等の各種研削特性への効果が期待され、実際に効果が現われているといえる<sup>12)</sup>。従って、研削油剤の性能と研削特性との直接的関係は、各種研削油剤に対する研削特性の変化を検討することによって、一応定性的に検討し得ることができる。しかし、各種研削特性の変化は、研削油剤の各効果が総合的に作用して生じるものであるため、研削油剤の個別の効果については明確にすること難しい。特に研削油剤は多くの化学成分から構成されており、それらの構成要素と研削特性の関連性に関する検討は相当困難であると考えられる。

そこで、研削油剤効果の基礎的な観点からの評価について考えてみる。まず、潤滑効果は砥石と加工物接触面における摩擦を減少させるので、研削抵抗の減少および発生熱抑制に寄与する。また、冷却効果は発生研削熱除去に関係し、研削温度上昇の抑制に寄与する。さらに浸透および洗浄効果は、浸透性によって気孔(マトリックスタイプの場合は、チップポケット)に油分子が入り込み結合剤と切り屑との焼付を防止して、目づまりを少なくする。このことからすると、研削抵抗や研削温度および工作物除去速度への研削油剤の効果が、上記の研削特性への効果として現われると推察され、研削油剤の性能は基礎的には研削温度や研削抵抗および工作物除去速度を解析すること

によって評価し得ると考えられる。

従来、研削油剤の性能試験結果については多数報告<sup>13), 14)</sup>されているが、このように基礎的な観点に立って、定量的に検討しようと試みたものは少ない。このため、研削油剤の性能が必ずしも十分に把握され、向上させ得ていないのが現状かと思われる。また、平面研削加工の湿式研削における研究報告によれば、研削条件が厳しくなれば、接触弧内で研削油剤が沸騰現象を起こし、研削油剤の効果が消失する現象などが見出され<sup>15), 16)</sup>、基礎的な観点からの検討、また、実際に研削油剤を用いた場合の研削特性評価、すなわち、工作物仕上面性状、仕上面粗さ、研削抵抗、研削点温度など、研削特性に及ぼす研削油剤の効果と影響についての検討が極めて重要である。

### 3.3 実験装置および実験方法

本実験は、図3.2に示すようなNC横軸角テーブル形高精度平面研削盤(NACHI製UMG III)を用いた。主軸およびテーブルの移動分解能は、x方向に $\mu\text{m}$ 単位、y、z方向にサブ $\mu\text{m}$ 単位である。主軸は、静圧空気軸受で十分な剛性、振動特性を持っている。また、研削油剤循環装置、温調器が備わっており、安定した研削油剤供給が可能である。表3.3に、諸元を示す。なお、実験を行う前に、主軸の振動特性を調べるため、FFTによる固有振動数の測定を行っている。その結果、高調波成分は観測されたものの、明確な固有振動数確認できなかったが、主軸回転数が12000rpm付近でやや周波数ピーク値が高くなったため、実験は12000rpmを避けて行っている。

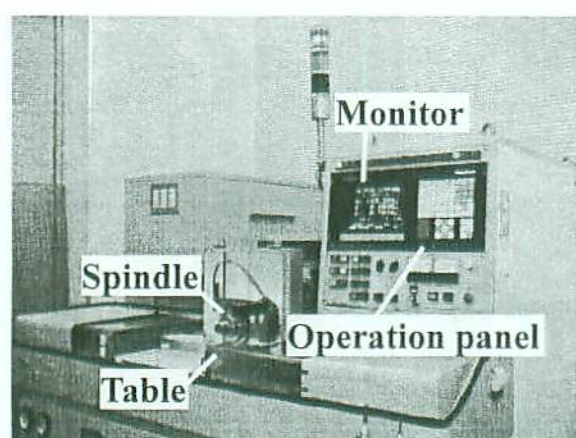


図 3.2 高精度平面研削盤の外観

表 3.3 高精度平面研削盤の仕様

Spindle speed	MAX 30000rpm
Main shaft spindle	Air spindle
Smallest increments	X-axis: 1 $\mu\text{m}$
	Y-axis: 0.1 $\mu\text{m}$
	Z-axis: 0.1 $\mu\text{m}$
X - Axis stroke	455mm
Y - Axis stroke	155mm
Z - Axis stroke	75mm

本実験で用いた工作物は、ホットプレス法で製造された炭化けい素(以下、HPSC と記す)、熱間静水圧法で製造された窒化けい素(以下、HIPSN と記す)、およびアルミナを主成分とするアルミナチタンカーバイド(以下、 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiC}$  と記す)の3種のファインセラミック、および近年、集積回路基板やロケットの先端部などの電気絶縁性高強度材料として需要が期待されている等低熱膨張結晶化ガラスである。砥石は、粗粒の#140で、集中度は50と砥粒密度が小さく、砥粒の保持力にも優れ、弾性変形が少ないメタルボンドダイヤモンド砥石を使用した。

実験開始前には、砥石作業面は、形直し、目直しを精密に行い、研削盤上に取り付けた砥石作業面観察・測定システムにより、各作業後に作業面観察・測定をその都度行い、作業面状態が同一になるように調整した。また、砥粒切れ刃高さを揃えるための精密目直しとして、各研削の開始時にHPSCを総研削量 $10000\sim 15000\text{mm}^3$ 程度の予備的な研削を行った。なお、砥石の形直し・目直し作業は、第2章においては、立型ロータリドレッサとツイン電極電解ドレス法を使用した。本実験では、実験機の都合上、形直しは、多石ダイヤモンドブロックツルア(SD100P)を用いた砥石研削法で行った。そして、目直しは、従来のスティック法(WASD法)と、



現在までの研究報告<sup>17), 18)</sup>より, CBN 砥石において高能率で高切れ刃密度に目直しが可能とされるスティック併用型遊離砥粒法(SLAD法)を併用して行った.

図 3.4 に, ブロックツルアによる形直しの模式図と, 図 3.5 に, SLAD 法による目直し方法の模式図を示す. また, 図 3.6 に, SLAD 法の目直し機構を示す. SLAD 法は, 予め溝を切った WA スティックに研削油剤の原液を浸したスティックと同じ粒度の遊離砥粒を目直しの時に溝に埋め込み, その中で WA スティックを研削しながら目直しする方法である.

従来の WA スティック法では結合剤を除去し, 砥粒切れ刃を生成する機構であったが, WA 砥粒による CBN 砥粒の破壊・脱落が多く, 砥石作業面近傍の切れ刃分布が粗になる傾向であった. そのため, 混入した遊離砥粒により結合剤除去を速め, CBN 砥粒への負荷を少なくする目直し方法として SLAD 法は考案されたものである. なお, 砥石の動バランスは, 加速度センサを用いた砥石動バランス測定装置(Micro Balancer 岡本工作機械製作所(株))を使用し, 砥石振れ 40nm 以下になるようにした.

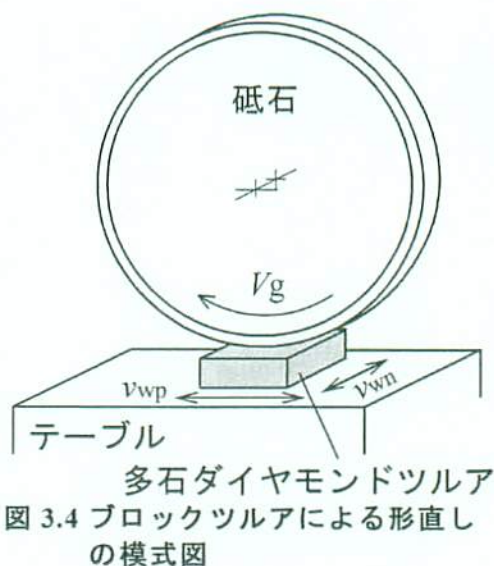


図 3.4 ブロックツルアによる形直しの模式図

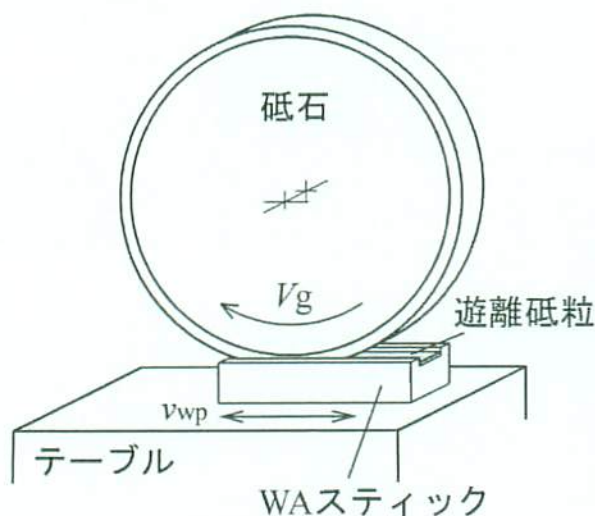


図 3.5 SLAD 法による目直し方法の模式図

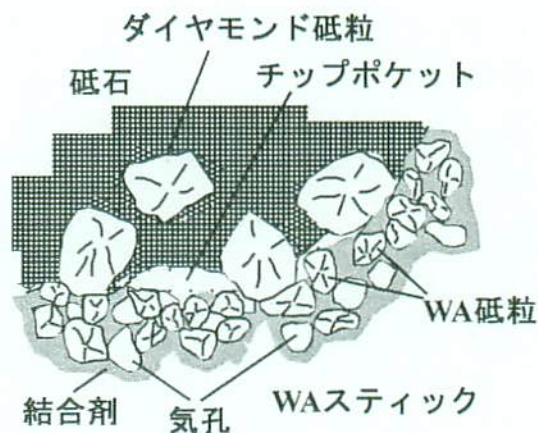


図 3.6 SLAD 法の目直し機構

### 3.4 工作物仕上面性状の評価装置と測定方法

研削加工後の工作物仕上面は、微分干渉顕微鏡および走査型電子顕微鏡(SEM)で観察し、仕上面粗さは、光干渉式非接触高精度表面形状測定機(WYKO 3D)および原子間力顕微鏡(AFM NanoScope III)で測定した。仕上面の硬さ測定には、微小硬度計(島津製作所製 DUH-200)を用いた。また、研削加工中における研削抵抗は、半導体ゲージを貼付した八角形弾性リング動力計で測定した。

以下に、それぞれの測定器の外観と仕様について述べる。

#### 3.4.1 ノルマルスキー式微分干渉顕微鏡(Nikon OPTIPHOT XN-UNR)

図 3.7 に、微分干渉顕微鏡の外観を、図 3.8 に、仕上面観察システムの外観を示す。ノルマルスキー式微分干渉顕微鏡は、新思想 CF 接眼レンズを採用する。CF システムとは、対物レンズ、接眼レンズとも倍率の色収差をそれぞれ単独で、良好に補正しておき、理想的な状態で組み合わせて、高性能化を図る方式で、従来のコンペンセーション方式と比較し接眼レンズ視野周辺の色つき(オレンジ色)がなくなり、100 %有効視野とし、きわめて鮮明な像が得られるのが特徴である。

今回の観測システムでは、微分干渉顕微鏡上部の CCD カメラで取り込んだ画像は、画像取り込み用ソフトで画像ファイルに変換され、パーソナルコンピュータに保存できるようにしている。

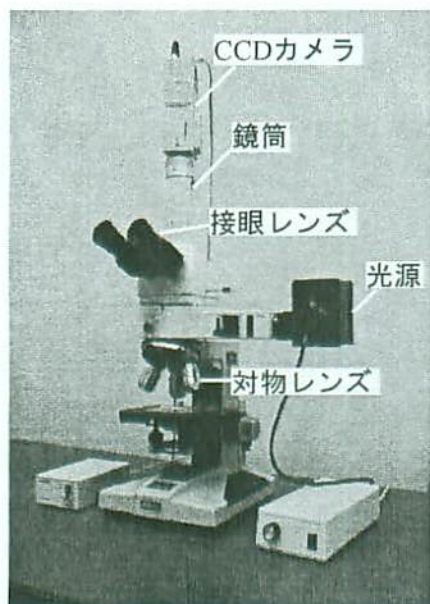


図 3.7 微分干渉顕微鏡の外観

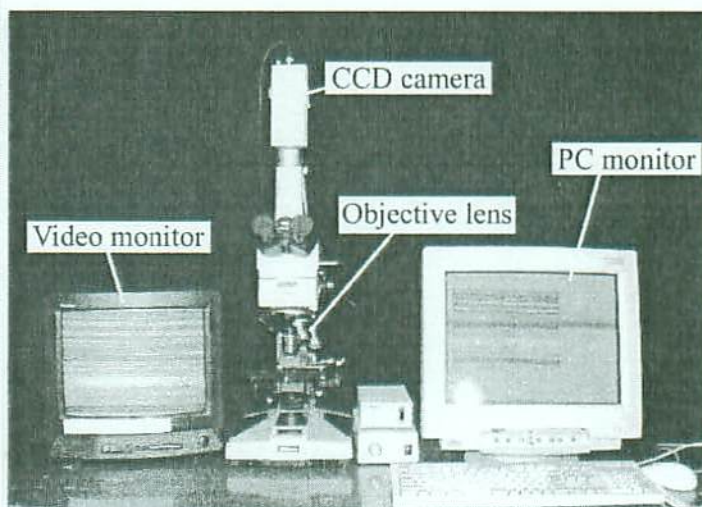


図 3.8 仕上面観察システム



### 3.4.2 走査型電子顕微鏡 SEM(日本電子 JSM-5800)

図 3.9 に、走査型電子顕微鏡装置の外観を示す。表 3.4 に走査型電子顕微鏡の仕様を示す。

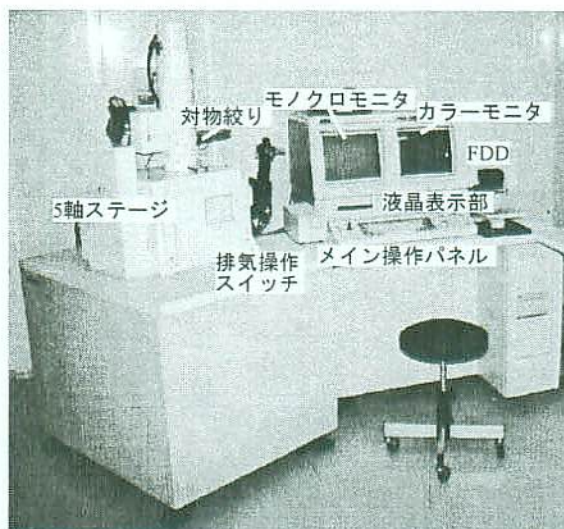


図 3.9 走査型電子顕微鏡(SEM)の外観

表 3.4 走査型電子顕微鏡(SEM)の仕様

2次電子	
分解能	3.5nm(WD:8mm,加速電圧:30kV)
倍率	× 18(WD:48mm)～× 300000
加速電圧	0.3～3kV(0.1kVステップ可変)
照射電流	3～3kV(0.1kVステップ可変)
その他	10 <sup>-12</sup> ～10 <sup>-6</sup> A(0.1kVステップ可変)
	自動焦点合わせ, 自動非点収差補正機能付
反射電子	
検出器	Sip-N接合型半導体検出器
像の種類	立体(SHADOW)像 凹凸(TOPO)像 組成(COMPO)像
増幅器	前置き増幅器,演算増幅器
映像出力	立体像,組成像,凹凸像信号
像極性	正,負
作動距離	5～48nm
X線分析	
機能	定性分析, 定量分析 低倍率(～200倍)X線像の撮影

### 3.4.3 光干渉型高精度微小表面形状測定器(WYKO TOPO-3D)

研削仕上面粗さの測定機器として、WYKO TOPO-3D（非接触表面形状計測器）を使用した。図 3.10 に、WYKO TOPO-3D の外観を、表 3.5 に TOPO-3D の主な仕様を示す。WYKO TOPO-3D は、非接触で測定の際に工作物を傷つけることなく測定が可能である。また、測定するファインセラミックの研削加工面は数 10nm オーダレベルであるため、空気清浄度が重要な要素となる。計測器周辺の浮遊微粒子が極めて少ない状態とするために、簡易クリーンルーム内に計測器を設置している。

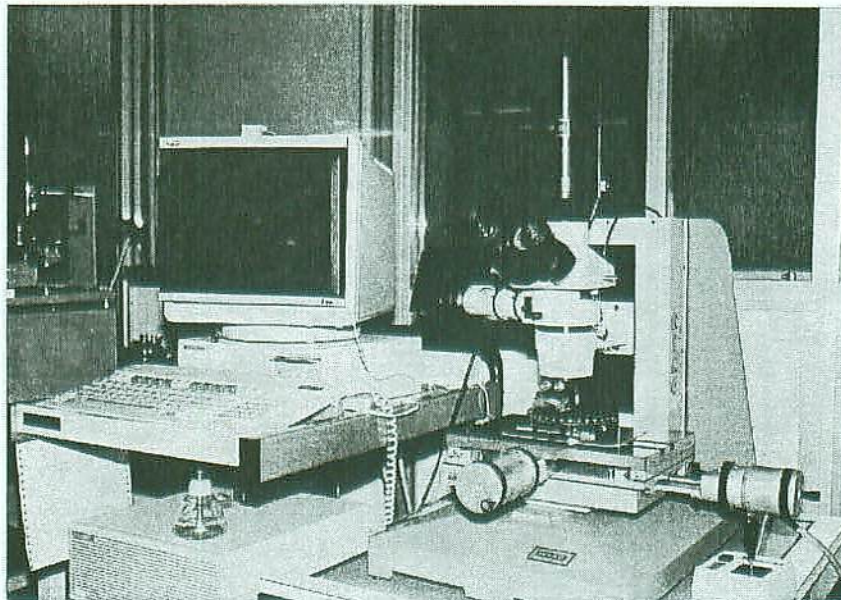


図 3.10 WYKO TOPO-3D の外観

表 3.5 WYKO TOPO-3D の仕様

	TOPO-3D
干渉タイプ	ミラウ
エレメント数	256×256
倍率	×40
測定範囲	256μm×256μm
最小高さ分解能	0.05mm
最小横分解能	1 μm
光学的分解能	0.65 μm
視野深度	2.25 μm
最大表面粗さ	2.25 μm
最大表面傾斜	6.92°
最大ステップ段差	1.1 μm
表示能力	2D, 3D



### 3.4.4 マルチモード走査型プローブ顕微鏡(NanoScopeⅢ)

図 3.11 に原子間力顕微鏡の外観を、表 3.6 に、装置の仕様を示す。本装置は、探針がサンプル表面に直接触れて測定する方法（コンタクトモード）と、先端に探針をつけたカンチレバーを加振させ、サンプル表面上を断続的に軽く触れながら走査する方法（タッピングモード）があり、今回の測定では、タッピングモードにより測定を行った。

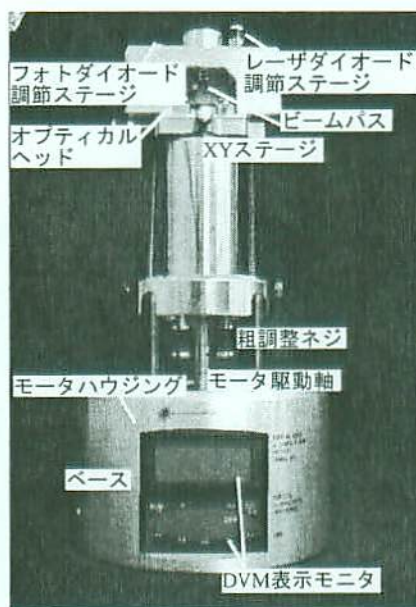


図 3.11 AFM の外観

表 3.6 AFM の仕様

最大測定物	12mm × 12mm
最大測定範囲	画内: 125 μm × 125 μm
	垂直方向: 5 μm
測定精度	コンタクト 画内: 原子間距離
	垂直方向: 原子間距離
	ノンコンタクト 画内: 0.5mm
	垂直方向: 原子間距離

### 3.4.5 ダイナミック超微小硬度計(DUH-200)

図 3.12 に、島津ダイナミック超微小硬度計の外観を示す。ダイナミック超微小硬度計は、工作物表面が圧子先端によって、押し込み荷重および押し込み深さを基準値として、最大荷重まで一定の速度で荷重を増加していき、最大荷重に到着後、一定時間その荷重で保持し、除荷が行なわれる。この時点で、圧子が試料にどれだけ侵入したかを測定することにより、ダイナミック硬度  $DH$  が得られる。また、試料表面の圧痕の対角線長さを顕微鏡で測定することによりビッカース硬度  $HV$  が得られる。ダイナミック硬度とビッカース硬度の定義式を(9.1)式、(9.2)式に示す。なお、本実験において、ファインセラミックの研削仕上面表層の硬度測定は、試験荷重を 200(gf)と低くして圧痕にクラックが発生しないようにして、また、脆性破壊痕を避けて行った。

$$DH = \alpha \frac{P}{D^2} \cdots (9.1) \quad HV = 1854.4 \frac{P}{l^2} \cdots (9.2)$$

$\alpha = 37.838(115^\circ \text{ 三角すい圧子, ビッカース圧子})$

$\alpha = 147.28(100^\circ \text{ 三角すい圧子})$

$P$  : 試験荷重(gf),  $D$  : 圧子の侵入量(.,m),  $l$  : くぼみの対角線長さの平均値(.,m)

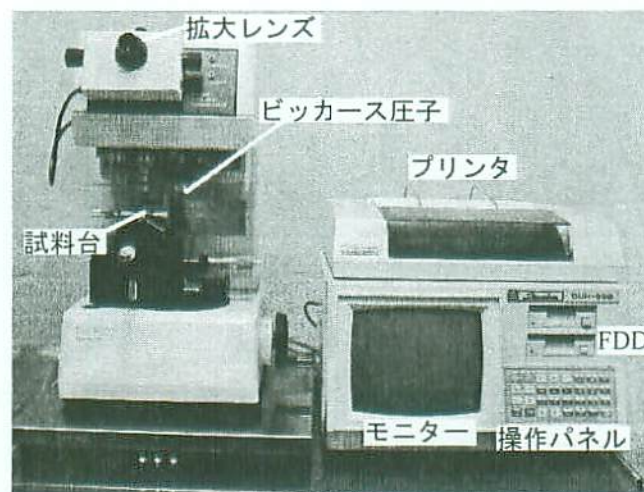


図 3.12 島津ダイナミック超微小硬度計

### 3.4.6 2次元研削抵抗測定用弾性八角リング

研削加工中における研削抵抗は、歪みゲージを八角弾性リングに貼り付けて測定を行った。図 3.13 に、八角弾性リングを用いた研削抵抗測定原理を示す。研削加工時に発生する研削抵抗により変形した八角弾性リングの変形量を 8 つの半導体歪みゲージ (A1, A2, A3, A4) および (B1, B2, B3, B4) (4 ゲージ法) を用い法線分力  $F_n$  と接線分力  $F_t$  に分解して測定する。これをブリッジヘッド、ストレインアンプを通し、A/D 変換した電圧出力を、コンピュータにより処理する。今回使用した動力計は、接線方向分力  $F_t$ 、法線方向分力  $F_n$ 、2 分力の測定が行えるようにした。なお、ゲージ張り付け部は、エポキシ系接着剤(アラルダイト)でコーティングし、さらに防水のために、シリコンでゲージ接着部分を覆っている。また、ゲージからの配線には、電氣的ノイズを考えアースした。4 つのゲージは、ブリッジボックス(共和電業 DB-120P)に接続し、ストレインアンプに入力する。また、ブリッジの不平衡があったため、補償抵抗をブリッジボックスに取付けてある。表 3.7 に、使用したゲージの規格を示す。

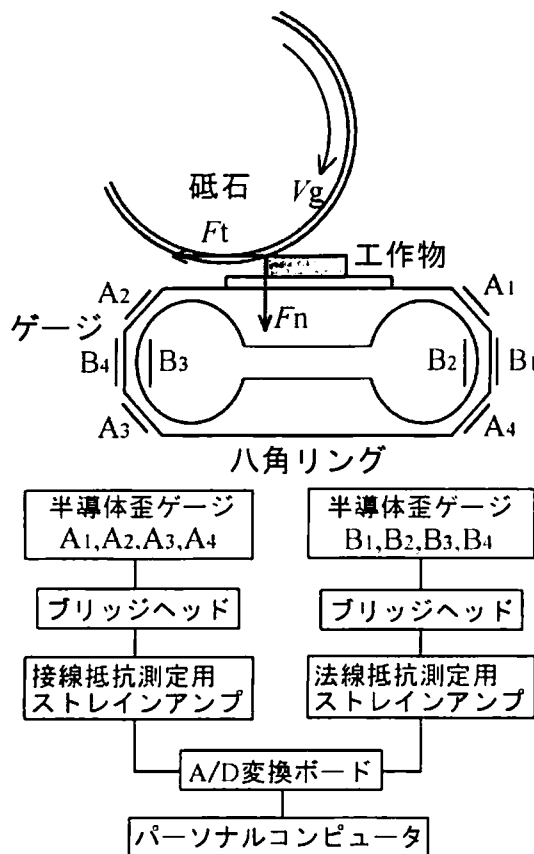


表 3.7 半導体歪ゲージ規格

Type	KEN-2-E4-11
Gage Resist	124.0 $\Omega$ $\pm$ 2%
Gage factor	-102 $\pm$ 3%
Gage length	2mm
Max.Allowable strain	$\pm$ 3000 $\mu$
Max.Allowable current	20mA
Temp.Coeff.of Resist. (as apparent strain on steel)	$\pm$ 1.8 $\mu$
Temp.Coeff.of Sens. (as strain level of 500m)	-0.31%/°C

図 3.13 八角弾性リングを用いた研削抵抗測定原理

### 3.5 実験条件

ファインセラミックなどの硬脆性材料の高平滑研削を実現させるためには、脆性破壊を生じない延性モード研削形態にすることが重要である。そこで、本章では、延性モード研削仕上面に及ぼす研削油剤の効果と影響について、平面プランジカット研削を行い、実験的に検討した。

実験に用いた工作物は、3.3 で記したように、セラミックには、HPSC, HIPS<sub>N</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiC, およびガラスである。研削油剤は、図 3.14 に示す砥石の研削方向前方を 1/4 程度側面から挟み込んだノズルを製作し、研削点近傍に供給している。今回の実験で使用した研削油剤は、3 種類のソリュブルタイプである。各研削油剤の成分は、アニオン界面活性剤を主体としたタイプ T1、グリコールと脂肪酸アミン塩を主体としたタイプ T2、そして、グリセリンを主体としたタイプ T3 である。表 3.8 に、研削油剤の詳細な組成・成分を示す。実験時における研削油剤の供給量は、12 l/min とし、希釈は水道水で行った。

表 3.8 研削油剤の組織・成分表

研削油剤	組織・成分	%	密度
T1	アニオン界面活性剤	50~70 wt%	1.030g/cm <sup>3</sup> (15℃)
	ノニオン界面活性剤	5~10 wt%	
	消泡性物質	5~10 wt%	
	非鉄金属防食材	1wt%未満	
	防腐剤	1wt%未満	
	消泡剤	1wt%未満	
	水	残	
T2	ポリアルキレングリコール	10%	1.002g/cm <sup>3</sup> (15℃)
	不水溶性エステル	15%	
	脂肪酸アミン塩	40%	
	水	25%	
	その他（消泡性物質、消泡剤、非鉄金属防食材）	10%	
T3	グリセリン	80%	1.231g/cm <sup>3</sup> (15℃)
	C18 脂肪酸	1%	
	アミン	4%	
	水	15%	

砥石は、粒度#140、集中度 50 のメタルボンドダイヤモンド砥石を使用した。なお、本実験では、プランジ研削で延性モード研削が可能になるように、砥石作業面を調整し、また、実験中には、適宜形直し・目直しを行い、砥石作業面の一定化に努めた。

実験は、まず、乾式と湿式の平面プランジカット研削を行い、仕上面性状および仕上面粗さを比較することで、ファインセラミックの延性モード研削仕上面に対する研削油剤の供給効果を確認した。さらに、3 種類の研削油剤を用いた湿式研削における



研削仕上面を比較し、研削油剤の組成・成分が延性モード仕上面性状に及ぼす影響を調べた。

工作物仕上面の最大高さ仕上面粗さ表記は、JIS B 0601(2001)に基づき  $R_z$  としている。表 3.9 に、プランジ研削実験の実験条件を示す。

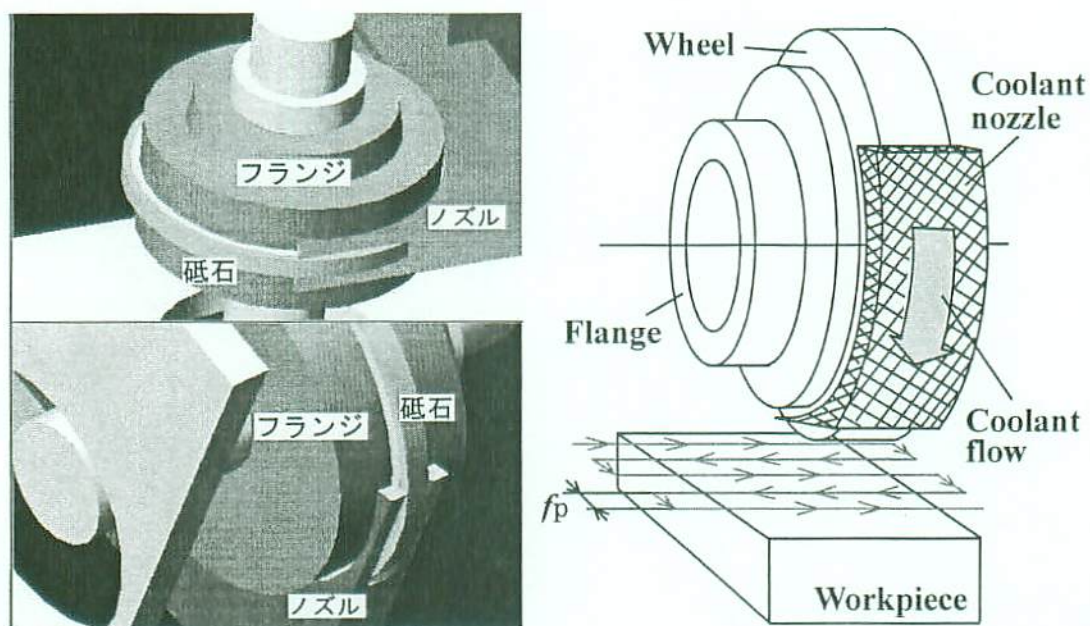


図 3.14 砥石閉形型ノズルの 3 次元モデルと模式図

表 3.9 プランジ研削実験条件

工作物		HPSC, HIPSN, $Al_2O_3$ -Tic, Glass Length $\times$ Width: 10mm $\times$ 10mm
砥石		SD140Q50M $D_o \times B \times D_i$ ; $\phi 100 \times 6 \times 40$
研削方法		Plunge grinding
砥石周速度: $V_g$		20m/s, 12m/s (Glass)
砥石切込み量: $t$		5 $\mu$ m
テーブル速度: $v_{wp}$		0.01 $\sim$ 5mm/s
研削油剤	種類	Soluble type T1, T2, T3
	希釈倍率	1/50, 1/10 (Glass)
	供給量	12 l/min
	温度	20 $^{\circ}$ C

### 3.6 実験結果および考察

#### 3.6.1 延性モード研削実験(HPSC の場合)

##### 3.6.1-1 研削油剤の供給効果

図3.15に、砥石周速度20m/s, 工作物速度 $v_{wp}=0.01\text{mm/s}$ と設定したプランジ研削法でHPSCを乾式研削した場合と研削油剤T1の50倍希釈液を用いて湿式研削した場合の仕上面を微分干渉顕微鏡およびSEMで観察した結果を比較して示す. なお, 研削前には, 延性モード研削が可能になるように, 砥石作業面を調整し, また, 実験中には, 適宜形直し・目直しを行い, 砥石作業面の一定化に努めている<sup>19)</sup>.

図より, 乾式研削の場合では, 仕上面の半分程度に延性研削モード面が見られるが,

残りは, 微小凹凸面となっている. 一方, 湿式研削では, 全仕上面がほぼ破壊のない超平滑面となっており, 研削油剤を供給することにより, 延性モード研削が良好に行えることがわかる. しかしながら, その湿式研削仕上面においても, 研削方向に条痕が見られ, 図に示したように, 3次元仕上面粗さ $(Rz)_{3D}$ は, 約635nmであり, プランジ研削法では, 平滑な仕上面は得られ難いことが確認できる. なお, 乾式研削で見られる微小凹凸面は, 乾式研削の方が湿式研削よりも研削温度上昇が大きくなり, 延性モード研削が行い易くなるにも関わらず, 生じていることから, 表面層が熔融剥離して起きたものと推測している.

図3.16に, 図3.15に示す, 砥石周速度20m/s, 工作物速度 $v_{wp}=0.01\text{mm/s}$ , 研削油剤T1を用いた湿式プランジ研削の場合の仕上げ面をWYKOで観察した結果を示す. 測定範囲は,  $256\mu\text{m} \times 256\mu\text{m}$ の微小範囲と,  $4.0\text{mm} \times 4.0\text{mm}$ の広域範囲の2種類としている. まず,  $256\mu\text{m} \times 256\mu\text{m}$ の微小範囲と,  $4.0\text{mm} \times 4.0\text{mm}$ の広域範囲を測定した両図において, 研削仕上面上に, 研削方向と平行方向に研削条痕が発生していることがわかる. そして,  $256\mu\text{m} \times 256\mu\text{m}$ の微小範囲仕上面粗さは, 図の2次元粗さ測定結果から, 研削方向平行仕上面粗さ(図中X-profile)は $Rz$ 値で約46.9nm,  $Ra$ 値では, 約11.8nmであり, また, 研削方向直角仕上面粗さ

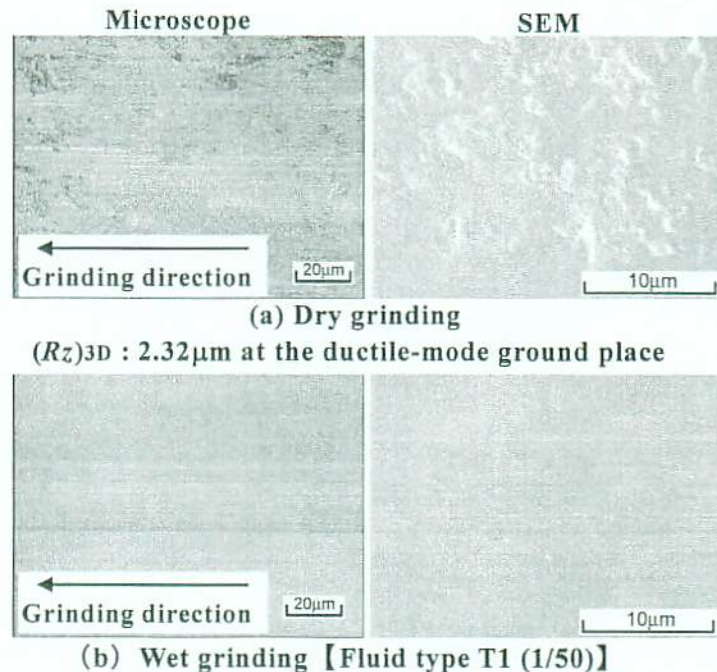


図 3.15 プランジ研削における乾式と湿式の HPSC 仕上面の比較  
[ $V_g=20\text{m/s}$ ,  $v_{wp}=0.01\text{mm/s}$ ,  $t=5\mu\text{m}$ ]



(図中Y-profile)は、 $R_z$ 値で約578.1nm、 $R_a$ 値では126.8nmとなっている。この結果から、研削方向平行仕上面粗さに比べ、研削方向直角仕上面粗さが極めて大きくなることがわかる。また、3次元的にみた研削仕上面粗さは、 $R_z$ 値で約635.9nm、 $R_a$ 値で約126.3nmであり、プランジ研削では、高平滑仕上面を得ることはできないことが確認できる。

次に、4mm×4mmの広域範囲仕上面粗さは、図の2次元粗さ測定結果から、研削方向平行仕上面粗さ

(図中X-profile)は $R_z$ 値で約290.3nm、 $R_a$ 値では、約70.3nmであり、また、研削方向直角仕上面粗さ(図中Y-profile)は、 $R_z$ 値で約880.7nm、 $R_a$ 値では166.6nmとなっていることがわかる。この結果から、広域範囲仕上面粗さにおいても、微小範囲仕上面粗さと同様に、研削方向平行仕上面粗さに比べ、研削方向直角仕上面粗さが極めて大きくなることがわかる。また、3次元的にみた研削仕上面粗さは、 $R_z$ 値で約1210nm、 $R_a$ 値で約174.3nmであり、プランジ研削では、高平滑仕上面、すなわち鏡面を得ることはできないことが確認できる。これは、図の3次元画像からもわかるように、研削時に発生する砥粒切れ刃により生成される条痕溝が原因であると考えられる。

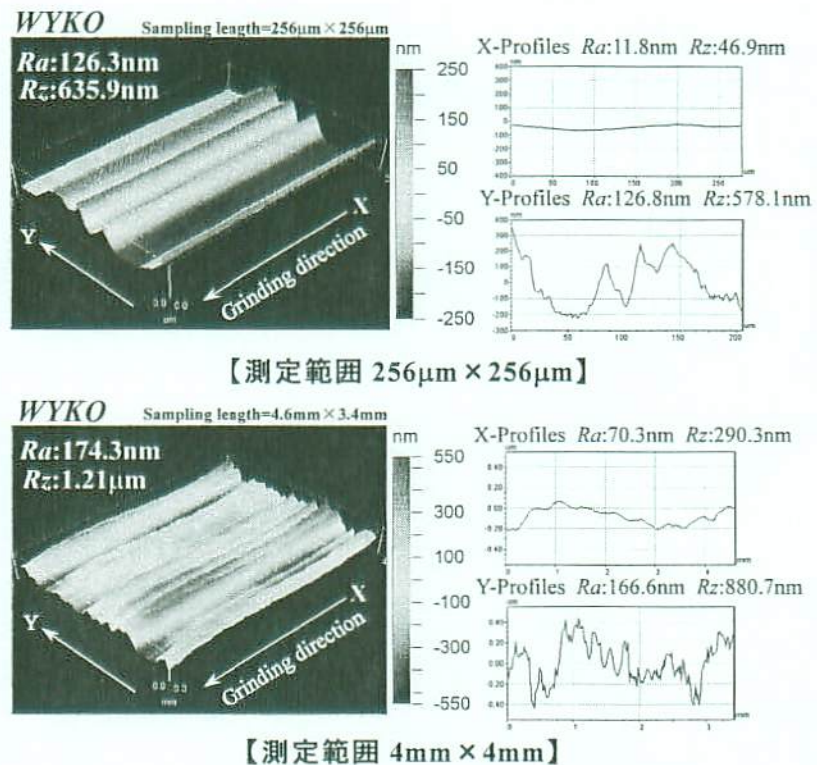
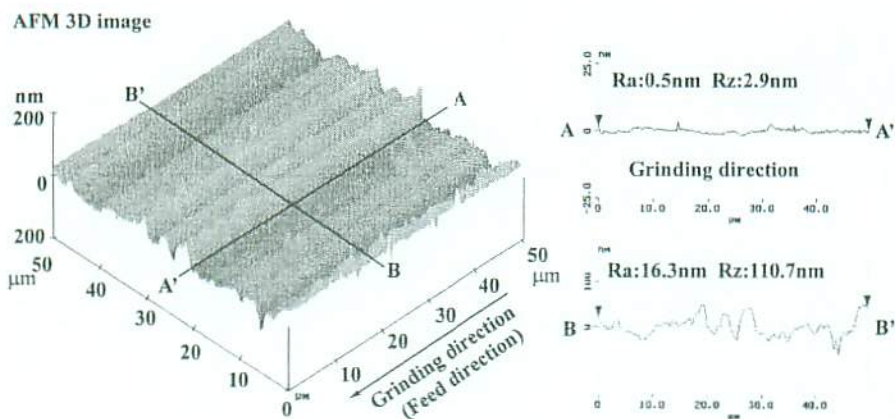


図 3.16 プランジ研削における HPSC の仕上面粗さ  
 [Vg=20m/s, vwp=0.01mm/s, t=5μm]



測定範囲【50 $\mu$ m $\times$ 50 $\mu$ m】

図 3.17 HPSC をプランジ研削した場合の仕上面の AFM 観察結果

[ $V_g=20\text{m/s}$ ,  $v_{wp}=0.01\text{mm/s}$ ,  $t=5\mu\text{m}$ , Soluble type T1 12 l/min]

図3.17に、図3.16に示す、HPSC仕上面を、高解像度の原子間力顕微鏡AFMで、さらに詳細に測定した結果を示す。なお、測定範囲は、50 $\mu\text{m}\times$ 50 $\mu\text{m}$ であり、仕上面に発生する微小穴を反転して示している。図の3次元画像より、仕上面には、深さ100nmから200nm程度の微小穴が点在していることがわかる。この微小穴は、研削により発生した微小クラックもしくは、HPSC自体が持つ気孔ではないかと思われる。しかしながら、この微小穴を含まない2次元仕上面粗さでは、研削方向平行仕上面粗さ(図中A-A'-profile)は、( $R_z$ )2D値で約2.9nm, ( $R_a$ )2D値では、約0.5nmであり、また、研削方向直角仕上面粗さ(図中B-B'-profile)は、( $R_z$ )2D値で約110.7nm, ( $R_a$ )2D値では約16.3nmである。この2次元仕上面粗さの結果からもわかるように、研削方向直角仕上面粗さは、研削方向平行仕上面粗さに比べ、極めて仕上面粗さが大きくなる。このように、50 $\mu\text{m}\times$ 50 $\mu\text{m}$ の極めて微小な測定範囲においても、研削方向直角仕上面粗さには、研削方向平行に発生する研削条痕が影響し、プランジ研削法では、平滑な仕上面が得られ難いことが確認できる。

図3.18に、図3.15に示したプランジ研削法でHPSCを乾式研削および湿式研削した場合の法線研削抵抗 $F_n$ 、接線研削抵抗 $F_t$ および研削抵抗比 $F_t/F_n$ を示す。図より、

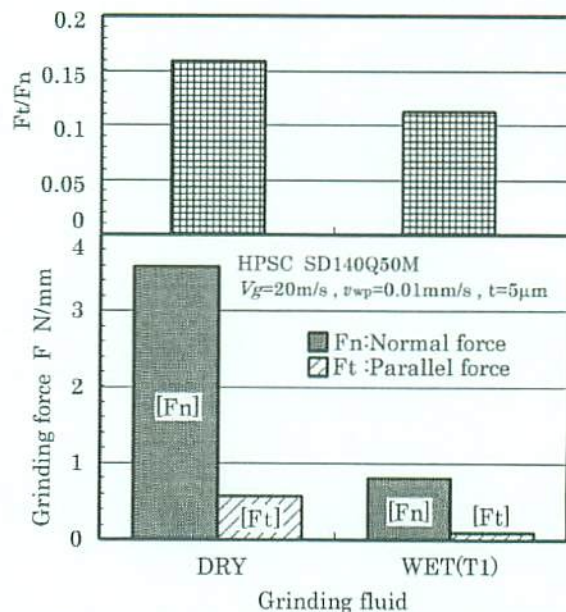


図 3.18 プランジ研削で HPSC を乾式研削および湿式研削した場合の研削抵抗  $F_n$ ,  $F_t$  および研削抵抗比  $F_t/F_n$  の比較

[ $V_g=20\text{m/s}$ ,  $v_{wp}=0.01\text{mm/s}$ ,  $t=5\mu\text{m}$ ]



乾式研削の場合は、湿式研削に比べ、 $F_n$ および $F_t$ ともに大きく、また、研削抵抗比 $F_t/F_n$ も大きな値となっているのがわかる。これは、乾式研削の場合には、研削油剤の冷却作用や潤滑作用が得られないために、研削点温度が極めて高温になり、工作物表面の軟化を伴う加工となっていることが推測できる。通常、工作物表面が軟質の場合には、法線研削抵抗 $F_n$ 、接線研削抵抗 $F_t$ は小さくなると考えられるが、工作物表面が非常に軟化すれば、砥粒切れ刃と工作物の接触面積が大きくなり、結果的に、法線研削抵抗 $F_n$ 、接線研削抵抗 $F_t$ が大きくなるものと考えられる。

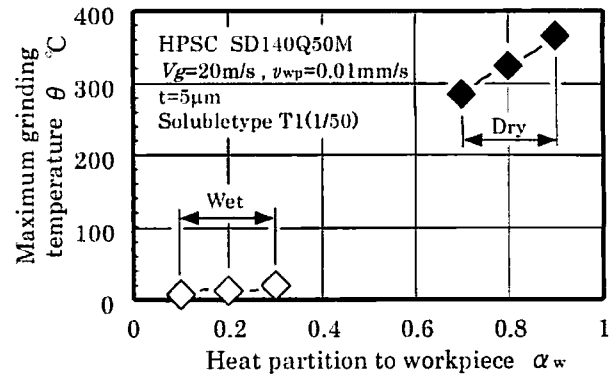


図 3.19 プランジ研削における乾式と湿式の  
工作物熱流入割合と研削点温度の関  
係(HPSC)

[ $V_g=20\text{m/s}$ ,  $v_{wp}=0.01\text{mm/s}$ ,  $t=5\mu\text{m}$ ]

図3.19に、図3.18の接線研削抵抗値 $F_t$ を用いて、プランジ研削でHPSCを乾式研削と湿式研削した場合の砥石研削点最高温度(接触弧内最高温度)を計算した結果を示す。計算は、Jaeger<sup>20)</sup>の移動熱源モデルの適用を検討することを考え、適用するために必要な $L = \frac{v \cdot l_c}{4K_w}$ の値を、本実験条件を用いて算出した。ここで、 $[K_w = k / \rho \cdot c : \text{温度伝達率} (\text{m}^2/\text{s})]$ ,  $[\rho : \text{密度} (\text{kg}/\text{m}^3)]$ ,  $[c : \text{比熱} (\text{J}/\text{kg} \cdot \text{K})]$ ,  $[k : \text{熱伝導率} (\text{J}/\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{K})]$ である。また、 $v$  : 熱源の移動速度は、 $v_{wp}$  : 研削方向平行テーブル速度(m/s)を、 $l_c$  : 移動熱源幅は、 $l_c = \sqrt{D \cdot t}$  ( $D$  : 砥石直径,  $t$  : 設定切込み) : 砥石-工作物接触弧長さを適用している。その結果、 $L$ が非常に小さくなったので、静止熱源状態を想定し、下記の式(1)により計算した。なお、工作物への熱流入割合 $\alpha_w$ は、乾式研削の場合 $\alpha_{w(\text{dry})}$ は、従来の乾式研削温度検討例<sup>21)~23)</sup>を参考にして、0.7, 0.8, 0.9の3種類を、また、湿式研削の場合 $\alpha_{w(\text{wet})}$ は、乾式研削の熱流入割合から湿式研削の熱流入割合を求める安井による考え方<sup>24)</sup>である $\alpha_{w(\text{wet})} = \beta \cdot \alpha_{w(\text{dry})}$ の式を用いて、 $\beta \approx 0.24$ と計算されることから、0.1, 0.2, 0.3で試算してみた。ここで、 $[\beta : \text{発生研削熱の内、工作物側へ熱流入する割合と、工作物側から研削油剤側へ熱流入する割合の比}]$ である。また、単位時間・単位面積当たりの発生研削熱量 $q (\text{J}/\text{m}^2 \cdot \text{s})$ は、接線研削抵抗と砥石周速度の積を接触面積(接触弧長さ×研削幅)で除して求めた。

$$\theta_{\max} = \frac{4qK_w}{\pi k v} (-2.303L \log L + 1.116L) \alpha_w \cdots \cdots (1)$$

また、用いた炭化けい素(HPSC)の密度、比熱、熱伝導率は、それぞれ、 $\rho$ (密度) :  $3230 \text{ kg}/\text{m}^3$ ,  $c$ (比熱) :  $600 \text{ J}/\text{kg} \cdot \text{K}$ ,  $k$ (熱伝導率) :  $100 \text{ J}/\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{K}$ である。

図より，乾式研削の場合には，いずれの熱流入割合でも，研削点温度すなわち接触弧内最大上昇温度は，300℃を超える．一方，湿式研削の場合には，約40℃以下であり，乾式研削に比べ，相当低い温度であるとともに，接触弧内での研削液の遷移沸騰・膜沸騰状態移行前最大温度であるバーンアウト温度(100℃を幾分越えた温度)<sup>25)</sup>よりもはるかに低く，研削油剤の供給効果が確認できる．なお，乾式研削温度は，1000℃にも達しておらず，用いたHPSCの融点(約2600℃)よりも相当低いが，仕上面には，上述のように熔融剥離状態が見られる．これは，融点以上にも達すると推測される砥粒研削点温度が影響していると考えているが，十分な検討はなし得ておらず，今後詳細な検討が必要であると考えられる．

### 3.6.1-2 研削油剤の種類が延性モード研削仕上面に及ぼす影響

図 3.20 に，ソリュブルタイプの主成分が異なる T1，T2，T3 の3種類の研削油剤を50倍に希釈して，テーブル速度  $v_{wp}=0.01\text{mm/s}$  で，HPSC をプランジ研削した場合の仕上面を微分干渉顕微鏡で観察した結果を比較して示す．なお，T1 は図 3.14 の再載である．図より，研削油剤 T1 と T2 では，ほぼ全面が延性モード研削面となっていることがわかる．しかし，SEM 画像より，研削油剤 T2 では，若干微小な脆性破壊痕が点在していることが確認できる．この一方，研削油剤 T3 では，研削仕面上に，大きさが数 $\mu\text{m}$ 以上の脆性破壊痕が発生している．この結果から，研削油剤の組成・成分が延性モード研削仕上面に影響を及ぼすことがわかる．今回の実験では，研削油剤の組成・成分が延性モード研削形態に与える影響の詳細な検討は成し得ておらず，今後詳細な検討が必要であると考えられる

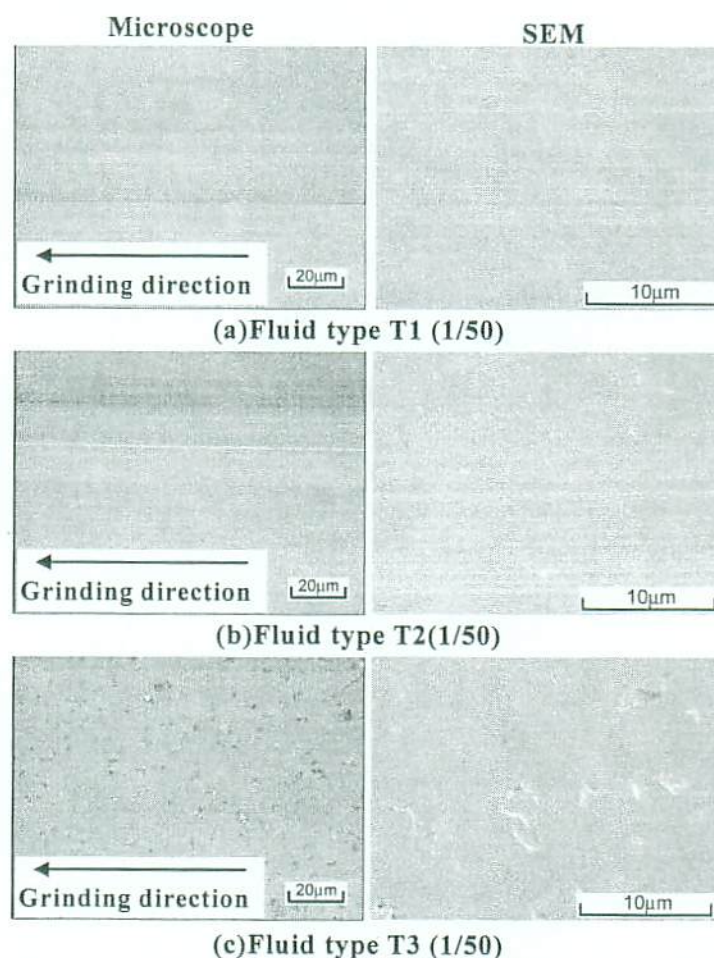


図 3.20 T1, T2, T3 の3種類の研削油剤を50倍に希釈して，HPSC を湿式プランジ研削した場合の HPSC 仕上面の比較  
[ $V_g=20\text{m/s}$ ,  $v_{wp}=0.01\text{mm/s}$ ,  $t=5\mu\text{m}$ ]



が、同希釈倍率の水溶性研削油剤を用いていることから、研削油剤の冷却効果は同等であることが予測できるため、研削油剤の成分の違いによる潤滑作用が影響し、研削点温度が高くなったことにより、3.2.2 に示した延性モード臨界砥粒切込み深さ以上で研削され、仕上面形成モードに差が生じたものと思われる。本実験で得られた結果は、近年、環境対応型研削油剤として急速に普及しているオイルフリータイプの油剤に対し、仕上面性状に及ぼす影響などが検討された論文は極めて少ないため、高平滑研削仕上面に加工し得るための合成潤滑油の種類と使用する研削油剤の指針の参考資料となるものと考えられる。

図 3.21 に、図 3.20 で示した T1, T2, T3 の 3 種類の研削油剤を用いて、湿式プランジ研削を行った場合の法線研削抵抗  $F_n$ 、接線研削抵抗  $F_t$ 、および研削抵抗比  $F_t/F_n$  をまとめて示す。図より、3 種類の研削油剤の研削抵抗を比較すると、研削油剤タイプ T3 が最も高く、次いで T2, T1 の順で低くなっている。図 3.19 で示した、仕上面の観察結果からは、研削油剤タイプ T3 は、研削抵抗が低くなる脆性モード研削状態を示す脆性破壊痕が最も多いにも関わらず、研削油剤タイプ T3 の研削抵抗は低くなっており、脆性破壊状態が強いことの影響は見られない。これは、前述したように、研削油剤 T3 では、研削油剤の潤滑効果が、研削油剤 T1 および T2 よりも低く、研削点温度が上昇し、砥粒切れ刃と工作物の接触面積が大きくなり、結果的に法線研削抵抗が高くなったものと思われる。これは、乾式研削の場合にも、同じようなことが言える。しかしながら、詳細には、今後検討する必要があると考えている。

### 3.6.1-3 工作物速度 $v_{wp}$ が延性モード研削仕上面に及ぼす影響

図 3.22 に、#140 のメタルボンドダイヤモンド砥石を用い、工作物送り速度  $v_{wp}=0.01\text{mm/s}$ ,  $0.05\text{mm/s}$ ,  $0.5\text{mm/s}$ ,  $5\text{mm/s}$  と変化させて HPSC を、T1, T2, T3 の 3 種類の研削油剤を使用した湿式研削を行い、その仕上面を微分干渉顕微鏡と SEM で観察した結果を示す。なお、実験に際しては、本研究に先立つ研究報告から、比較的、延性モード研削が可能になるように、砥石作業面を調整し、また、実験中には、適宜形直し・目直しを行い、

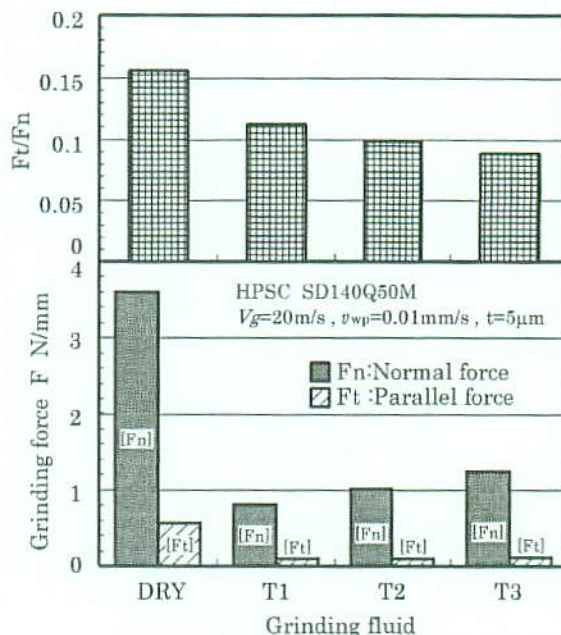


図 3.21 プランジ研削で HPSC を乾式研削および 3 種類の研削油剤を用いた湿式研削した場合の研削抵抗  $F_n$ ,  $F_t$  および研削抵抗比  $F_t/F_n$  の比較 [ $V_g=20\text{m/s}$ ,  $v_{wp}=0.01\text{mm/s}$ ,  $t=5\mu\text{m}$ ]



砥石作業面の定常化に努めている。

図より、いずれの工作物速度  $v_{wp}$  の場合でも仕上面に平滑な延性モード研削面が見られるが、 $v_{wp}=5\text{mm/s}$  の場合には、全面に脆性破壊痕が発生し、微小凹凸面となっている。そして、 $v_{wp}=0.5\text{mm/s}$  の場合には、仕上面に大きさが  $10\mu\text{m}$  以下の脆性破壊痕が見られる。一方、 $v_{wp}=0.05\text{mm/s}$  の場合には、研削油剤 T3 では、仕上面に脆性破壊痕が点在しているが、研削油剤 T1 および T2 では、脆性破壊痕はほとんど見られず、仕上面全面が良好な延性モード研削面となっていることがわかる。

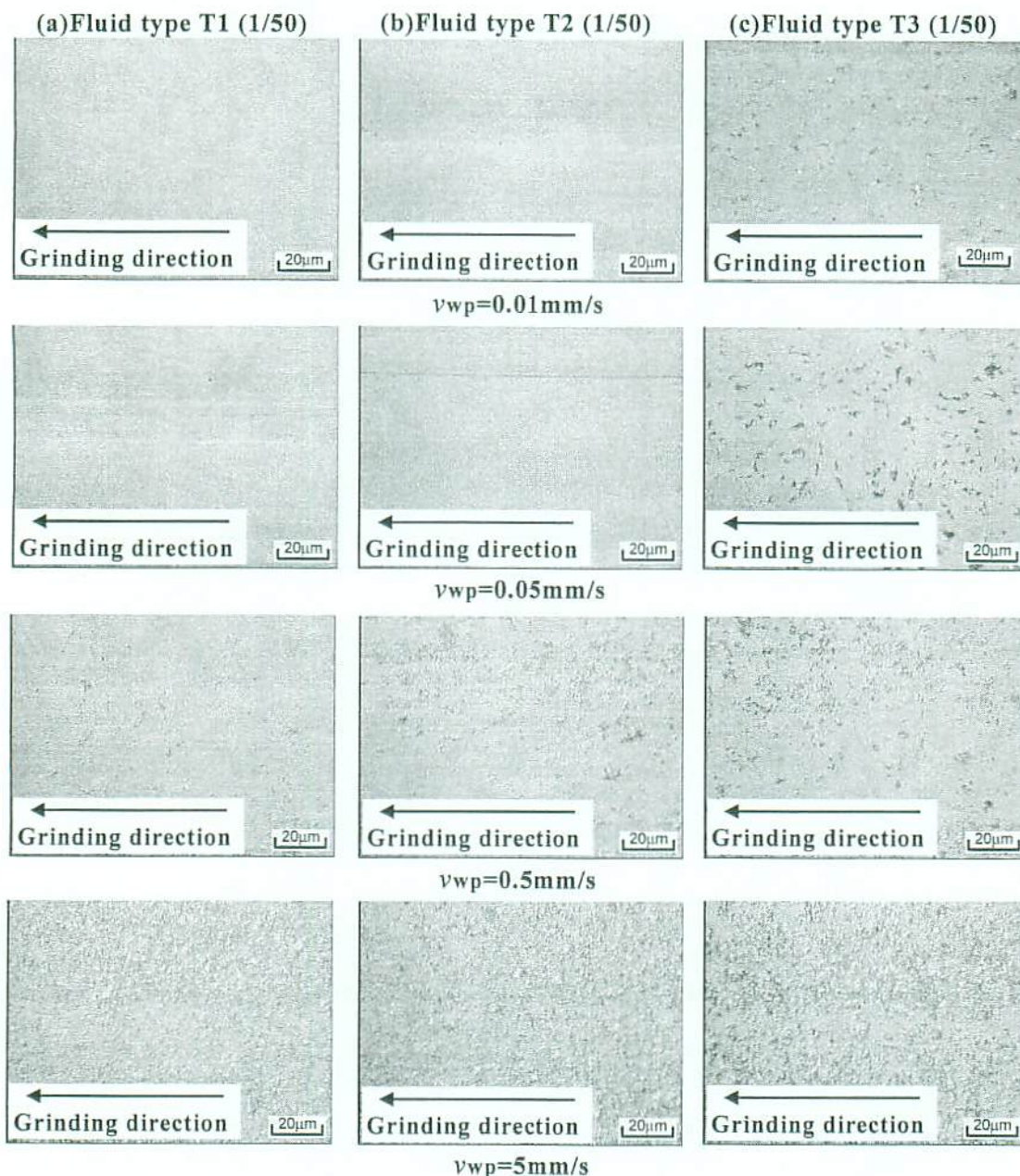


図 3.22 テーブル速度の違いによる HPSC 仕上面の比較  
HPSC  $v_g=20\text{m/s}$ ,  $v_{wp}=0.01\sim5\text{mm/s}$ ,  $t=5\mu\text{m}$  Plunge grinding

また、工作物送り速度  $v_{wp}$  が最も遅い  $v_{wp}=0.01\text{mm/s}$  の場合も、テーブル速度  $v_{wp}=0.05\text{mm/s}$  と同様な結果となっていることがわかる。

この結果から、#140 のメタルボンドダイヤモンド砥石でも、テーブル送り速度  $v_{wp}$  を遅くすることによって、脆性破壊痕の発生を抑制でき、HPSC の延性モード研削は可能であることが確認できた。さらに、同じ研削条件でも、研削油剤の種類により仕上面性状に違いがあり、特に、グリセリンを主体とする研削油剤 T3 の場合には、すべての仕上面で脆性破壊痕が観察され、延性モード研削が得られにくいことがわかった。この原因は、先に述べたように、研削油剤の潤滑効果に起因するものと思われる。そして、アニオン界面活性剤を主体とする研削油剤 T1、およびグリコールと脂肪酸アミン塩を主体とする研削油剤 T2 の場合には、テーブル送り速度を  $v_{wp}=0.01\text{mm/s}$  と  $v_{wp}=0.05\text{mm/s}$  と極めて低速にすることにより良好な延性モード研削仕上面が得られることが確認できたが、 $v_{wp}=0.5\text{mm/s}$  では、研削油剤 T1 と T2 を比較すると、研削油剤 T2 において、脆性破壊痕が多く発生し、研削形態が脆性モードとなっていることがわかる。これにより、研削油剤 T2 では、延性モード臨界砥粒切込み深さ以上で研削されたと推測でき、研削油剤 T1 が最も潤滑効果が優れていると考えられる。しかしながら、延性モード研削が良好に行われた  $v_{wp}=0.01\text{mm/s}$ 、 $v_{wp}=0.05\text{mm/s}$  のいずれの仕上面においても、研削方向に条痕が見られ、プランジ研削法では、平滑な仕上面は得られ難いことがわかる。



### 3.6.2 延性モード研削実験(HIPSN)の場合

図3.23に、プランジ研削でHIPSNを乾式研削した場合と研削油剤T1, T2, T3の50倍希釈液を用いて湿式研削した場合の仕上面を微分干渉顕微鏡とSEMで観察した結果を示す。図より、乾式研削の場合では、金属の研削仕上面と同様な強い延性モード研削状態で形成される大きな盛り上がりに伴う研削条痕が見られる。また、微小凹凸面も相当見られる。一方、湿式研削では、いずれの研削油剤の場合も、乾式研削よりも研削条痕粗さは小さく、滑らかである。先に示した、HPSCの場合と同様、研削油剤の供給により、延性モード高平滑研削仕上面が、より得られ易くなるのがわかる。しかし、図よりわかるように、研削油剤の種類により、発生脆性破壊痕の大きさと数に違いがある。アニオン界面活性剤を主体とする研削油剤T1では、ほぼ全面が延性モード研削面であり、脆性破壊痕はほとんど見られない。この一方、研削油剤グリセリンを主体とするT3では、仕上面に10 $\mu$ m程度の脆性破壊痕が相当発生しており、研削油剤の種類

が、延性モード仕上面の生成に大きな影響を及ぼすのがわかる。また、HIPSNの研削仕上面のSEM画像を見ると、先に示したHPSCの研削仕上面性状と大きく異なることがわかる。HIPSNでは、仕上面に研削熱で熔融したような凹凸が観察できる。特に、研削油剤T2およびT3でこの凹凸は観察でき、HPSCで考察したように、研削油剤T2およ

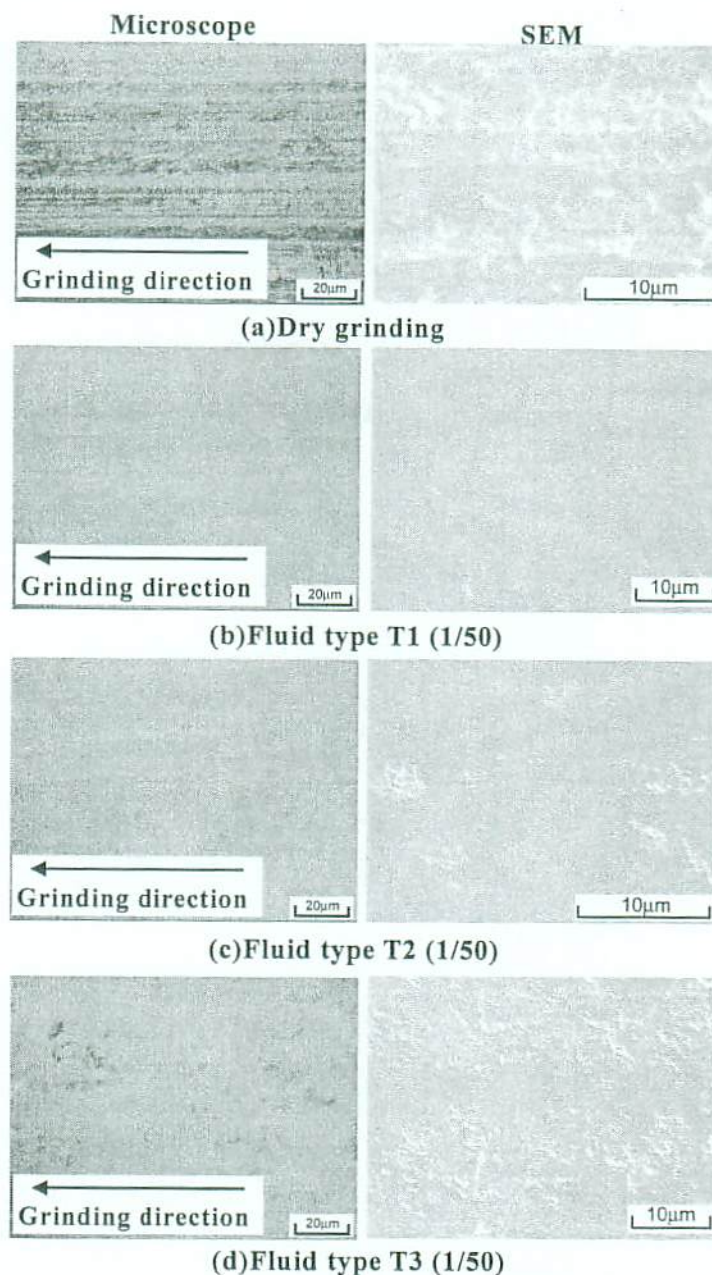


図 3.23 プランジ研削で HIPSN を乾式研削した場合と研削油剤 T1, T2, T3 の 50 倍希釈液を用いて湿式研削した場合の仕上面比較  
[ $V_g=20\text{m/s}$ ,  $v_{wp}=0.01\text{mm/s}$ ,  $t=5\mu\text{m}$   
Soluble type(1/50) 12 l/min]



びT3は、研削油剤T1に比べ、潤滑効果が低いと考えられ、研削油剤T2およびT3では、非常に研削点温度が上昇し、過酷な研削状態になっていることが予測される。また、このような現象には、HIPSNの熱伝導率が低く、研削熱が溜まりやすいことも影響しているものと思われる。また、HPSCの結果と同様に、全ての仕上面において、研削方向に条痕が見られ、プランジ研削では、高平滑な仕上面は得られ難いことが確認できる。

図3.24に、図3.23で示したプランジ研削でHIPSNを乾式と上述の3種類の研削油剤を用いた湿式で研削した場合の法線研削抵抗 $F_n$ 、接線研削抵抗 $F_t$ および研削抵抗比 $F_t/F_n$ を示す。

なお、参考のため、図3.20で示したHPSCの乾式研削と研削油剤T1を用いた湿式研削の研削抵抗 $F_n$ 、 $F_t$ と研削抵抗比 $F_t/F_n$ も示す。図より、HIPSNの乾式研削の場合は、湿式研削に比べ、法線研削抵抗 $F_n$ および接線研削抵抗 $F_t$ ともに極めて大きな値となる。乾式研削抵抗が大きくなるのは、後述(図3.24)するように、乾式研削では研削温度が高くなるため、仕上面の大きな軟化が生じる結果、極めて強い延性研削モード状態になり、砥石-工作物接触領域内の砥粒切れ刃と工作物の総接触面積が、湿式研削に比較して大きくなることによるものと推測される。次いで、HIPSNとHPSCの乾式および湿式の法線、接線研削抵抗 $F_n$ 、 $F_t$ を比較すると、いずれの場合も、HIPSNの方が非常に大きい。HPSCの硬度は、HIPSNよりも高く(表3.2参照)、砥石-工作物接触領域内の切れ刃と工作物との接触状態が同じなら、法線、接線研削抵抗 $F_n$ 、 $F_t$ はHPSCの方が高くなることを考慮すると、HIPSNの法線、接線研削抵抗 $F_n$ 、 $F_t$ が大きくなるのは、後述するように、研削温度が高く、工作物表面軟化が大きくなり、切れ刃と工作物との総接触面積が、HPSCの場合よりも相当大きくなることが影響しているものと考えられる。さらに、HIPSN研削における各研削油剤の法線研削抵抗 $F_n$ を比較すると、研削油剤タイプT1が幾分か高く、次いでT2、T3の順で低くなっている。一方、研削抵抗比は、逆に、T1、T2、T3の順で高くなる傾向を示す。図3.20で示したHPSCの湿式研削抵抗 $F_n$ 、 $F_t$ は、HIPSNの約1/8程度であるが、この逆で、T1、T2、T3の順で高くなり、研削油剤の潤滑効果の影響が大きいものと考えられた。なお、そのHPSCの場合において、 $F_t/F_n$

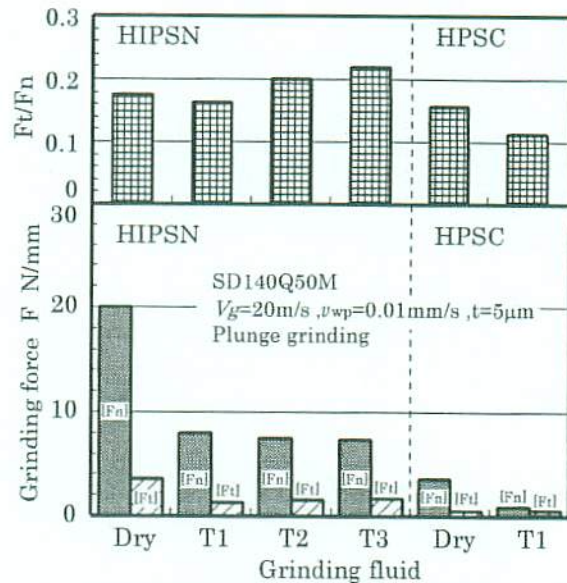


図 3.24 プランジ研削法で HIPSN を乾式研削および T1, T2, T3 の 3 種類の研削油剤を用いた湿式研削した場合の研削抵抗  $F_n$ 、 $F_t$  および研削抵抗比  $F_t/F_n$  の比較  
[ $V_g=20\text{m/s}$ ,  $v_{wp}=0.01\text{mm/s}$ ,  $t=5\mu\text{m}$   
Soluble type(1/50) 12 l/min]



がT1, T2, T3の順で小さくなったが、それは、潤滑効果よりも、脆性破壊痕が増加することによる接線研削抵抗 $F_t$ の減少と考えられた。これに対して、HIPSNの場合は、図3.22の仕上面の観察結果から、研削油剤T1の場合は、仕上面全面が破壊の少ないほぼ延性モード研削状態である。研削油剤タイプT2では、T1の場合と比較すると、仕上面に脆性破壊が幾分か発生し、研削油剤T3では、相当多数の脆性破壊痕が発生する。このことに加えて、研削抵抗比 $F_t/F_n$ が研削油剤T1, T2, T3の順で高くなっていることを考慮すると、研削油剤T1, T2, T3の順で法線研削抵抗 $F_n$ が低くなるのには、法線研削抵抗 $F_n$ を低くする脆性モード研削状態の強さが影響していると考えられる。

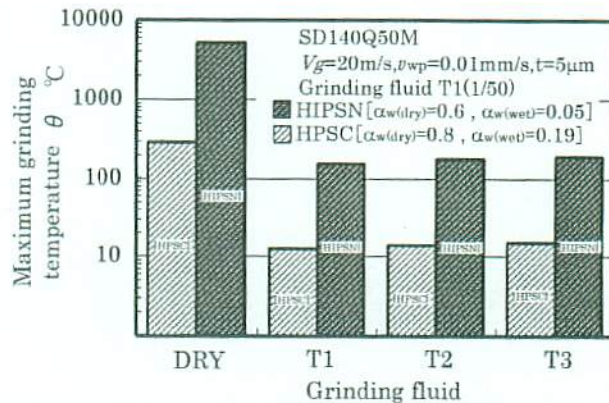


図 3.25 プランジ研削法で HIPS を乾式研削および T1, T2, T3 の 3 種類の研削油剤を用いた湿式研削した場合の砥石研削点温度の算出結果

[ $V_g=20\text{m/s}$ ,  $v_{wp}=0.01\text{mm/s}$ ,  $t=5\mu\text{m}$   
Soluble type(1/50) 12 l/min]

図3.25に、図3.24の接線研削抵抗 $F_t$ を用いて、プランジ研削でHIPSとHPSCを乾式と研削油剤T1, T2, T3の50倍希釈液を用いた湿式で研削した場合の砥石研削点最高温度(接触孤内最高温度)を、HPSCと同様に、下記(1)式により試算した結果を示す。工作物への熱流入割合は、乾式研削の場合は、前述した図3.18におけるHPSCでは、 $\alpha_{w(dry)}=0.7, 0.8, 0.9$ の3種類を用いたが、ここでは、一例として、 $\alpha_{w(dry)}=0.8$ (HPSC)を、また、HIPSの場合は、熱伝導率がHPSCの約1/4と非常に低いことを考慮して $\alpha_{w(dry)}=0.6$ (HIPS)を用いた。一方、湿式研削の場合は、過去の文献より、安井<sup>4)</sup>の考え方である  $\alpha_{w(wet)} = \beta \cdot \alpha_{w(dry)}$  の式を用いた。なお、 $\beta$ は、発生研削熱が乾式研削で生じるとした場合の工作物側への熱流入割合に対する湿式研削での工作物側から研削油剤側への熱流入割合の比である。上記の式より、HIPSとHPSCの $\beta$ は、それぞれ、 $\beta \approx 0.08$ (HIPS)と $\beta \approx 0.24$ (HPSC)と計算されることから、 $\alpha_{w(wet)}=0.05$ (HIPS)と $\alpha_{w(wet)}=0.19$ (HPSC)で試算してみた。

$$\theta_{\max} = \frac{4qKw}{\pi kv} (-2.303L \log L + 1.116L) \alpha_w \cdots \cdots (1)$$

上式の計算で用いた、HIPSの密度 $\rho$ 、比熱 $c$ 、熱伝導率 $k$ は、それぞれ、 $\rho: 3300\text{kg/m}^3$ ,  $c: 680\text{J/kg}\cdot\text{K}$ ,  $k: 25.4\text{J/m}\cdot\text{s}\cdot\text{K}$ を、また、HPSCの場合は、前報で示した値を用いた。図より、HIPSの乾式研削の研削点温度は、HPSCに比較して非常に高く、その融点(1900°C)をはるかに上回る5000°C近くに達する。図3.22で示した、乾式研削で見られる金属の場合と同様な研削条痕や微小凹凸面の形成は、非常に大きな研削温度上昇によ

る表面層の軟化および溶融剥離で生じたものと思われる。一方、湿式研削の場合においては、HPSCの場合よりも高いが、約150℃前後であり、乾式研削に比べ非常に低い温度であり、セラミックの軟化が極めて小さくなるため、良好な延性モード研削が行われるものと推察される。



### 3.6.3 高平滑延性モード研削実験( $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Tic}$ の場合)

図3.26に、プランジカット研削で $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Tic}$ を乾式研削した場合と研削油剤T1, T2, T3の50倍希釈液を用いて湿式研削した場合の仕上面を微分干渉顕微鏡およびSEMで観察した結果を比較して示す。図より、乾式研削の場合では、仕上面全体に脆性破壊が発生し、延性モード研削面はほとんど見られない。一方、研削油剤T1を用いた湿式研削では、仕上面に微小な脆性破壊痕が点在しているが、ほぼ全面が延性モード研削面となっている。これより、 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Tic}$ の場合でも、研削油剤を供給することにより、良好な延性モード研削仕上面が得られやすくなることがわかる。しかしながら、研削油剤T2およびT3を用いた湿式研削では、仕上面の大部分に脆性破壊痕が多く発生しており、研削油剤の種類が、延性モード研削仕上面に大きな影響を及ぼすことがわかる。また、SEM画像より、 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Tic}$ の研削仕上面は、先に示したHPSC、およびHIPSINの仕上面と比較すると、同じ研削条件に関わらず、最も脆性破壊痕が多く発生し、研削油剤T3の仕上面では、熱的に熔融したような仕上面性状になっていることがわかる。これは、 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Tic}$ は、HPSC、およびHIPSINと比較し、最も熱伝導率が低く、研削熱が工作物表面に溜まりやすくなることに起因するものと思われる。

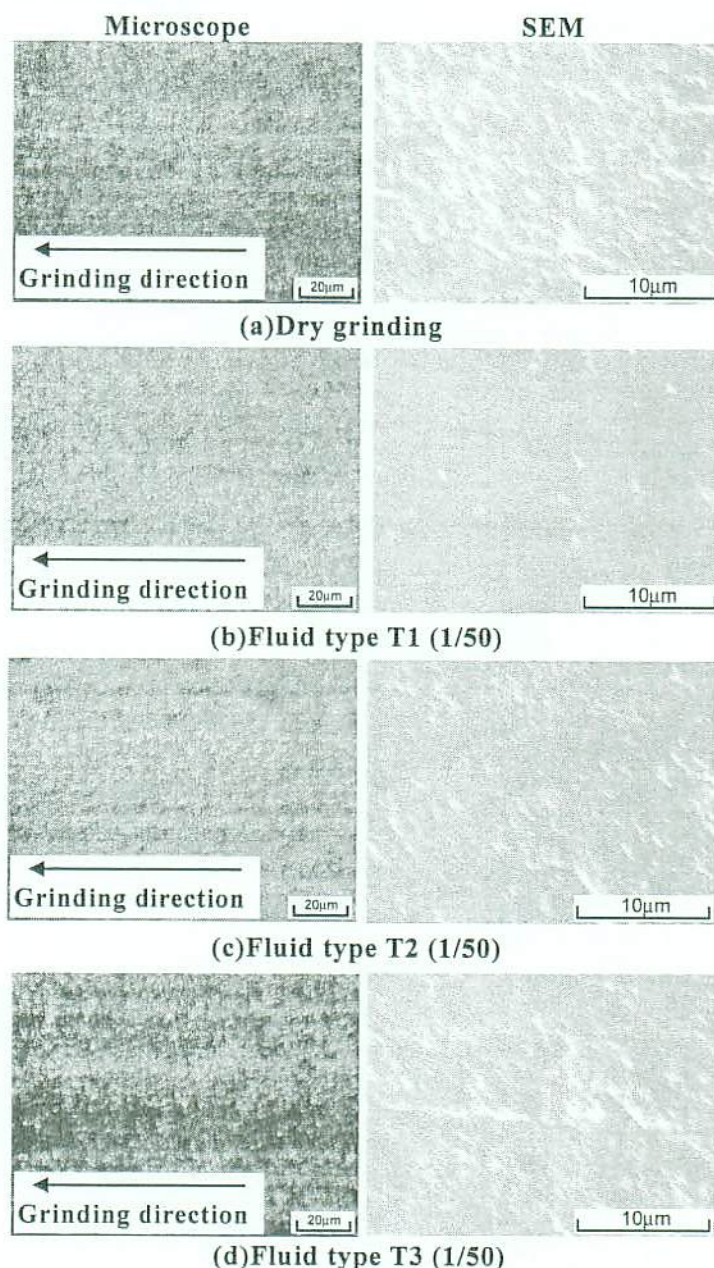


図 3.26 プランジ研削で  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Tic}$  を乾式研削した場合と研削油剤 T1, T2, T3 の 50 倍希釈液を用いて湿式研削した場合の仕上面比較  
 $[V_g=20\text{m/s}, v_{wp}=0.01\text{mm/s}, t=5\mu\text{m}]$   
 Soluble type(1/50) 12 l/min]



図3.27に、図3.26に示すプランジカット研削で $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Tic}$ を乾式研削および湿式研削した場合の法線研削抵抗 $F_n$ 、接線研削抵抗 $F_t$ および研削抵抗比 $F_t/F_n$ を示す。なお、参考のため、図3.20および図3.23で示したHPSC、およびHIPSNの研削油剤T1を用いた湿式研削の法線研削抵抗 $F_n$ 、接線研削抵抗 $F_t$ を比較して示す。図より、 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Tic}$ の乾式研削と湿式研削の法線研削抵抗 $F_n$ 、接線研削抵抗 $F_t$ をそれぞれ比較すると、乾式研削の方が湿式研削に比べ、約5倍程度大きくなっていることがわかる。このように乾式研削における法線研削抵抗 $F_n$ 、接線研削抵抗 $F_t$ が大きくなる

のは、前述したHPSCおよびHIPSNと同様に、研削温度が高くなるため、仕上面の大きな軟化が生じる結果、極めて強い延性研削モード状態になり、砥粒切れ刃と工作物の接触面積が、湿式研削に比べ大きくなることによるものと考えられる。

次に、各種ファインセラミック $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Tic}$ 、HPSC、HIPSNの研削油剤T1における研削抵抗 $F_n$ 、 $F_t$ を比較すると、 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Tic}$ とHPSCは、ほぼ同等であり、HIPSNは、 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Tic}$ とHPSCと比べ、極めて高くなることがわかる。表3.2に示した材料特性から考察すると、法線研削抵抗 $F_n$ は、基本的には、材料硬度に比例すると考えられる。しかしながら、上記のように、HPSCと $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Tic}$ は、ほぼ同じ法線研削抵抗 $F_n$ で、HIPSNでは、極めて高い法線研削抵抗 $F_n$ 値になっており、材料硬度の影響はほとんど見られない。これは、研削形態の差によるものと考えられ、HIPSNでは、熱伝導率が低く、熱膨張係数が幾分高いため、工作物表面が膨張・軟化し、砥粒切れ刃と工作物の接触面積がおおきくなることにより、法線研削抵抗 $F_n$ 値が高くなる。そして、 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Tic}$ では、熱伝導率は、最も低いものの、熱膨張係数が極めて低いため、適切な研削油剤の供給ができれば、工作物表面は膨張せず、延性モード臨界切込み深さ以下で良好に研削が行われるものと思われる。

また、3種類のオイルフリータイプ研削油剤を用いた湿式研削の法線研削抵抗 $F_n$ と接線研削抵抗 $F_t$ を比較すると、研削油剤タイプT1が最も低く、次いでT2、T3の順で高くなっていることがわかる。そして、研削抵抗比 $F_t/F_n$ では、上記の逆であり、研削油剤タイプT1が最も高く、次いでT2、T3の順で低くなっている。この傾向は、図3.19で

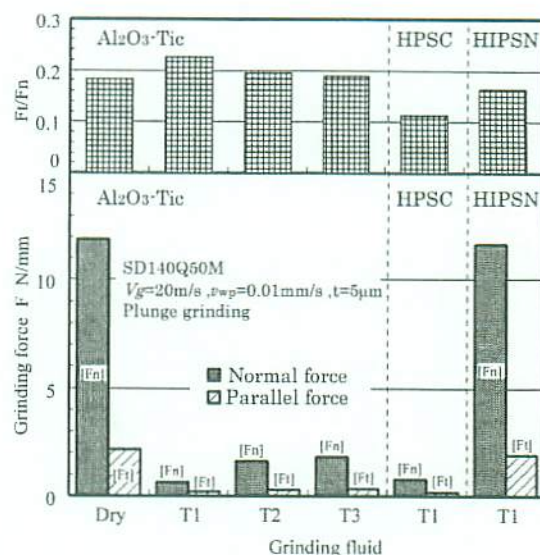


図 3.27 プランジ研削法で  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Tic}$  を乾式研削および T1, T2, T3 の 3 種類の研削油剤を用いた湿式研削した場合の研削抵抗  $F_n$ ,  $F_t$  および研削抵抗比  $F_t/F_n$  の比較  
[ $V_g=20\text{m/s}$ ,  $v_{wp}=0.01\text{mm/s}$ ,  $t=5\mu\text{m}$   
Soluble type(1/50) 12 l/min]



示したHPSCの場合と同様である。また、HPSCとAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Ticでは、湿式研削における法線研削抵抗F<sub>n</sub>と接線研削抵抗F<sub>t</sub>はほぼ同じ大きさになっており、研削油剤T3の場合に、研削仕上面に脆性破壊痕が多く発生し、加工形態が脆性モードとなっているにも関わらず、研削油剤T1に比べ、法線研削抵抗F<sub>n</sub>と接線研削抵抗F<sub>t</sub>が大きくなるのは、HPSCと同様に、研削油剤の潤滑効果が大きく影響しているものと考えられる。そして、この結果より、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Ticにおいても、アニオン界面活性剤を主体とする研削油剤T1を用いることにより、比較的良好な延性モード研削が得られることが確認できる。

図3.28に、図3.27の接線研削抵抗F<sub>t</sub>を用いて、プランジカット研削でAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Ticを乾式研削と湿式研削した場合の砥石研削点最高温度(接触弧内最高温度)を、これまでと同様、下記(1)式により試算した結果を示す。なお、図には、参考のために、これまでに求めたHPSC、およびHIPSINの場合も比較のために示した。工作物への熱流入割合は、HPSCでは、 $\alpha_{w(dry)}=0.8$ (HPSC)を、また、HIPSINの場合は、熱伝導率がHPSCの約1/4と非常に低いことを考慮して $\alpha_{w(dry)}=0.6$ (HIPSIN)を用いた。そして、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Ticの場合には、HIPSINと熱伝導率がほぼ同じであることを考慮し、 $\alpha_{w(dry)}=0.6$ (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Tic)としている。一方、湿式研削の場合は、過去の文献より、安井の考え方である $\alpha_{w(wet)} = \beta \cdot \alpha_{w(dry)}$ の式を用いた。ここで、 $\beta$ は、発生研削熱が乾式研削で生じるとした場合の工作物側への熱流入割合に対する湿式研削での工作物側から研削油剤側への熱流入割合の比である。上記の式より、HPSC、HIPSIN、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Ticの $\beta$ は、それぞれ、 $\beta \approx 0.24$ (HPSC)、 $\beta \approx 0.08$ (HIPSIN)および、 $\beta \approx 0.07$ (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Tic)と計算されることから、 $\alpha_{w(wet)}=0.19$ (HPSC)、 $\alpha_{w(wet)}=0.05$ (HIPSIN)、 $\alpha_{w(wet)}=0.04$ (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Tic)で試算してみた。

$$\theta_{\max} = \frac{4qKw}{\pi kv} (-2.303L \log L + 1.116L) \alpha_w \cdots \cdots (1)$$

なお、上式の計算で用いた、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Ticの密度 $\rho$ 、比熱 $c$ 、熱伝導率 $k$ は、それぞれ、 $\rho : 4240 \text{ kg/m}^3$ 、 $c : 900 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$ 、 $k : 21 \text{ J/m} \cdot \text{s} \cdot \text{K}$ である。

図より、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Ticにおける乾式研削では、約3000℃となっているが、湿式研削の場合には、約100℃以下であり、接触弧内での研削液の遷移沸騰・膜沸騰状態移行前最大温度であるバーンアウト温度(100℃を幾分越えた温度)に達しておらず、研削油剤の

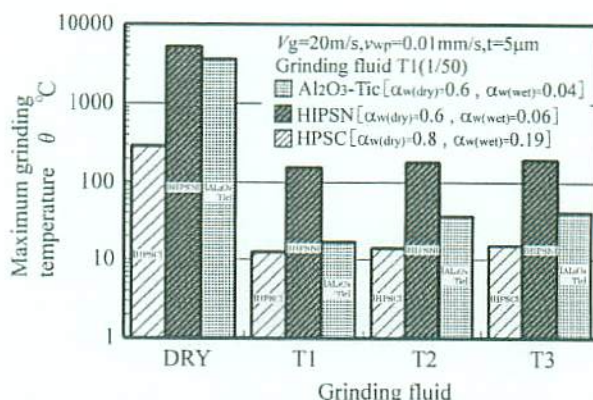


図 3.28 プランジ研削法で Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Tic を乾式研削および T1, T2, T3 の 3 種類の研削油剤を用いた湿式研削した場合の砥石研削点温度の算出結果

[ $V_g=20 \text{ m/s}$ ,  $v_{wp}=0.01 \text{ mm/s}$ ,  $t=5 \mu\text{m}$   
Soluble type(1/50) 12 l/min]



供給効果が確認できる。

次に、それぞれのセラミックにおける乾式研削と湿式研削の研削点温度の温度差(湿式研削の研削点温度/乾式研削の研削点温度)を比較すると、HPSC では約 1/19, HIPSN では 1/8,  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Tic}$  では約 1/44 となっており、 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Tic}$  は、HPSC および HIPSN に比べて、最も研削油剤の供給効果が大きいことがわかる。これは、材料特性である熱伝導率の差によるものと考えられる。

### 3.6.4 高平滑延性モード研削実験(ガラス)の場合

図3.29に、プランジ研削でガラスを乾式研削した場合と研削油剤T1, T2, T3の50倍希釈液を用いて湿式研削した場合の仕上面を微分干渉顕微鏡とSEMで観察した結果を示す。図より、いずれの仕上面においても、研削方向に研削条痕が観察でき、プランジ研削法では、平滑な仕上面は得られないことが確認できる。そして、乾式研削の場合では、研削点温度が極めて高温になったと思われるような仕上面表面が軟化した状態になっており、融解したガラスが凝着し、大きな凹凸面となっていることがわかる。一方、湿式研削の場合では、いずれの研削油剤の場合も、仕上面には良好な延性モード研削面が観察できる。これにより、これまでの各種ファインセラミックの場合と同様、ガラスにおいても研削油剤の供給により、延性モード高平滑研削仕上面が、より得られ易くなるのがわかる。しかしながら、研削油剤の種類により、点在する脆性破壊痕の大きさと数に違いがあり、研削油剤T1では、ほぼ全面が延性モード研削面であり、脆性破壊痕はほとんど見られない。この一方、研削油剤T2では、仕上面に5 $\mu$ m程度の脆性破壊痕が幾分発生しており、研削油剤T3では、仕上面の大部分に相当点在している。この結果から、研削油剤の組成・成分が、ガラスの延性モード仕上面の生成に大きな影響を及ぼすのが確認できる。これは、先のファインセラミックでも

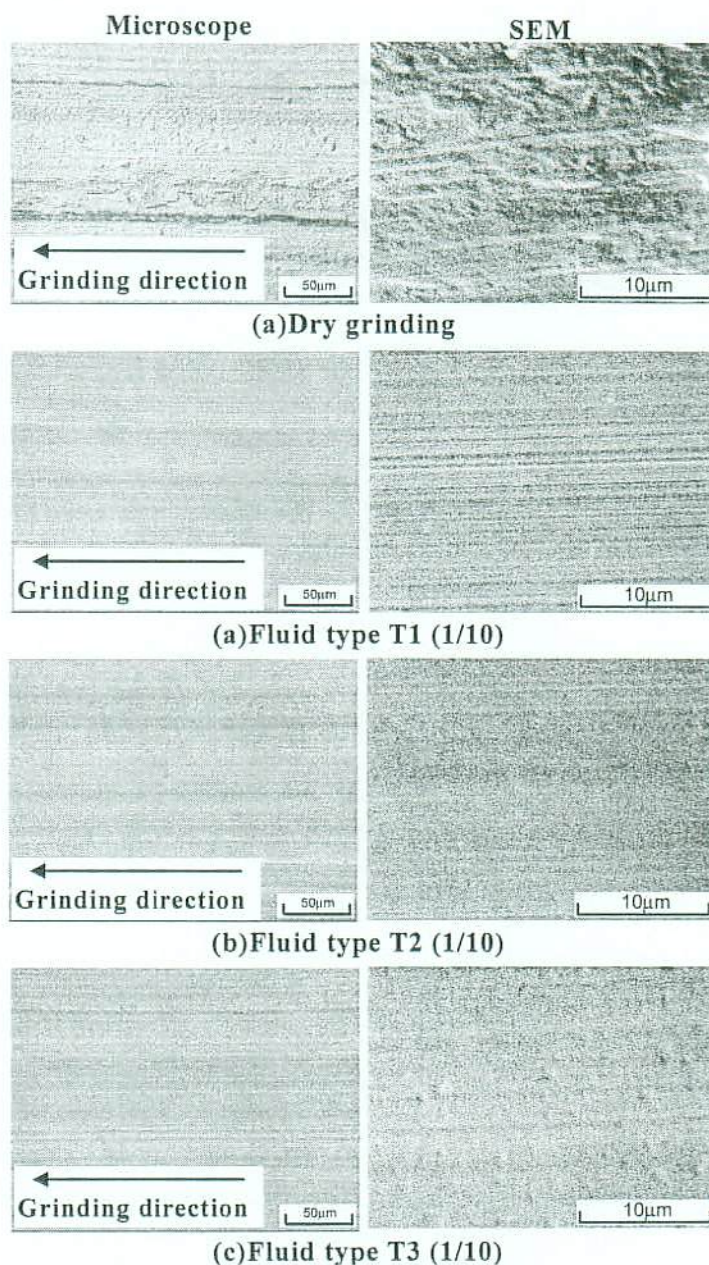


図 3.29 プランジ研削でガラスを乾式研削した場合と研削油剤 T1, T2, T3 の 10 倍希釈液を用いて湿式研削した場合の仕上面比較

[ $V_g=12\text{m/s}$ ,  $v_{wp}=0.01\text{mm/s}$ ,  $t=5\mu\text{m}$

Soluble type(1/10) 12 l/min]

この結果から、研削油剤の組成・成分が、ガラスの延性モード仕上面の生成に大きな影響を及ぼすのが確認できる。これは、先のファインセラミックでも



考察したように、同希釈倍率の水溶性研削油剤を用いていることから、研削油剤の冷却効果は同等であることが予測できるため、研削油剤の成分の違いによる潤滑作用が影響し、研削点温度が高くなったことにより、延性モード臨界砥粒切込み深さ以上で研削され、仕上面形成モードに差が生じたものと思われる。

図 3.30 に、プランジ研削法でガラスを乾式研削および湿式研削した場合の法線研削抵抗  $F_n$ 、接線研削抵抗  $F_t$  および研削抵抗比  $F_t/F_n$  を示す。図より、乾式研削の場合は、湿式研削に比べ、 $F_n$  および  $F_t$  ともに大きく、また、研削抵抗比  $F_t/F_n$  も大きな値となっているのがわかる。また、各研削油剤を用いた湿式研削の場合を見ると、法線研削抵抗  $F_n$  は、研削油剤 T1 が最も低く、研削油剤 T2, T3 の順に高くなることがわかる。図 3.16 で示した仕上面観察写真では、研削油剤 T1 は、良好な延性モード研削形態であり、研削油剤 T3 は、延性モード研削面に脆性破壊痕が多数点在し、法線研削抵抗が小さくなる延性・脆性モード遷移点での研削となる。しかし、前述したように、法線抵抗値  $F_n$  は、研削油剤 T3 が最も大きくなっており、脆性破壊痕が発生する影響が見られない。これは、研削油剤 T3 では、研削油剤 T1 に比べ、研削油の潤滑効果が悪く、結果的に研削点温度が上昇し、砥粒切れ刃と工作物との接触面積が増加した結果、研削油剤 T3 における法線研削抵抗  $F_n$  が高くなったものと考えられる。また、研削抵抗比  $F_t/F_n$  では、研削油剤 T1 が最も高く、T2, T3 の順で低くなることがわかる。これは、図 3.26 で示した研削仕上面観察結果から、研削油剤 T1 では、良好な延性モード研削仕上面となっており、この延性モード研削形態による接線研削抵抗  $F_t$  の増加によるものであると推察される。また、これらの傾向は、前述した、HPSC および  $Al_2O_3$ -Tic の結果と同様であることから、ガラスの延性モード研削においても、研削油剤の潤滑効果が非常に大きな影響を与えるものと考えられる。

図 3.31 に、図 3.30 の接線研削抵抗  $F_t$  を用いて、プランジカット研削でガラスを乾式研削と湿式研削した場合の砥石研削点最高温度(接触弧内最高温度)を、これまでと同様、下記(1)式により試算した結果を示す。なお、図には、参考のために、これまでに求めた HPSC, HIPSIN および  $Al_2O_3$ -Tic の場合も比較のために示した。工作物への熱流入割

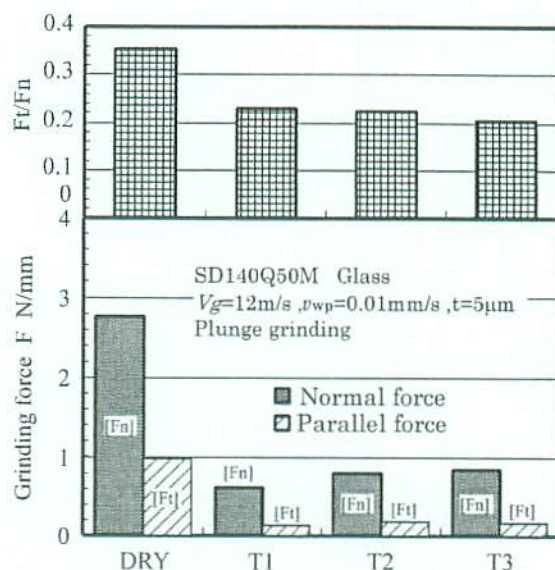


図 3.30 プランジ研削法で Glass を乾式研削および T1, T2, T3 の 3 種類の研削油剤を用いた湿式研削した場合の研削抵抗  $F_n$ ,  $F_t$  および研削抵抗比  $F_t/F_n$  の比較  
 $[V_g=12\text{m/s}, v_{wp}=0.01\text{mm/s}, t=5\mu\text{m}]$   
 Soluble type(1/50) 12 l/min]



合は、HPSCでは、 $\alpha_{w(dry)}=0.8$ (HPSC)を、HIPSINの場合は、熱伝導率がHPSCの約1/4と非常に低いことを考慮して $\alpha_{w(dry)}=0.6$ (HIPSIN)を用いた。また、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Ticの場合には、HIPSINと熱伝導率がほぼ同じであることを考慮し、 $\alpha_{w(dry)}=0.6$ (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Tic)としている。そして、ガラスの場合には、HIPSINおよびAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Ticよりも、さらに熱伝導率が約1/12と低いことから、 $\alpha_{w(dry)}=0.4$ (ガラス)とした。一方、湿式研削の場合は、過去の文献より、安井<sup>4)</sup>の考え方である  $\alpha_{w(wet)} = \beta \cdot \alpha_{w(dry)}$  の

式を用いた。ここで、 $\beta$ は、発生研削熱が乾式研削で生じるとした場合の工作物側への熱流入割合に対する湿式研削での工作物側から研削油剤側への熱流入割合の比である。

上記の式より、HPSC、HIPSIN、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Tic、ガラスの $\beta$ は、それぞれ、 $\beta \approx 0.24$ (HPSC)、 $\beta \approx 0.08$ (HIPSIN)、 $\beta \approx 0.07$ (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Tic)および、 $\beta \approx 0.008$ (ガラス)と計算されることから、 $\alpha_{w(wet)}=0.19$ (HPSC)、 $\alpha_{w(wet)}=0.05$ (HIPSIN)、 $\alpha_{w(wet)}=0.04$ (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Tic)、 $\alpha_{w(wet)}=0.003$ (ガラス)で試算してみた。

$$\theta_{max} = \frac{4qKw}{\pi kv} (-2.303L \log L + 1.116L) \alpha_w \cdots \cdots (1)$$

なお、上式の計算で用いた、ガラスの密度 $\rho$ 、比熱 $c$ 、熱伝導率 $k$ は、それぞれ、 $\rho : 2550 \text{ kg/m}^3$ 、 $c : 879 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$ 、 $k : 1.7 \text{ J/m} \cdot \text{s} \cdot \text{K}$ である。

図より、まず、乾式研削における研削温度を見ると、約10000℃に達しており、HPSC、HIPSIN、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Ticよりも非常に高温になっていることがわかる。これは、表3.2の工作物機械特性表で示したように、ガラスは各種ファインセラミックよりも、熱伝導率が極めて低く、研削加工時において、工作物表面に熱が溜まりやすくなるものであると考えられる。さらに、この研削熱により、工作物が熱膨張し、砥粒切込み深さが、湿式研削よりも極めて大きくなり、結果的に、図3.30で示した研削抵抗 $F_n$ 、 $F_t$ も大きくなるものと思われる。

次に、湿式研削の場合には、研削点温度が、いずれの研削油剤の場合でも100℃以下であり、接触弧内での研削液の遷移沸騰・膜沸騰状態移行前最大温度であるバーンアウト温度(100℃を幾分越えた温度)に達しておらず、研削油剤の供給効果が確認できる。また、それぞれのファインセラミックにおける乾式研削と湿式研削の研削点温度の温

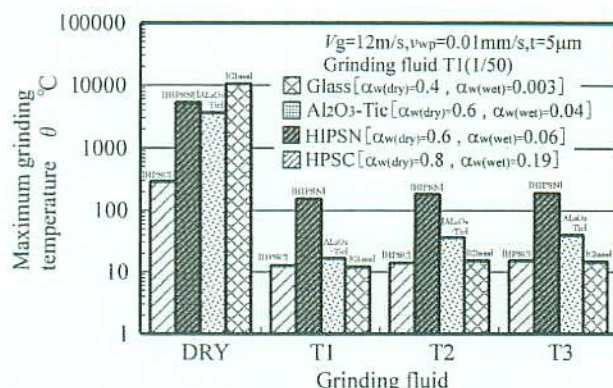


図 3.30 プランジ研削法でガラスを乾式研削および T1、T2、T3 の 3 種類の研削油剤を用いた湿式研削した場合の砥石研削点温度の算出結果  
[ $V_g=12 \text{ m/s}$ ,  $v_{wp}=0.01 \text{ mm/s}$ ,  $t=5 \mu\text{m}$   
Soluble type(1/50) 12 l/min]



度差(湿式研削の研削点温度/乾式研削の研削点温度)を比較すると、約 1/850 と極めて小さくなることから、ガラスは、前述した各種ファインセラミック HPSC, HIPSN,  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Tic}$  に比べ、研削油剤の供給効果が大きいと言える。これは、材料特性に起因するものと考えられ、ガラスの場合には、ファインセラミックに比べ、熱伝導率および熱膨張率が極めて低く、研削油剤の適切な供給ができれば、研削時における工作物の熱膨張を抑制でき、良好な研削形態になるものと思われる。

図 3.32 に、#140 のメタルボンドダイヤモンド砥石を用い、工作物送り速度  $v_{wp}=0.01\text{mm/s}$ ,  $0.05\text{mm/s}$ ,  $0.1\text{mm/s}$ ,  $0.5\text{mm/s}$ , および  $1\text{mm/s}$ , と変化させてガラスを湿式研削し、その仕上面を微分干渉顕微鏡と SEM で観察した結果を示す。図より、いずれのテーブル速度の場合でも仕上面に平滑な延性モード研削面が見られるが、 $v_{wp}=1\text{mm/s}$  の場合には、ほぼ全面に脆性破壊痕が発生し、微小凹凸面となっている。そして、 $v_{wp}=0.05\text{mm/s}$  や  $0.1\text{mm/s}$  の場合には、その表面に大きさが  $10\mu\text{m}$  以下の脆性破壊痕が見られる。一方、テーブル送り速度が最も遅い  $v_{wp}=0.01\text{mm/s}$  の場合には、破壊

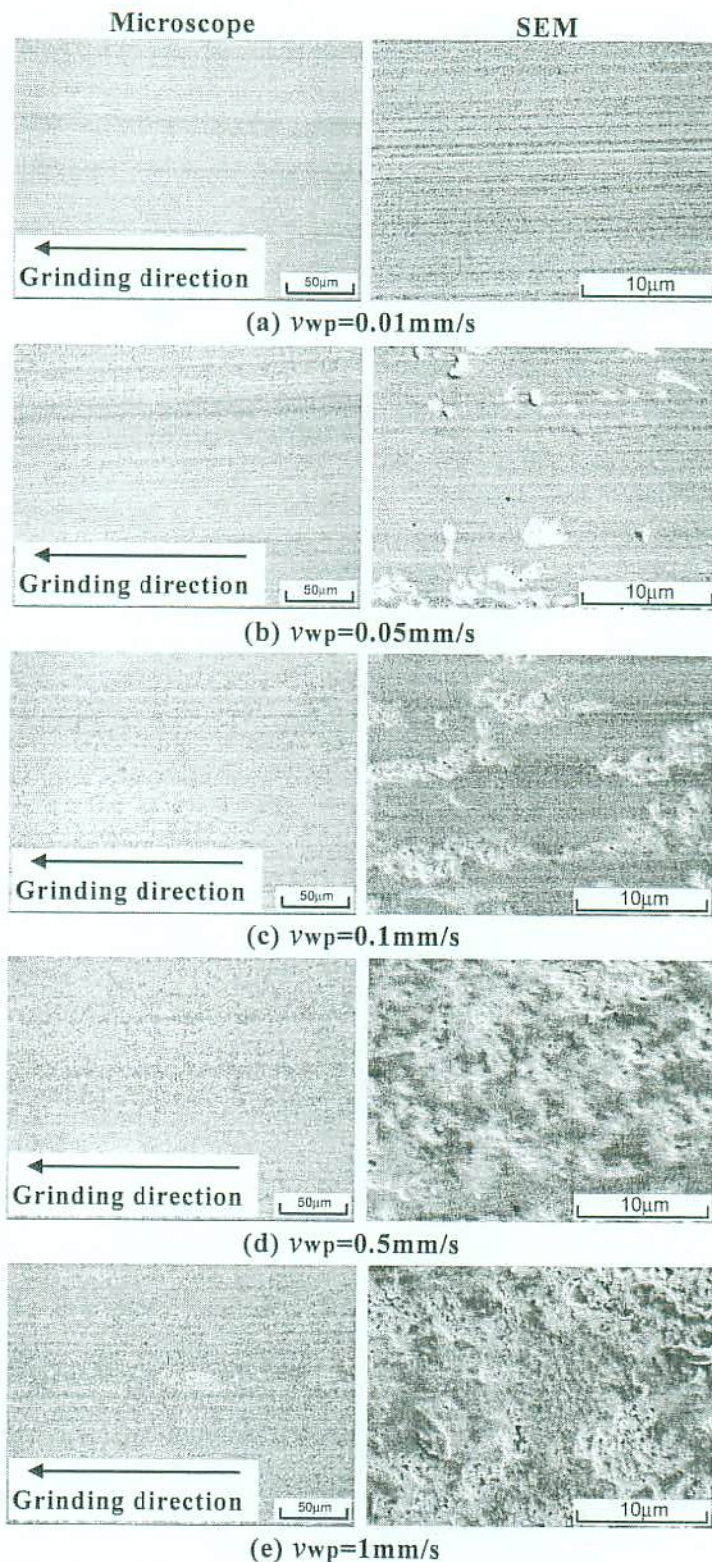


図 3.32 プランジ研削でガラスを研削した場合の  
テーブル速度の違いによる仕上面の比較  
[ $V_g=12\text{m/s}$ ,  $v_{wp}=0.01\sim1\text{mm/s}$ ,  $t=5\mu\text{m}$   
Soluble type(1/10) 12 l/min]



痕は見られずほぼ全面にわたって延性モード研削が行われているのがわかる。このように、#140 のメタルボンドダイヤモンド砥石を用いた場合には、テーブル送り速度  $v_{wp}$  を遅くすることによって、脆性破壊痕の発生を抑制でき、良好な延性モード研削は可能であると言える。一方、テーブル送り速度  $v_{wp}$  を高速にした場合には、延性モード研削が得られ難くなることが確認できる。しかし、延性モード研削が良好に行われた  $v_{wp}=0.01\text{mm/s}$  の仕上面においても、研削方向に条痕が見られ、プランジ研削法では、平滑な仕上面は得られ難いことがわかる。

図 3.33 に、図 3.32 で示した#140 のメタルボンドダイヤモンド砥石を用い、工作物速度  $v_{wp}=0.01\text{mm/s}$ 、 $0.05\text{mm/s}$ 、 $0.5\text{mm/s}$ 、 $5\text{mm/s}$  と変化させて HPSC を、

湿式研削した場合の、法線研削抵抗  $F_n$ 、接線研削抵抗  $F_t$  および研削抵抗比  $F_t/F_n$  を示す。図より、工作物送り速度  $v_{wp}$  を大きくすると、法線研削抵抗  $F_n$  および接線研削抵抗  $F_t$  とも、大きくなることがわかる。一方、研削抵抗比  $F_t/F_n$  は、工作物送り速度  $v_{wp}$  を大きくすると、研削抵抗  $F_n$ 、 $F_t$  の傾向とは逆に、小さくなることがわかる。これは、工作物送り速度  $v_{wp}$  の増加は、単純に、除去速度の増加と考えられることから、法線研削抵抗  $F_n$  および接線研削抵抗  $F_t$  が大きくなるものと考えられる。そして、研削抵抗比  $F_t/F_n$  は、工作物送り速度  $v_{wp}$  が大きくなると、前途のように、法線研削抵抗  $F_n$  および接線研削抵抗  $F_t$  ともに大きくなるが、この増加率が、接線研削抵抗  $F_t$  に比べ、法線研削抵抗  $F_n$  の方が大きくなり、結果的に、工作物送り速度  $v_{wp}$  が大きくなると、研削抵抗比  $F_t/F_n$  が小さくなるものと考えられる。これは、工作物送り速度  $v_{wp}$  を大きくすることにより、砥粒切れ刃が研削する体積が増えるため、急激に法線研削抵抗  $F_n$  が高くなるものと考えられる。また、図 3.29 で示した研削仕上面観察結果から、工作物送り速度  $v_{wp}$  が小さい場合には、脆性破壊痕がほとんどない、良好な延性モード研削面となることから、相対的に接線研削抵抗  $F_t$  が大きくなることにも起因すると考えられる。

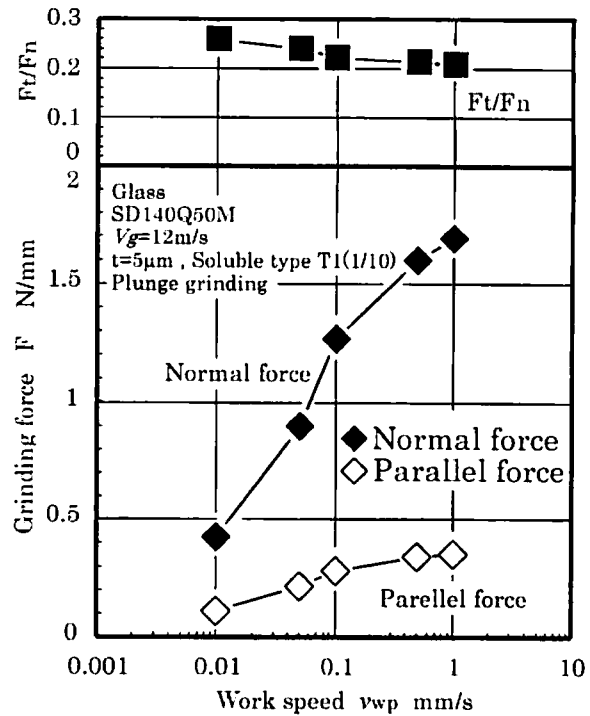


図 3.33 プランジ研削でガラスを研削した場合のテーブル速度と研削抵抗  $F_n$ 、 $F_t$  および研削抵抗比  $F_t/F_n$  の関係  
 $[V_g=12\text{m/s}$ ,  $v_{wp}=0.01\sim 1\text{mm/s}$ ,  $t=5\mu\text{m}$   
Soluble type(1/10) 12 l/min]

### 3.7 第3章の総括

本章では、#140のメタルボンドダイヤモンド砥石を用いた各種ファインセラミック HPSC, HIPSN,  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Tic}$  およびガラスの延性モード研削仕上面に及ぼす研削油剤の効果と影響について検討した。検討は、乾式研削および、近年開発された環境対応型オイルフリータイプの研削油剤を3種類用いて、プランジ研削を行い、研削仕上面性状を光学顕微鏡および SEM で観察することにより行った。また、研削加工時には、弾性八角リングにより研削抵抗を測定し、得られた接線研削抵抗  $F_t$  と工作物の機械的特性を、Jaeger の移動熱源モデルから導かれた理論式に代入し、工作物への熱流入割合を仮定することにより、研削点温度を予測的に算出した。以下に、得られた結果を示す。

- 1) 今回の実験で使用したすべての工作物 HPSC, HIPSN,  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Tic}$  および、ガラスの平面プランジ研削の場合には、研削油剤を供給しない乾式研削では、良好な延性モード研削仕上面は得られない。
- 2) これは、研削点温度の試算より、研削点温度が非常に高温になり、工作物表面が軟化、熔融剥離し、凹凸面となることによるものである。さらに、研削熱により、工作物が熱膨張し、研削加工時の砥粒切込み深さが大きくなり、硬脆材料の延性モード研削に肝要な延性モード臨界切込み深さ  $d_c$  以下で加工し得ないことも原因であると推察される。
- 3) 一方、研削油剤を供給する湿式プランジ研削では、研削点温度の算出結果から、乾式研削よりも、低い研削点温度となり、研削油剤の供給効果が確認できた。そして、特に、 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Tic}$  および、ガラスにおいて、乾式研削と湿式研削の研削点温度の差が大きく、研削油剤の供給効果が非常に大きいことが確認できた。これは、工作物の機械的特性に基づくものと考えられ、その一つに熱伝導率の低さが挙げられる。
- 4) そして、この研削油剤の供給効果により、湿式研削の場合には、延性モード研削仕上面が得られやすくなることがわかった。しかしながら、研削油剤の種類により、研削仕上面に発生する脆性破壊痕の数と大きさが異なり、同じ研削条件でも、すべての研削油剤で良好な延性モード研削仕上面を得ることはできなかった。今回用いた研削油剤の中では、アニオン界面活性剤を主体とした研削油剤タイプ T1 において、脆性破壊痕の発生が非常に少ない、最も良好な延性モード研削仕上面が得られることがわかった。
- 5) しかしながら、#140のメタルボンドダイヤモンド砥石を用いた平面プランジ研削では、その仕上面に、研削方向平行方向に砥粒切れ刃により生成される研削条痕が観察され、平滑な仕上面を得ることは極めて困難である。
- 6) HPSC およびガラスの場合には、テーブル送り速度  $v_{wp}$  を小さくすると、脆性破壊痕の発生が抑制され、良好な延性モード研削仕上面が得られることがわかった。こ

れは、硬脆材料の延性モード臨界切込み深さ  $d_c$  に関連するものであると思われる。

### 第3章の参考文献

- 1)小倉一朗，岡崎祐一：シングルポイントダイヤモンド旋削による光学ガラスの延性モード切削加工に関する研究，精密工学会誌，66，9(2000)1427.
- 2)例えば，市田良夫，貴志浩三，蓮田裕一，アクバリ・ジャワド：ファインセラミックスの鏡面研削の関する研究(第1報)－仕上面の生成機構に関する基礎的考察－，精密工学会誌，57，8(1991)1406.
- 3)日本特殊研砥株式会社：第22回日本国際工作機械見本市 JIMTOF2004
- 4)株式会社ミズホ：製品カタログ
- 5)安井平司，有野芳弘，松永郁夫：粗粒ダイヤモンド砥石によるファインセラミックスの延性モード高平滑研削(第1報)－粒度140のメタルボンドダイヤモンド砥石による延性モード研削－，精密工学会誌，63，9(1997)1270.
- 6)安井平司，松永郁夫，鶴崎美智子，坂本重彦：粗粒ダイヤモンド砥石によるファインセラミックスの延性モード高平滑研削(第2報)－延性モード研削に及ぼす砥石周速度の影響－，精密工学会誌，69，11(2003)1595.
- 7)日本タングステン株式会社：製品カタログ
- 8)OHARA株式会社：製品カタログ
- 9)，11)宮下正和：ぜい性材料の延性モード研削加工技術－ナノ研削技術への道－精密工学会誌，56，5(1990)782.
- 10)超精密生産技術体系(基本技術)第2章－超精密研削加工原理－(1995)156.
- 12)広井進，山中康夫：切削油剤と研削油剤，幸書房，(1982).
- 13)Trevor Howes：Assessment of the Cooling and Lubricative Properties of Grinding Fluid, Annals of the CIRP, Vol.39, No.1, (1990) 313.
- 14)J.SHIBATA, S.YONETSU：TERMAL ASPECT OF CREEP-FEED GRINDING AND EFFECTIVE COOLANT APPLICATION, Proc.Int.Mach.Tool.Des.Res.Conf., 26, (1986) 375.
- 15)安井平司：接触弧内における研削液の沸騰－湿式研削温度の研究(第1報)－，精密機械，48，5(1982)609.
- 16)安井平司：湿式研削温度に及ぼす研削条件の影響－湿式研削温度の研究(第2報)－精密機械，50，2(1984)383.
- 17)中園汎，安井平司，久留須誠：レジンボンド CBN 砥石の目直しに関する研究(第1法)精密工学会誌，55，6(1980)1073.
- 18)中園汎，安井平司，久留須誠：レジンボンド CBN 砥石の目直しに関する研究(第2

- 法)精密工学会誌, 55, 10(1980)1874.
- 19)安井平司, 開豊, 坂田正登: 自動砥石作業面画像処理システムの開発, 精密工学会誌, 67, 7(2001)1130.
- 20)J.C.Jaeger: Moving Sources of Heat and the Temperature at Sliding Contacts, Proc. Roy.Soc.New SouthWales, 76(1942)851.
- 21)小野浩二: 研削仕上, 槇書店(1964), 47.
- 22)高沢孝哉: 研削熱の加工物への流入割合, 精密機械, 30(1964)914.
- 23)細川晃, 安井平司, 樋口浩司, 佐藤郁: ファインセラミックスの湿式研削における熱流入割合ー硬ぜい材料の研削加工に関する研究(第2報)ー, 精密工学会誌, 65, 6(1999)883.
- 24), 25)安井平司: 湿式研削における熱流入割合の検討(その2) - 湿式研削温度の研究(第5報) -, 精密工学会誌, 56, 11(1990)135.

## 第4章 平面研削加工に超平滑研削法を適用した場合の炭化けい素セラミック高平滑延性モード研削仕上面に及ぼす研削油剤の効果と影響

### 4.1 緒言

近年、携帯型通信機器や光学電子機器に代表される超微細電子光学素子やその製造のための金型、高速超薄厚LSI、高性能記録装置等の先進デバイスの開発と実用化に伴い、これらを構成するファインセラミックなどの硬質機能性材料に対するナノメタオーダの高平滑鏡面とサブミクロンの形状精度を実現する超精密・超平滑機械加工技術の開発が進められている。この一例として、研削加工では、ラッピングやポリシング等のように遊離砥粒を用いて、定圧力で高平滑面に仕上げる研磨加工に替え得る、あるいは、研磨加工に近い、超平滑研削加工法への期待が非常に高いものがある。

例えば、粗研削工程で広く使用されている粗粒ダイヤモンド砥石で、超平滑研削加工が可能になれば、加工能率向上や加工物の脱着時間の省略等による総加工時間の短縮や高精度加工と高平滑加工が同時に行える等の利点が考えられる。

このような観点より、第3章では、安井により提案されている、粗粒(#140)の砥石を用いても、その研削条件等を整えることで、脆性破壊を生じない延性モードの加工形態の研削が可能であることを確認し、そして、その仕上面性状に及ぼす研削油剤の効果と影響について検討した。その結果、研削油剤の種類により、同研削条件で湿式件研削した場合においても、仕上面性状が、脆性破壊的表面を呈する場合と滑らかな延性モード加工面を呈する場合とがあり、研削油剤の組成・成分が延性モード研削加工面に大きな影響を持つことがわかった<sup>1), 2)</sup>。

この一方で、本研究に先立ち、安井は、#140の粗粒砥石を用いた場合、現在主流である平面プランジ研削法やトラバース研削法で得られる仕上面は、研削加工時に生成される研削条痕による研削方向直角仕上面粗さが大きく、研磨加工に匹敵するような超平滑面を得ることができないことを指摘し<sup>3)</sup>、研削条痕を確実に低減し得る超平滑研削加工法を新たに考案・開発した<sup>4), 5)</sup>。そして、この超平滑研削法を超硬合金に適用し、#140の粗粒砥石で、仕上面粗さを( $R_z$ 値)で30nm、または、( $R_a$ 値)で5nm以下に加工し、超平滑研削加工法の効果を報告している<sup>5)</sup>。

そこで本章では、この超平滑研削加工を平面研削加工に適用し、#140の粗粒メタルボンドダイヤモンド砥石を用いた、炭化けい素セラミック(HPSC)の高能率・高平滑研削加工の可能性を考究する一段階として、超平滑研削仕上面に及ぼす研削油剤の効果と影響を実験的に検討した<sup>1), 2)</sup>。



## 4.2 超平滑研削法

### 4.2.1 超平滑研削法の仕上面生成機構

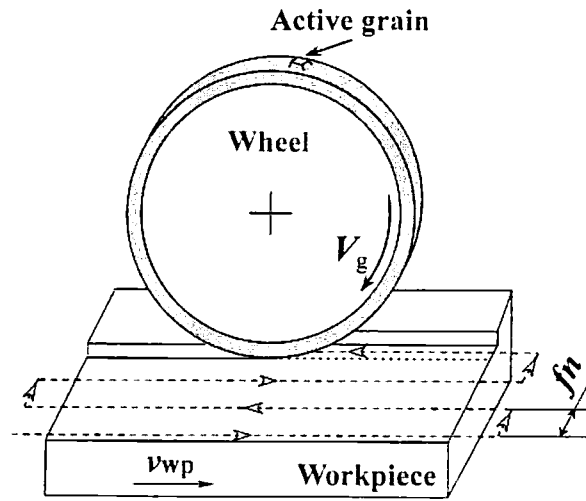


図 4.1 トラバース研削法の概略

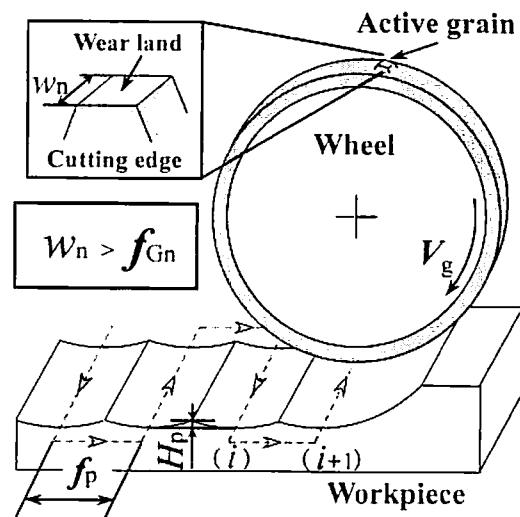


図 4.2 超平滑研削法の概略

図 4.1 に、超平滑研削法を、図 4.2 に従来のトラバース研削法を示す。また、図 4.3 に超平滑研削法を横軸角テーブル型平面研削に適用した場合の例を模式的に示す。横軸角テーブル型平面研削の場合では、まず、(1)砥石あるいは工作物を、研削方向とは直角方向に、砥石 1 回転当たりの工作物送り量  $f_{Gn}$  が、研削方向と直角な切れ刃逃げ面摩耗幅  $w_n$  以下の送り速度になるように送り、砥石-工作物接触幅を加工する(第 1 の要件)。(2)その後、幾何学的に計算される砥石-工作物の干渉高さ(研削方向平行仕上面粗さ  $H_p$  に相当)が、要求する高平滑仕上面粗さ  $H_{max}$  以下になるように、研削方向平行に微小な送り量  $f_p$  だけ、

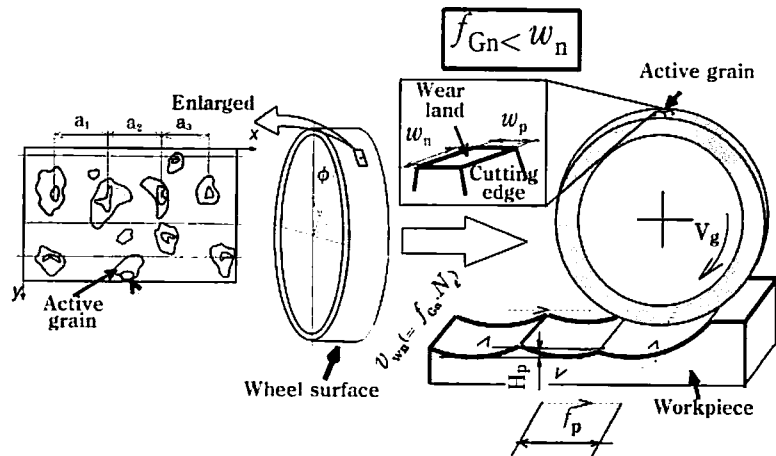


図 4.3 超平滑研削法の横軸角テーブル形平面研削作業への適用図

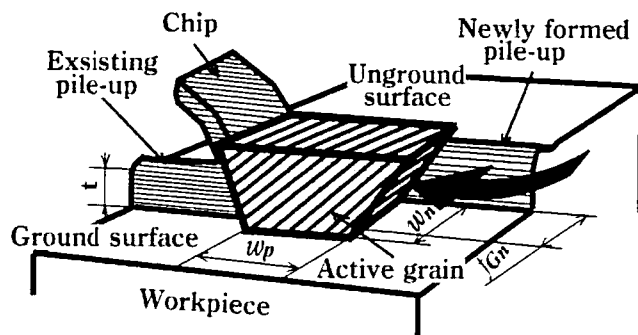


図 4.4 超平滑研削法による研削条痕の除去機構模式図

工作物あるいは砥石を間欠的に移動する(第2の要件)。そして、次の砥石-工作物接触幅を仕上げる。考案・開発した超平滑研削法は、このような運動機構を繰り返して、工作物全面を加工し、研磨加工に替え得る、あるいは、研磨加工に近い超平滑研削仕上を行おうとするものである。

この方法により、研削方向直角の切れ刃逃げ面摩耗幅  $w_n$  を、砥石1回転当たりの工作物送り量  $f_{Gn}$  よりも大きくすることで、図4.4に示すように、一つの切れ刃で工作物幅  $w_n$  を研削後、その工作物幅と研削方向直角移動方向に隣り合う工作物幅  $w_n$  は、「同じ切れ刃」により、 $w_n f_{Gn}$  回だけ、切削される。従来のトラバース研削のように、工作物が研削方向平行に移動しないため、他の切れ刃との干渉は少なく、同じ切れ刃により、確実に、切り残しが生じないように、工作物は除去される。そのため、原理的には、研削方向直角仕上面粗さは、切れ刃逃げ面が転写されただけのものとなり、切れ刃逃げ面の研削方向直角仕上面粗さと同じになる。

研削方向平行仕上面粗さ  $H_p$  は、幾何学的には、次に示す図4.5の切れ刃による研削方向平行仕上面粗さの求め方から容易に考えられるように、この  $H_p$  の値は、研削方向平行方向間欠送り量  $f_p$  を小さくすることにより、比較的容易に数 nm 程度にすることが可能であることは容易に考えられる。

#### 4.2.2 超平滑研削条件と仕上面生成機構および研削形態の幾何学的検討

##### 4.2.2-1 研削方向平行方向間欠送り量 $f_p$ および砥石設定切込み深さ $t$ について

研削方向平行方向間欠送り量  $f_p$  については、要求する仕上面粗さを考えると、ある程度以上に大きくできない制約が生じる。図4.5に示すように、研削パス回数(i)から(i+2)回目への研削方向平行方向間欠送り量  $f_p$  の砥石移動により、工作物へ転写される砥石形状の巨視的干渉が生じる。この干渉で生じる砥石干渉最大高さ  $H_{max}$  を、砥石直径  $D_o$  (砥石半径  $R_o$ ) とし、幾何学的に算出すると、三平方の定理より、

$$(R_o - H_{max})^2 + \left(\frac{f_p}{2}\right)^2 = R_o^2$$

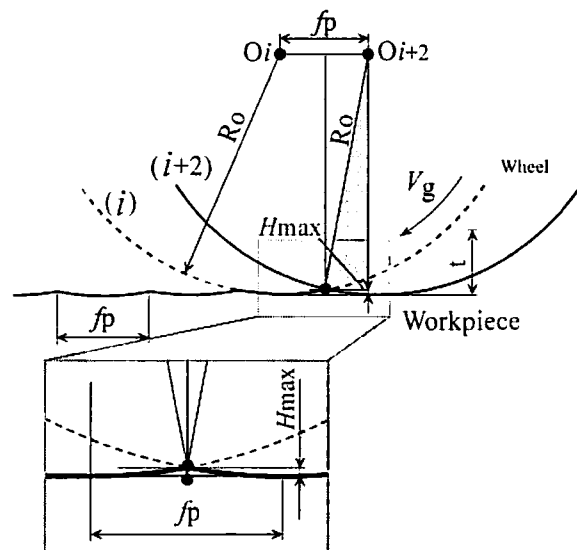


図4.5 研削方向平行方向間欠送り量  $f_p$  と砥石干渉最大高さ  $H_{max}$  の関係を示す模式図

$$H_{\max}(2R_o - H_{\max}) = \frac{f_p^2}{4}$$

$$H_{\max} \ll 2R_o \text{ より, } H_{\max} = \frac{f_p^2}{8R_o}$$

$$H_{\max} = \frac{f_p^2}{4D_o} \cdots \cdots (1)$$

となる。

この幾何学的に求められる砥石干渉最大高さ  $H_p$  は、2 次元的に得られる研削方向平行仕上面最大高さ  $H_{\max}$  として考えられる。

得られた(1)式を用いて、砥石直径  $D_o$  を 100mm とした場合の、研削方向平行方向間

欠送り量  $f_p$  と砥石干渉最大高さ  $H_{\max}$  の関係を算出し、図 4.6 に示す。図より、例えば、研削方向平行方向間欠送り量  $f_p=100\mu\text{m}$  の場合には、約 30nm となることがわかる。従って、超平滑研削法では、この点に考慮し、所要の仕上面粗さに応じて、研削方向平行方向間欠送り量  $f_p$  を設定する必要がある。

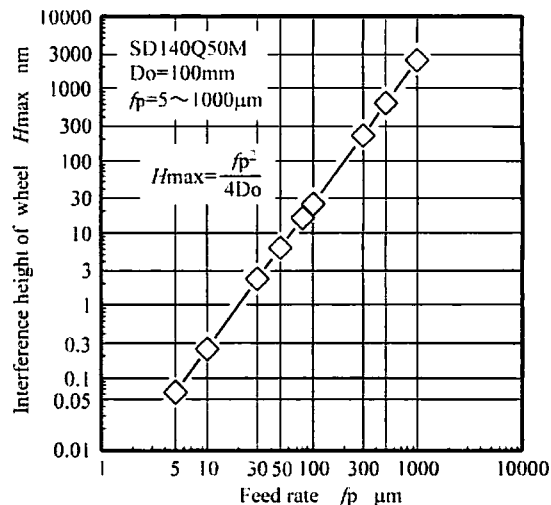


図 4.6 研削方向平行方向間欠送り量  $f_p$  と砥石干渉最大高さ  $H_{\max}$  の関係

図 4.7 に、研削方向平行方向間欠送り量  $f_p$  と最大砥石切込み深さ  $G_{\max}$  の関係を示す。研削加工における切れ刃の切削作用は複雑であり、実際の切り屑の大きさを解析することは難しい。そこで、一般には、砥石作業面上に均一に分布した一定の形状をした切れ刃が切削するものとして、切れ刃の切削作用を論じる傾向が多い。本節では、このような規則的に分布した砥粒による幾何学的な砥石切取り形状を解析し砥粒の切削機構について検討する。一般的な平面研削の場合と同じように、超

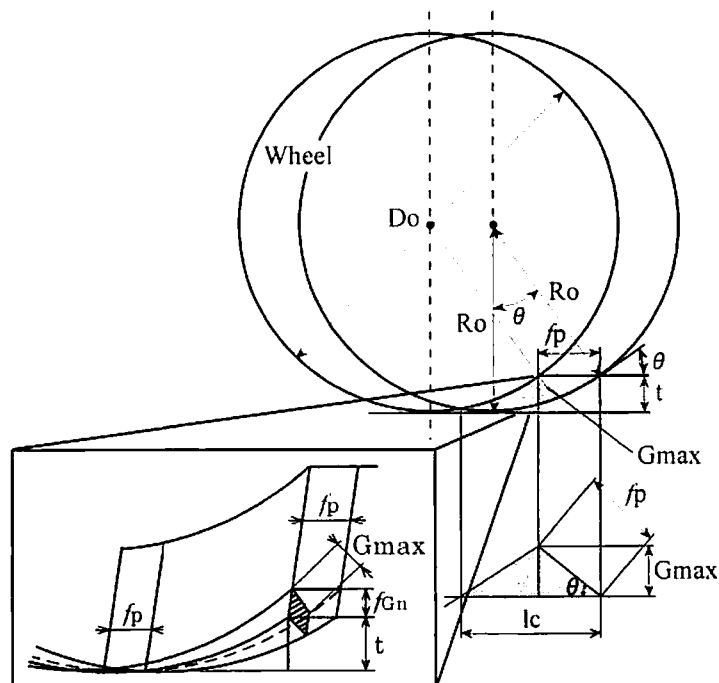


図 4.7 研削方向平行方向間欠送り量  $f_p$ 、設定切込み深さ  $t$  と最大砥石切込み深さ  $G_{\max}$  の関係を示す模式図

平滑研削法の場合においても、加工時に設定した砥石切込み深さ  $t$  と、実際に砥石が削る切込み深さ  $G_{\max}$  とは異なる。ここで、砥石直径を  $D_o$ 、加工時に設定した切込み

量を  $t$  とした場合、図より、

$$\cos \theta = \frac{R_o - t}{R_o}, \quad \cos^2 \theta + \sin^2 \theta = 1 \text{ より,}$$

$$\sin \theta = \sqrt{1 - \cos^2 \theta}, \quad \sin \theta = \sqrt{1 - \left( \frac{R_o - t}{R_o} \right)^2}$$

$$t^2 \ll R_o \text{ より, } \sin \theta = \sqrt{\frac{2t}{R_o}}$$

$$G_{\max} = f_p \times \sin \theta \text{ より,}$$

$$G_{\max} = f_p \times \sqrt{\frac{2t}{R_o}}$$

$$G_{\max} = f_p \times \sqrt{\frac{4t}{D_o}} \dots \dots (2)$$

となる。得られた(2)式からわかるように、

最大砥石切込み深さ  $G_{\max}$  は、研削方向平行方向間欠送り量  $f_p$  と設定切込み量  $t$  により決まる。ここで、図 4.8 に、砥石直径  $D_o$  を 100mm とした場合の、研削方向平行方向間欠送り量  $f_p$  と最大砥石切込み深さ  $G_{\max}$  の関係を算出し、グラフに示す。図より、例えば、研削方向平行方向間欠送り量  $f_p = 30 \mu\text{m}$  で、設定切込み量  $t = 5 \mu\text{m}$  では、最大砥石切込み深さ  $G_{\max}$  は、約 100nm と非常に小さくなることがわかる。

ここで、第 3 章 3.2.2 に示したように、ファインセラミックやガラス等の硬脆材料の高平滑研削加工には、延性モード研削が肝要であり、材料除去形態が延性モードと脆性モードの境界点を示す臨界砥粒切込み深さ  $d_c$  以下で研削すれば、延性モード研削が可能であることが明らかになっている。

本実験で使用するファインセラミックおよびガラスの臨界砥粒切込み深さ  $d_c$  を再度示すと、

$$\text{HPSC: } d_c = 0.15 \left( \frac{E}{H_k} \right) \left( \frac{Kc}{H_k} \right)^2 = 0.15 \left( \frac{441}{25} \right) \left( \frac{3.2}{25} \right)^2 = 460 \text{ nm}$$

$$\text{HIPSN: } d_c = 0.15 \left( \frac{E}{H_k} \right) \left( \frac{Kc}{H_k} \right)^2 = 0.15 \left( \frac{310}{18} \right) \left( \frac{7.5}{18} \right)^2 = 4484 \text{ nm}$$

$$\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Tic: } d_c = 0.15 \left( \frac{E}{H_k} \right) \left( \frac{Kc}{H_k} \right)^2 = 0.15 \left( \frac{392}{19.5} \right) \left( \frac{5.0}{19.5} \right)^2 = 1982 \text{ nm}$$

$$\text{ガラス: } d_c = 0.15 \left( \frac{E}{H_k} \right) \left( \frac{Kc}{H_k} \right)^2 = 0.15 \left( \frac{90}{6} \right) \left( \frac{1}{6} \right)^2 = 625 \text{ nm}$$

となる。

この算出結果より、臨界砥粒切込み深さ  $d_c$  は、HIPSN が最も大きく、次いで  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Tic}$ 、ガラス、そして、HPSC が最も小さくなることがわかる。

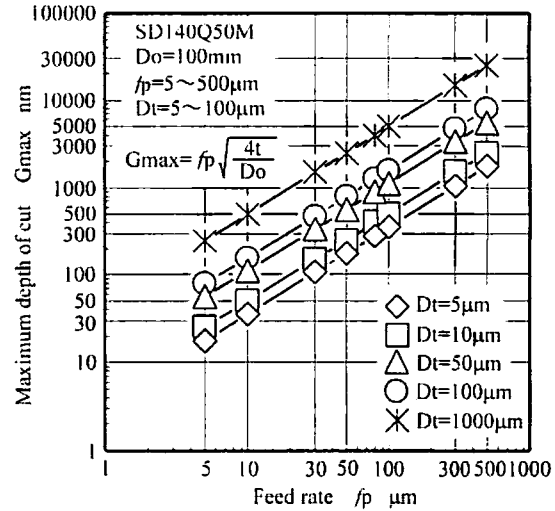


図 4.8 研削方向平行方向間欠送り量  $f_p$ 、設定切込み深さ  $t$  と最大砥石切込み深さ  $G_{\max}$  の関係

#### 4.2.2-2 砥石周速度 $V_g$ および工作物研削方向直角方向送り量 $f_{Gn}$ について

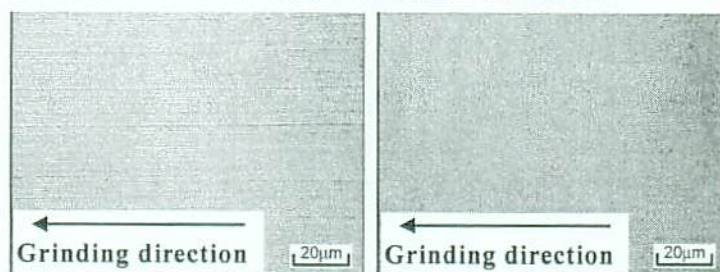
超平滑研削法の場合，4.2.1 で記したように，その除去機構から，得られる工作物仕上面上に研削条痕を発生させないためには，図 4.4 に示すように，砥石一回転あたりの工作物研削方向直角方向送り量  $f_{Gn}$  を，研削方向直角方向の切れ刃逃げ面摩耗幅  $w_n$  よりも小さくすることが前提となる．このため，砥石一回転あたりの工作物研削方向直角方向送り量  $f_{Gn}$  を，研削方向直角方向の切れ刃逃げ面摩耗幅  $w_n$  の相関により，ある一定以上大きくできない制約が生じる．そこで，超平滑研削法の高除去速度化・高能率化を検討するためには，砥石周速度  $V_g$  を高くすることにより，研削方向直角方向送り速度  $v_{wn}$  を高速にすることが考えられる．しかしながら，横軸型平面研削の場合には，平型砥石を使用するため，砥石直径  $D_o$  が比較的大きくなることから，砥石周速度  $V_g$  においても制約が生じることや，砥石周速度  $V_g$  が高くなると，物理的微振動や研削熱の影響など，工作物仕上面生成に与える様々な影響因子についても，検討する必要があると考えられる．

以上，このような幾何学的に得られる仕上面生成機構および研削特性の検討を基に，超平滑研削法の実用化を念頭に置き，超平滑研削法の高平滑化，高除去速度化・高能率化を目的とし，各種超平滑研削条件が仕上面性状および仕上面粗さに及ぼす影響を検討する必要がある．



#### 4.2.3 延性材料(超硬合金 P20)の平面研削加工における超平滑研削法の適用効果

図 4.9 に、#140 の粗粒ダイヤモンド砥石を用いて、超平滑研削法で、超硬合金を研削した場合の仕上面を示す。参考のために、トラバース研削法の研削方向直角間欠送り量が  $f_n=10\mu\text{m/pass}$  の場合を併記する。なお、超平滑研削法における砥石 1 回転当たりの工作物送り量は  $f_{Gn}=20\mu\text{m/rev}$  で、トラバース研削法での研削方向直角間欠送り量である  $f_n=10\mu\text{m/pass}$  の 2 倍である。図より、超平滑研削法での  $f_{Gn}$  が、トラバース研削法での  $f_n$  の 2 倍にもなっているにもかかわらず、同一倍率の顕微鏡写真観察上は、研削条痕がほとんど見られず、研削条痕は大きく低減しているのがわかる。



(a) トラバース研削法 (b) 超平滑研削法

図 4.9 トラバース研削法と超平滑研削法との研削仕上面の比較(超硬合金)

SD140Q50M  $V_g=12\text{m/s}$ ,  $t=5\mu\text{m}$ , Soluble type(1/50)

トラバース研削法:  $v_{wp}=0.5\text{mm/s}$ ,  $f_n=10\mu\text{m/pass}$

超平滑研削法:  $v_{wn}=0.76\text{mm/s}$  ( $f_{Gn}=20\mu\text{m/rev}$ )

$f_p=30\mu\text{m/pass}$

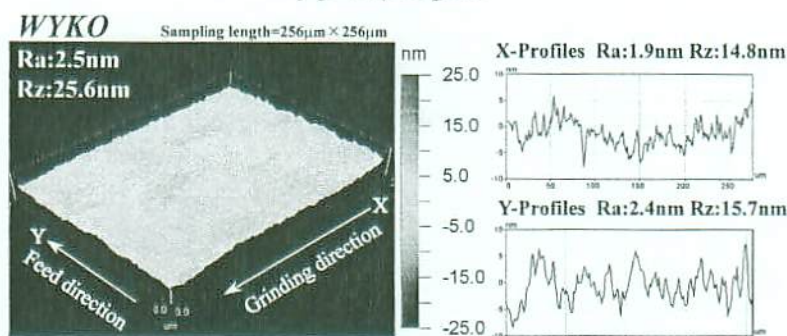


図 4.10 超平滑研削法による超硬合金の研削仕上面観察結果(WYKO)

SD140Q50M  $V_g=12\text{m/s}$ ,  $v_{wn}=0.76\text{mm/s}$  ( $f_{Gn}=20\mu\text{m/rev}$ )

$f_p=30\mu\text{m/pass}$   $t=5\mu\text{m}$ , Soluble type(1/50)

このことから、 $f_{Gn}=20\mu\text{m/rev}$  および  $f_n=10\mu\text{m/pass}$  の両方の場合とも、切れ刃逃げ面摩擦幅  $w_n$  よりも小さい条件と推測される。

図 4.10 に、図 4.9(b)の超平滑研削法で研削した工作物表面の仕上面粗さを光干渉式非接触表面形状測定機で調べた結果を示す。図より、高倍率の測定では、微小な研削条痕が見られるものの、研削方向直角仕上面粗さ(図中 Y-profile)  $H_n(2D)$  は約 16nm( $R_z$  値)、または、約 2.4nm( $R_a$  値)、研削方向平行仕上面粗さ(図中 X-profile)  $H_p(2D)$  は約 15nm( $R_z$  値)、または、約 1.9nm( $R_a$  値)であり、研削方向直角方向、平行方向ともに、同等な仕上面粗さとなっており、高平滑面が得られていることがわかる。この結果から、超平滑研削法は、研削条痕の発生が非常に少なく、研磨加工法に近い超平滑加工ができる研削手法といえる。

なお、超平滑研削法他の特徴として、上述のように、粒度#140 の粗粒砥石が用い得るという点が挙げられる。これは、加工能率の向上に結びつくことが考えられ、微粒砥石を用いた場合には、より一層な平滑加工性が得られるものと考えられる。

### 4.3 実験装置および実験方法

#### 4.3.1 実験方法および条件

実験は、第3章で記した方法とほぼ同様である。使用した研削盤は、NC横軸角テーブル形高精度平面研削盤Ultra Micro Grinder(UMS-100不二越機械製)を用いた。実験に用いた工作物は、炭化けい素セラミックHPSCである。研削油剤は、砥石の研削方向前方を1/4程度側面から挟み込んだノズルを製作し、研削点近傍に供給している。今回の実験で使用した研削油剤は、第3章と同様に、3種類のソリュブルタイプである。各研削油剤の成分は、アニオン界面活性剤を主体としたタイプT1、グリコールと脂肪酸アミン塩を主体としたタイプT2、そして、グリセリンを主体としたタイプT3である。研削油剤の供給量は、12 l/minとし、希釈は水道水で行った。なお、実験中には、適宜形直し・目直しを行い、砥石作業面の一定化に努めている。研削後の工作物仕上面は、微分干渉顕微鏡および走査型電子顕微鏡(SEM)で観察し、仕上面粗さは、光干渉式非接触高精度表面形状測定機(WYKO 3D)、原子間力顕微鏡(AFM)で測定した。最大高さ仕上面粗さ表記は、JIS B 0601(2001)に基づき $R_z$ としている。仕上面の硬さ測定には、微小硬度計(島津製作所製DUH-200)を用いた。また、研削加工中における研削抵抗は、半導体ゲージを貼付した弾性八角形リング動力計で測定した。表4.1に、超平滑研削実験条件を示す。

表 4.1 超平滑研削実験条件表

工作物		HPSC Length×Width:10mm×10mm
砥石		SD140Q50M Do×B×Di ; $\phi 100 \times 6 \times 40$
研削方法		Ultra-smoothness grinding
砥石周速度 : $V_g$		20m/s
研削方向直角方向送り量 : $f_{Gn}$		10 $\mu$ m/rev
研削方向直角方向送り速度 : $v_{wn}$		0.63mm/s
研削方向平行方向間欠送り量 : $f_p$		10 $\mu$ m, 30 $\mu$ m
砥石切込み量: $t$		5 $\mu$ m
研削油剤	種類	Soluble type T1,T2,T3
	希釈倍率	1/10,1/30,1/50,1/100,Water
	供給量	12 l/min
	温度	20℃

#### 4.3.2 砥石作業面の観察

4.2.1 節で述べたように，超平滑研削法は，その除去機構から，得られる工作物仕表面上に研削条痕を発生させないためには，図に記したように，砥石一回転あたりの工作物研削方向直角方向送り量 $fGn$ を，研削方向直角方向の切れ刃逃げ面摩耗幅 $w_n$ よりも小さくすることが必要である．今回の実験に用いた砥石における砥粒切れ刃逃げ面摩耗幅 $w_n$ は，図 4.11 に示すように，約  $30\mu\text{m}$  程度である．このことから，研削方向直角方向送り量 $fGn=30\mu\text{m}$  以上の場合には，幾何学的に示したような研削モデルにはならず，仕上面に研削条痕，および切り残しが発生するのではないかとと思われる．一方，研削方向直角方向送り量 $fGn=30\mu\text{m}$  以下の場合には，研削仕上面に微小な凹凸は観察されないため，幾何学的に考え得る理想的な切削モデルとなっていることが予測される．今回の実験では，上記のようなことを考慮し，砥石一回転あたりの工作物研削方向直角方向送り量 $fGn=10\mu\text{m}$  と一定に設定した．

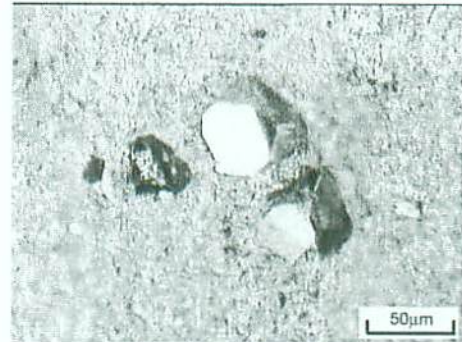


図 4.11 砥粒逃げ面の顕微鏡写真

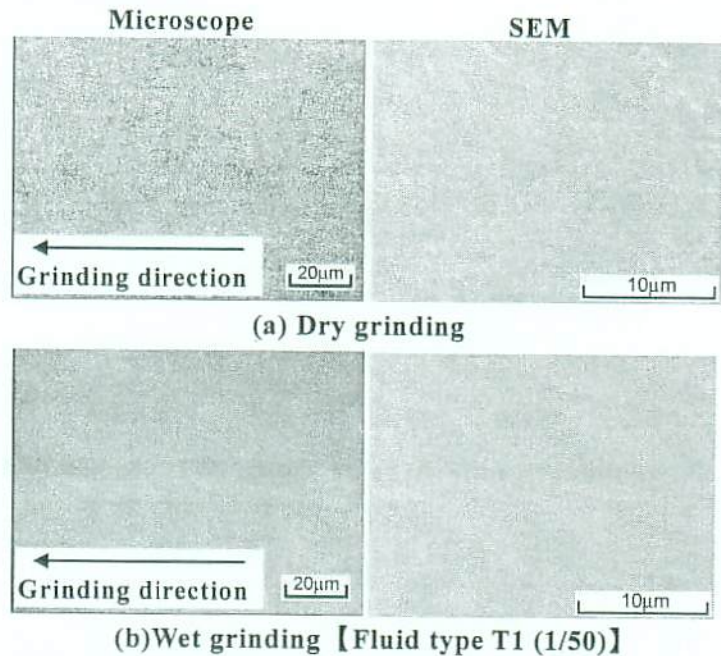


#### 4.4 実験結果および考察

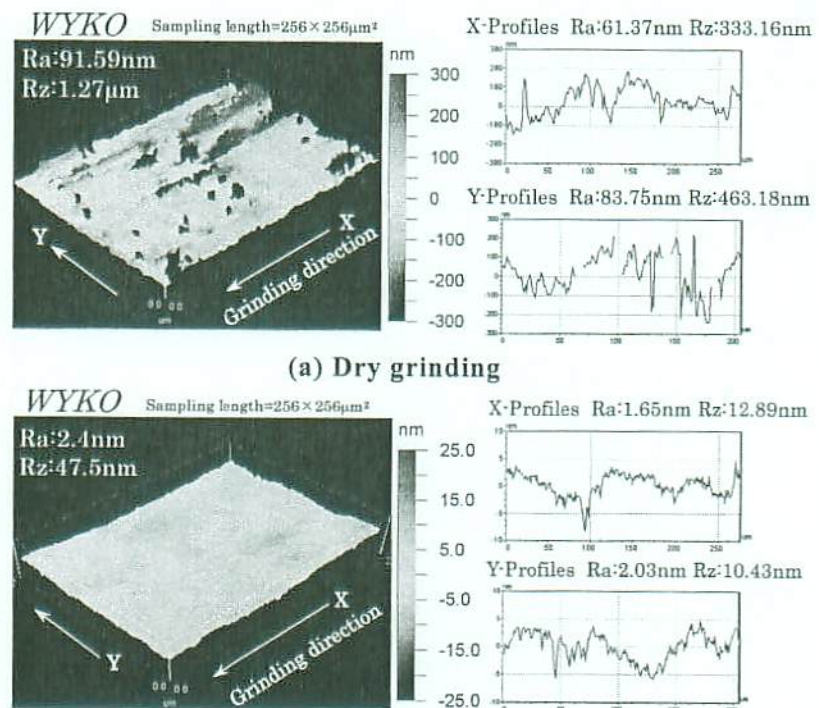
##### 4.4.1粗粒ダイヤモンド砥石による超平滑研削実験

##### 4.4.1-1研削油剤の供給効果

図4.12に、超平滑研削法で、HPSCを乾式研削した場合と湿式研削した場合の仕上面を比較して示す。図より、乾式研削の場合には、ほとんどが微小凹凸面によって形成されており、滑らかな延性モード研削仕上面は見られず、第3章図3.15に示したプランジ研削法の場合よりも悪い仕上面であることがわかる。このことから、乾式研削では、超平滑研削法は、プランジ研削法の場合に比較して、研削形態が厳しく作用し、延性モード研削仕上面が得られ難いことが考えられる。これは、超平滑研削法の場合には、工作物速度は、第3章で示したプランジ研削法よりも高速であるが、工作物の研削方向平行方向間欠送り量 $f_p$ が $30\mu\text{m}$ と小さいため、砥石が往復でほぼ同じ個所を通過することにより、研削温度が高くなることが考えられる。一方、湿式研削の場合には、第3章図3.15のプランジ研削法の仕上面で見られた研削条痕は全く観察されず、 $5\mu\text{m}$ 以



(a) Dry grinding  
(b) Wet grinding 【Fluid type T1 (1/50)】  
図 4.12 超平滑研削による HPSC の乾式研削と湿式研削の仕上面の比較  
[ $V_g=20\text{m/s}$ ,  $f_{Gn}=10\mu\text{m/rev}$  ( $v_{wn}=0.63\text{mm/s}$ ),  $f_p=30\mu\text{m}$ ,  $t=5\mu\text{m}$ ]



(a) Dry grinding  
(b) Wet grinding 【Fluid type T1 (1/50)】  
図 4.13 超平滑研削による HPSC の乾式研削と湿式研削の仕上面粗さの比較  
[ $V_g=20\text{m/s}$ ,  $f_{Gn}=10\mu\text{m/rev}$  ( $v_{wn}=0.63\text{mm/s}$ ),  $f_p=30\mu\text{m}$ ,  $t=5\mu\text{m}$ ]



下の微小な脆性破壊痕が幾つか点在しているものの、仕上面全面が極めて高平滑な延性モード研削面となっているのが伺え、超平滑研削法の有用性が確認できる。

図4.14に、図4.13で示した超平滑研削法の場合の乾式研削と湿式研削の場合における仕上面を光干渉式非接触高精度表面形状測定機で観察した結果を比較して示す。両図とも、測定範囲は、 $256\mu\text{m} \times 256\mu\text{m}$ である。まず、乾式研削の3次元画像には、幾つかのピンホール(画像抜け)が見られる。これは、乾式研削した場合の仕上面が極めて粗く、使用したWYKO 3Dの測定許容範囲以上の凹凸が存在し、その部分が抜け落ちたために発生しているものである。そして、3次元仕上面粗さは、 $(Rz)_{3D}$ 値で約 $1.27\mu\text{m}$ 、 $(Ra)_{3D}$ 値では、約 $91.6\text{nm}$ と非常に悪い仕上面粗さとなっていることがわかる。一方、湿式研削の場合では、3次元画像からわからずに、研削条痕も見られず、仕上面粗さは、 $(Rz)_{3D}$ 値で約 $48\text{nm}$ 、 $(Ra)_{3D}$ 値では約 $2.4\text{nm}$ である。また、2次元仕上面粗さについては、研削方向平行仕上面粗さ(図中X-profile)は、 $Rz$ 値で約 $13\text{nm}$ 、 $Ra$ 値では約 $1.7\text{nm}$ で、研削方向直角工作物仕上面粗さ(図中Y-profile)は、 $Rz$ 値で約 $10.5\text{nm}$ 、 $Ra$ 値では $2.0\text{nm}$ となり、ほぼ超平滑研削面となることが確認できる。

図4.15に、超平滑研削でHPSCを乾式研削した場合と湿式研削した場合の仕上面表層の硬さを測定した結果を示す。硬さ測定は、10ヶ所測定した平均値をデータとしている。なお、乾式研削の場合には、脆性破壊痕を考慮して測定している。また、参考のためにHPSCを、適当な条件でラッピング加工した面の硬さも比較して示した。図より、乾式研削および湿式研削ともに、ラッピング加工面硬さよりも低くなっており、その低下

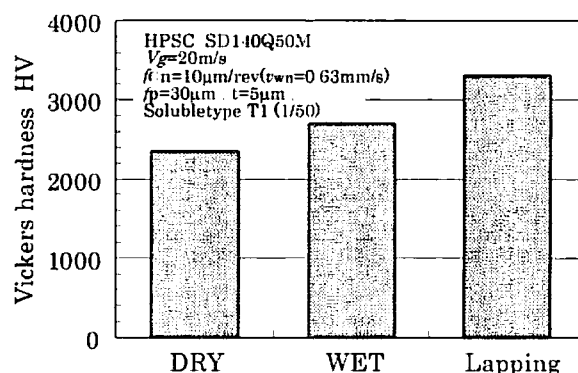


図 4.15 超平滑研削で HPSC を乾式研削および湿式研削した場合の仕上面表層硬さの比較

[ $V_g=20\text{m/s}$ ,  $f/n=10\mu\text{m/rev}$  ( $v_{wn}=0.63\text{mm/s}$ )  
 $f_p=30\mu\text{m}$ ,  $t=5\mu\text{m}$ ]

率は、乾式研削の場合の方が大きくて約30%程度、湿式研削の場合で約20%程度となっている。このような工作物表面硬さの低下には、第3章で示したような工作物表面の研削温度上昇による軟化が影響していると推測される。これらの結果から、超平滑研削法の場合にも、プランジ研削法と同様に、乾式研削の場合には、研削温度上昇に伴う加工軟化による表面層の熱的溶融剥離が考えられ、超平滑延性モード研削は難しいと考えられる。この一方、本実験条件の湿式研削では、研削油剤が砥石接触孤内で膜沸騰することなく、発生研削熱抑制効果が見られ、研削油剤を供給することにより、研削条痕がない超平滑延性モード研削面が得られることが考えられる。

図4.16に、図4.12で示した超平滑研削法でHPSCを乾式研削および湿式研削した場合の法線研削抵抗 $F_n$ 、接線研削抵抗 $F_t$ および研削抵抗比 $F_t/F_n$ を示す。図より、乾式研削の $F_n$ 、 $F_t$ および $F_t/F_n$ は、湿式研削の場合よりも大きな値となっている。この結果から、超平滑研削法でも乾式研削の場合には、発生研削熱が非常に高くなり仕上面表面が溶融、軟化され、前途のように、表面硬度が低下すると考えられる。

なお、乾式研削の場合には、表面硬度が大きく低下することから、表面温度上昇により、加工形態がより塑性流動的になると推測され、その結果、 $F_n$ 、 $F_t$ および $F_t/F_n$ が、湿式研削よりも大きくなると考えられる。

ここで、第3章図3.17で示したプランジ研削での研削抵抗 $F_n$ 、 $F_t$ と比較してみる。まず、法線研削抵抗 $F_n$ では、超平滑研削法は、プランジ研削法に比べ、乾式研削で約1/6、湿式研削で約1/4程度小さい。これは、除去速度の違いがあるので単純には比較できないが、超平滑研削法の場合には、本章4.2.1で示したように、個々の砥粒が微量ずつ除去する研削理論であるため、法線研削抵抗 $F_n$ が小さくなるものと思われる。また、接線研削抵抗 $F_t$ では、乾式研削で約1/5、湿式研削ではほとんどかわらない。この結果より、接線研削抵抗 $F_t$ は、発生研削熱量に置換することができるので、プランジ研削法と超平滑研削法では、大きく発生熱量がかわらないことが推察できる。

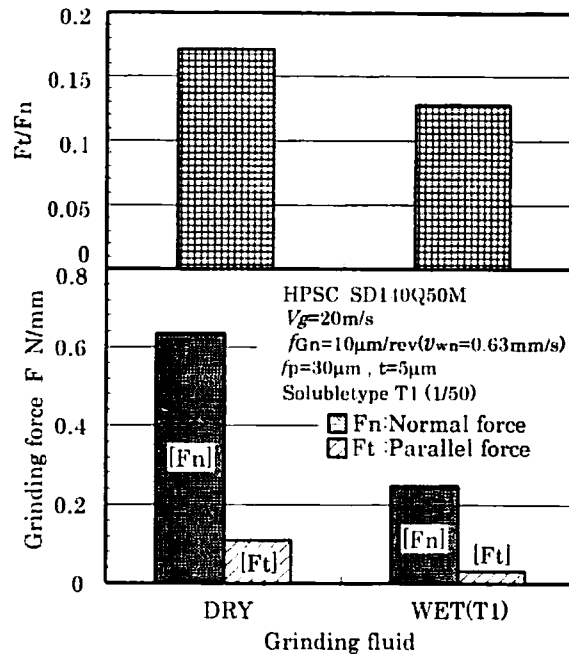


図 4.16 超平滑研削法で HPSC を乾式研削および湿式研削した場合の研削抵抗  $F_n$ 、 $F_t$ 、研削抵抗比  $F_t/F_n$  の比較  
 $[V_g=20\text{m/s}, f_g=10\mu\text{m/rev}$  ( $v_{wn}=0.63\text{mm/s}$ )  
 $f_p=30\mu\text{m}$ ,  $t=5\mu\text{m}]$

#### 4.4.1-2 研削油剤の種類が高平滑延性モード研削仕上面に及ぼす影響

図4.17に、T1、T2、T3の3種類の研削油剤を50倍に希釈して、HPSCを超平滑研削した場合の仕上面を比較して示す。なお、T1は図4.12の再載である。図より、いずれの仕上面においても、プランジ研削法やトラバース研削法の仕上面に見られるような研削条痕が見られず、超平滑研削法を適用することにより、研削条痕を低減し得ることが確認でき、超平滑研削法の有用性を確認できる。また、各研削油剤の仕上面については、いずれの油剤の場合ともほぼ延性モード研削面であり、研削油剤T1の場合には、特に脆性破壊痕はほとんど見られない。しかし、研削油剤T2では、脆性破壊痕が幾分発生しており、研削油剤T3では、さらに多数の脆性破壊痕が発生している。なお、研削油剤T2の場合には、第3章図3.19に示したように、プランジ研削法では、

ほとんど脆性破壊痕が見られなかったことから、超平滑研削法は、プランジ研削法よりも、延性モード研削を行うことが難しいと推察され、高平滑研削仕上面になるほど、研削油剤の影響が大きくなるのではないと思われる。これは同時に、超平滑研削法では、延性モード臨界切込み深さ以下で研削されていないことになり、超平滑研削法は、プランジ研削法よりも、研削油剤の潤滑効果が大きく影響し、また、研削熱が溜まりやすく、研削時の工作物熱膨張を考慮する必要があると言える。

図4.18に、乾式研削および3種類の研削油剤を用いた湿式研削の法線研削抵抗 $F_n$ 、接線研削抵抗 $F_t$ および、研削抵抗比 $F_t/F_n$ を比較して示す。図より、乾式研削の場合には、いずれの湿式研削の法線研削抵抗 $F_n$ 、接線研削抵抗 $F_t$ よりも、高い値になっていることがわかる。また、3種類の研削油剤を用いた湿式研削の法線研削抵抗 $F_n$ を比較する

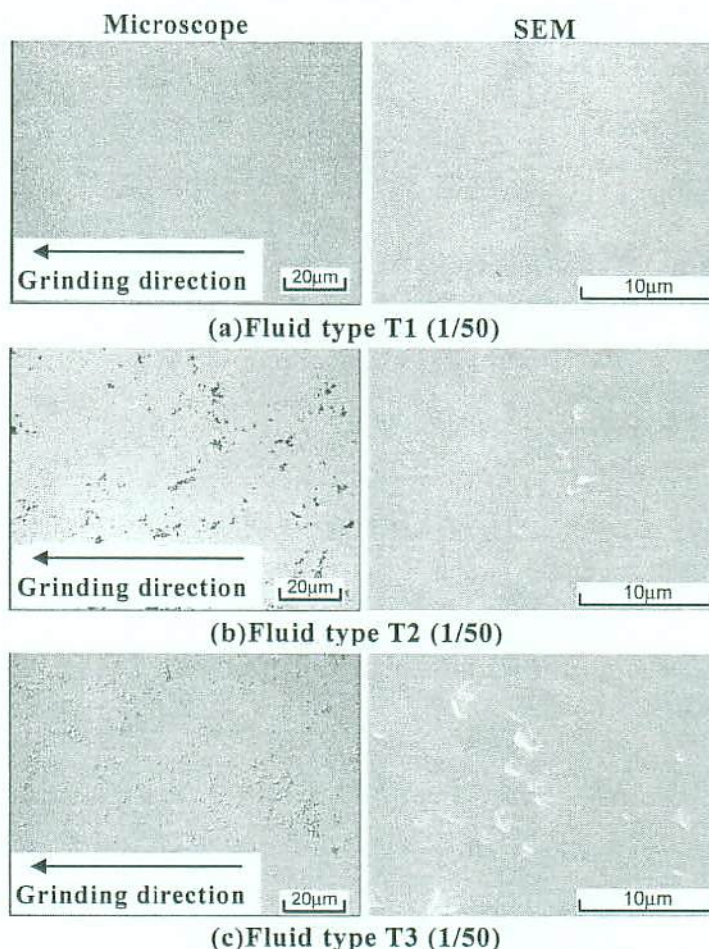


図 4.17 T1、T2、T3 の 3 種類の研削油剤を 50 倍に希釈して、HPSC を超平滑研削した場合の仕上面の比較  
 $V_g=20\text{m/s}$ ,  $f_{Gn}=10\mu\text{m/rev}$  ( $v_{wn}=0.63\text{mm/s}$ )  
 $f_p=30\mu\text{m}$ ,  $t=5\mu\text{m}$ , Soluble type(1/50)  
 [Ultra-smoothness grinding]

と、第3章図3.20に示したプランジ研削法の場合と同様に、研削油剤T3が最も高く、次にT2が高く、T1が最も低くなる。図4.17で示した研削仕上面を微分干渉顕微鏡で観察した結果では、研削油剤T3は、仕面上に多数の脆性破壊痕が観察され、脆性モード研削形態を示す。しかしながら、研削油剤T3の研削抵抗は最も高くなっており、法線研削抵抗 $F_n$ に、脆性破壊状態が強いことの影響は見られない。このことに加え、超平滑研削法の研削抵抗 $F_n$ 、 $F_t$ が、図3.20で示したプランジ研削法に比べ、約1/3程度と小さく、研削抵抗 $F_n$ 、 $F_t$ に及ぼす研削油剤の影響が大きくなることが考えられる。これらのことから、プランジ研削の場合と同様に、研削油剤T1、T2、T3の順で潤滑効果が悪く結果的に研削温度が上昇し、砥粒切れ刃と工作物との接触面積が増加した結果、研削油剤T1、T2、T3の順で研削抵抗が高くなったものと推察される。なお、研削抵抗比 $F_t/F_n$ が、T1、T2、T3の順で低くなるのには、脆性破壊痕がこの順で増加することが影響していると考えられる。この結果より、超平滑研削法においても、プランジ研削法の場合と同様、研削抵抗 $F_n$ 、 $F_t$ に与える研削油剤の効果は大きいと言える。

図4.19に、3種類の研削油剤を用いた湿式研削した場合の研削仕上面表面硬さを測定した結果を示す。硬さの結果

は、10ヶ所測定した平均値をデータとしている。なお、測定は、脆性破壊痕を避けて行っている。また、参考のためにHPSCを適当な条件でラッピング加工した面の硬さも示した。図より、いずれの研削油剤ともに、ラッピング加工面硬さよりも低くなって

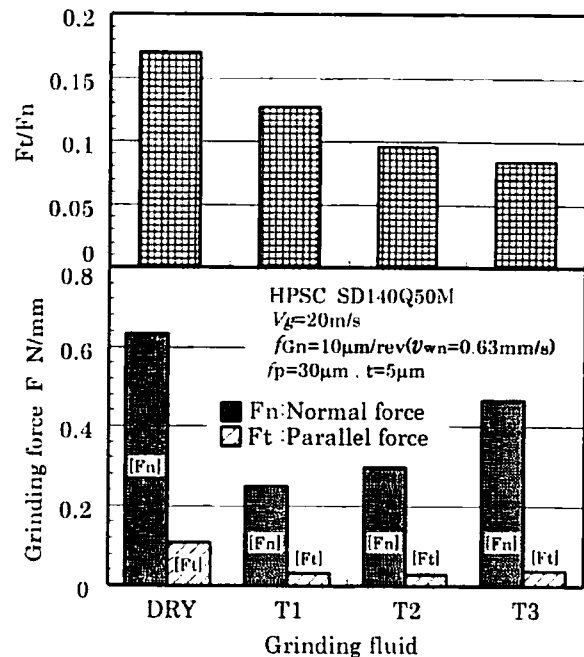


図 4.18 超平滑研削法で HPSC を乾式研削および T1、T2、T3 の 3 種類の研削油剤を用いた湿式研削した場合の研削抵抗  $F_n$ 、 $F_t$  および研削抵抗比  $F_t/F_n$  の比較

$V_g=20\text{m/s}$ ,  $f_{Gn}=10\mu\text{m/rev}$  ( $v_{wn}=0.63\text{mm/s}$ )  
 $f_p=30\mu\text{m}$ ,  $t=5\mu\text{m}$ , Soluble type(1/50)  
 [Ultra-smoothness grinding]

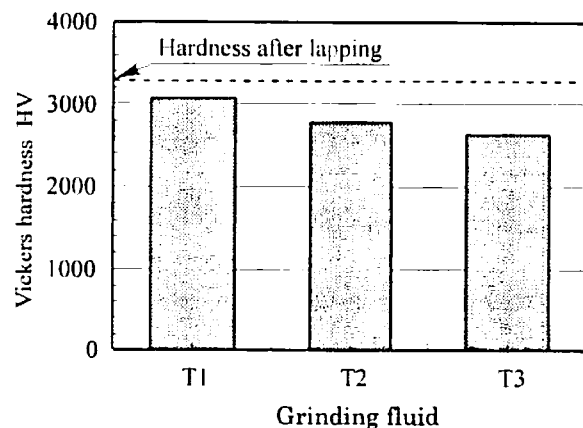


図 4.19 超平滑研削で HPSC を T1、T2、T3 の 3 種類の研削油剤を用いて湿式研削した場合の仕上面表層硬さの比較

$V_g=20\text{m/s}$ ,  $f_{Gn}=10\mu\text{m/rev}$  ( $v_{wn}=0.63\text{mm/s}$ )  
 $f_p=30\mu\text{m}$ ,  $t=5\mu\text{m}$ , Soluble type(1/50)  
 [Ultra-smoothness grinding]



おり，その低下率は，研削油剤タイプT1が最も小さく，T3が最も大きい．図4.18に示した研削抵抗の結果では，研削油剤タイプT3の研削抵抗 $F_n$ ， $F_t$ が最も大きいことから，研削点温度が最も高くなっていると考えられ，このような工作物表面硬さの低下には，工作物表面の研削温度上昇による軟化が影響していると思われる．

#### 4.4.1-3 研削油剤希釈倍率が高平滑延性モード研削仕上面に及ぼす影響

図4.20に，前項で最も良好な延性モード研削仕上面が得られた研削油剤T1を用い，希釈倍率を10倍，30倍，50倍，100倍および参考のための水道水のみ5種類でHPSCを超平滑研削法で湿式研削した場合の仕上面をSEMで観察した結果を示す．超平滑研削条件は，図中に示す．図より，研削油剤希釈倍率が50倍以下では，仕上面全面が延性モード高平滑面になることがわかる．しかし，希釈倍率が100倍以上では，脆性破壊痕が見られ，水道水のみの場合には，さらに多くなる傾向にあることがわかる．この結果より，HPSCの超平滑研削加工では，研削油剤希釈倍率を低くする，すなわち研削油剤濃度を高くすることにより，超平滑延性モード研削仕上面が得られ易くなることがわかる．これは，HPSCの場合には，第3章表3.2に示したように，材料特性として，熱伝導率が比較的高く，熱的に安定した特性であるため，研削油剤の冷却効果よりも，潤滑効果の方が大きく影響するのではないかと推察

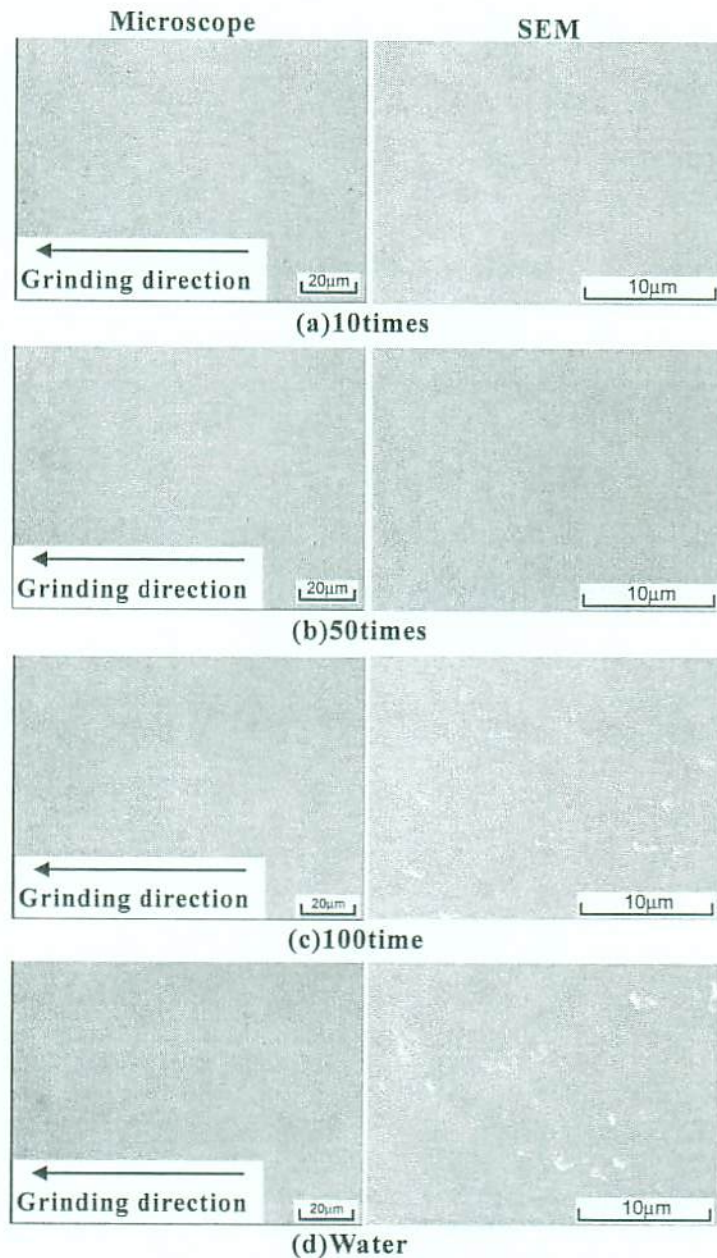


図 4.20 研削油剤 T1 を用いて HPSC を超平滑研削した場合の，研削油剤希釈倍率と仕上面性状の比較

[ $V_g=20\text{m/s}$ ,  $f_{Gn}=10\mu\text{m/rev}$  ( $v_{wn}=0.63\text{mm/s}$ )  
 $f_p=10\mu\text{m}$ ,  $t=5\mu\text{m}$ , Soluble type T1 12 l/min]



される。また、前述したように、超平滑研削法は、研削抵抗 $F_n$ 、 $F_t$ が、プランジ研削法に比べて、非常に小さな値となることにも、起因するものと思われる。

図4.21に、図4.20に示した超平滑研削法でHPSCを湿式研削した場合の研削油剤希釈倍率 $D_d$ と仕上面粗さ $H_r(3D)$ の関係を示す。測定範囲は、 $256\mu\text{m} \times 256\mu\text{m}$ の微小範囲粗さである。仕上面粗さは、WYKO 3Dで測定し、 $(Ra)_{3D}$  (算術平均粗さ)と $(Rz)_{3D}$  (最大高さ粗さ)で評価した。測定値は、10ヶ所の測定平均値である。図より、希釈倍率100倍程度まで、仕上げ面粗さには大きな差が見られず、約30nm( $Rz)_{3D}$ 、または約2nm( $Ra)_{3D}$ であること

がわかる。しかしながら、水道水のみを用いた超平滑研削では、 $(Rz)_{3D}$ 値で約50nm、 $(Ra)_{3D}$ 値で約6nmとなり、2倍近くも仕上面粗さが悪化する。この結果より、HPSCの場合では、100倍以上に希釈倍率を大きくすると、前述した図4.20の結果も含めて、仕上面に悪く影響すると言える。しかし

ながら、水道水のみを用いた湿式研削において、図4.14からもわかるように、仕上面に幾分脆性破壊痕が発生するが、 $(Rz)_{3D}$ 値で約50nm、 $(Ra)_{3D}$ 値で約6nmという、相当高平滑な仕上面となっていることは、超平滑研削法の特徴と言える。

図4.22に、図4.21において、最も良い仕上面粗さとなった研削油剤希釈倍率50倍の場合の仕上面をWYKOで測定した結果を示す。測定範囲は、微小範囲である $256\mu\text{m} \times 256\mu\text{m}$ である。まず、3次元画像からわかるように、研削条痕はほとんど見られない。そして、3次元仕上面粗さは、 $(Rz)_{3D}$ 値で約27.5nm、 $(Ra)_{3D}$ 値では、約2.3nmである。さらに、2次元仕上面粗では、研削方向平行仕上面粗さ(図中X-profile)は、 $(Rz)_{2D}$ 値で約6.6nm、 $(Ra)_{2D}$ 値では、約1.0nmであり、また、研削方向直角工作物仕上面粗さ(図

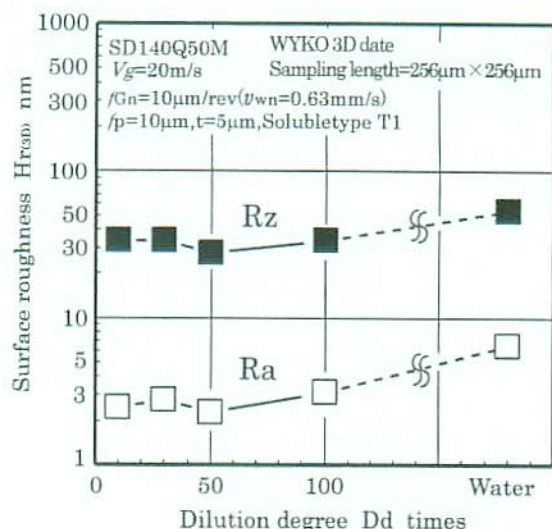
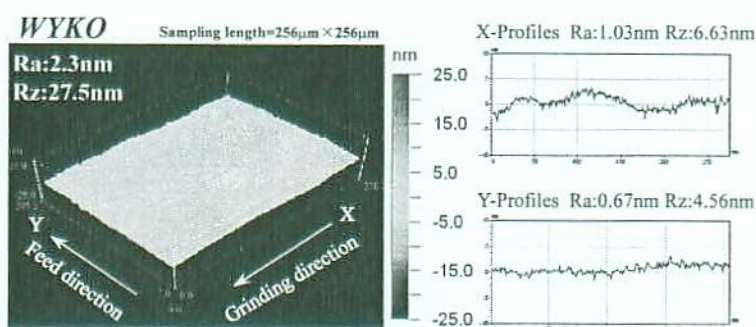


図4.21 研削油剤T1を用いてHPSCを超平滑研削した場合の、研削油剤希釈倍率と仕上面性状の関係

[ $V_g=20\text{m/s}$ ,  $f_{Gn}=10\mu\text{m/rev}$  ( $v_{wn}=0.63\text{mm/s}$ ),  $f_p=10\mu\text{m}$ ,  $t=5\mu\text{m}$ , Soluble type T1 12 l/min]

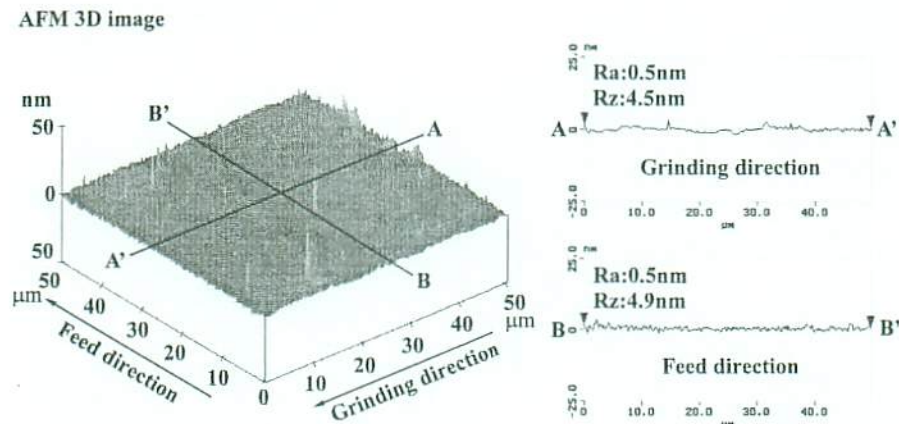


(b) Wet grinding [Fluid type T1 (1/50)]

図4.22 研削油剤T1 50倍希釈でHPSCを超平滑研削した場合の仕上面のWYKO観察結果

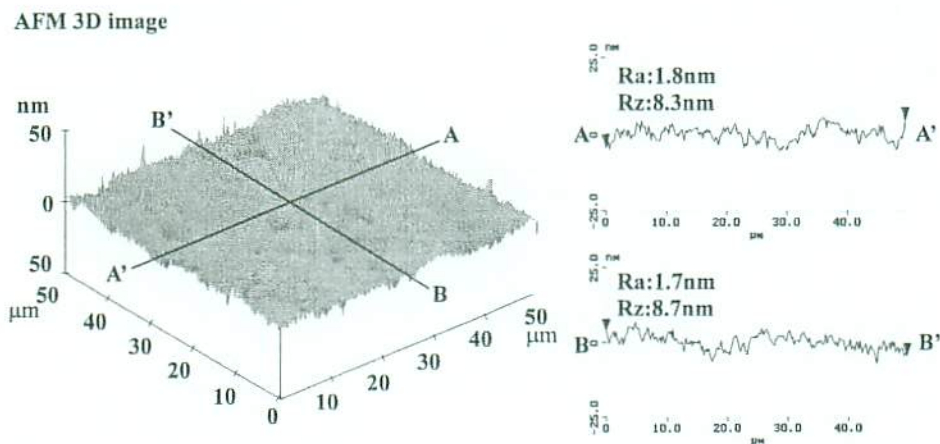
[ $V_g=20\text{m/s}$ ,  $f_{Gn}=10\mu\text{m/rev}$  ( $v_{wn}=0.63\text{mm/s}$ ),  $f_p=10\mu\text{m}$ ,  $t=5\mu\text{m}$ , Soluble type T1 12 l/min]

中 Y-profile)は, ( $Rz$ )<sub>2D</sub> 値で約 4.5nm, ( $Ra$ )<sub>2D</sub> 値では約 0.6nm となり, 遊離砥粒における定圧運動方式に匹敵する超平滑仕上面に加工し得ることがわかる. この結果より, 超平滑研削法を平面研削加工に適用することにより, #140 のメタルボンドダイヤモンド砥石を用いても, HPSC を超平滑面に近い研削仕上面に加工し得ることがわかる.



測定範囲【50μm×50μm】

図 4.23 HPSC を超平滑研削した場合の仕上面の AFM 観察結果  
 $[Vg=20m/s, fGn=10\mu m/rev(v_{wn}=0.63mm/s), fp=10\mu m, t=5\mu m,$   
 Soluble type T1 12 l/min]



測定範囲【50μm×50μm】

図 4.24 HPSC をポリッシング加工した場合の仕上面の AFM 観察結果

図 4.23 に, 図 4.22 に示す, HPSC 仕上面を, 高解像度の原子間力顕微鏡 AFM で, さらに詳細に測定した結果を示す. なお, 測定範囲は,  $50\mu m \times 50\mu m$  であり, 仕上面に発生する微小穴を反転して示している. 図の 3 次元画像より, 仕上面の一部に, 深さ 50nm 以下の微小穴が観察される. この微小穴は, 脆性的な研削により発生した微小

クラックもしくは、HPSC 自体が持つ気孔ではないかと思われる。しかしながら、この微小穴を含まない 2 次元仕上面粗さは、研削方向平行仕上面粗さ(図中 A-A'-profile)は、 $(Rz)_{2D}$  値で約 4.5nm,  $(Ra)_{2D}$  値では、約 0.5nm であり、また、研削方向直角仕上面粗さ(図中 B-B'-profile)は、 $(Rz)_{2D}$  値で約 4.9nm,  $(Ra)_{2D}$  値では約 0.5nm である。

ここで、図 4.24 に、適当な条件でポリッシング加工した HPSC の仕上面を、同じく高解像度の原子間力顕微鏡 AFM で、詳細に測定した結果を示す。なお、測定範囲は、図 4.22 と同様、 $50\mu\text{m} \times 50\mu\text{m}$  であり、仕上面に発生する微小穴を反転して示している。図の 3 次元画像より、先に示した超平滑研削加工の場合よりも、幾分微小穴の発生は少ないように思われる。しかしながら、測定範囲  $50\mu\text{m} \times 50\mu\text{m}$  で見る仕上面の形状精度を見ると、ポリッシング加工では、測定仕上面全体が、圧力転写運動方式の特長とも言える微小な凹凸状態になっており、平滑な仕上面とはなっていないことがわかる。

2 次元仕上面粗さは、研削方向平行仕上面粗さ(図中 A-A'-profile)は、 $(Rz)_{2D}$  値で約 8.3nm,  $(Ra)_{2D}$  値では、約 1.8nm であり、また、研削方向直角工作物仕上面粗さ(図中 B-B'-profile)は、 $(Rz)_{2D}$  値で約 8.7nm,  $(Ra)_{2D}$  値では約 1.7nm である。一方、超平滑研削法では、微小穴を除いた部分の測定仕上面は、非常に平滑な仕上面となっており、2 次元仕上面プロファイルからも、両加工法による仕上面性状の違いが確認できる。これより、測定範囲内で見える仕上面形状精度は、超平滑研削法は、ポリッシング加工に比べてよいと言える。この結果から、運動転写方式を採用した平面研削加工で、粗粒である #140 のメタルボンドダイヤモンド砥石を用いても、超平滑研削法を適用することにより、圧力転写方式である遊離砥粒加工を用いた、ラッピングやポリッシング加工に匹敵する超平滑な仕上面が得られることが認められ、超平滑研削法の有用性が認められる。

図 4.25 に、図 4.20 で示した研削油剤 T1 を用いて HPSC を超平滑研削した場合の、研削油剤希釈倍率と法線研削抵抗  $F_n$ 、接線研削抵抗  $F_t$ 、研削抵抗比  $F_t/F_n$  の関係を示す。図より、希釈倍率が高くなると、法線研削抵抗  $F_n$ 、接線研削抵抗  $F_t$  ともに、若干小さくなる傾向にある。また、研削抵抗比  $F_t/F_n$  では、希釈倍率 10

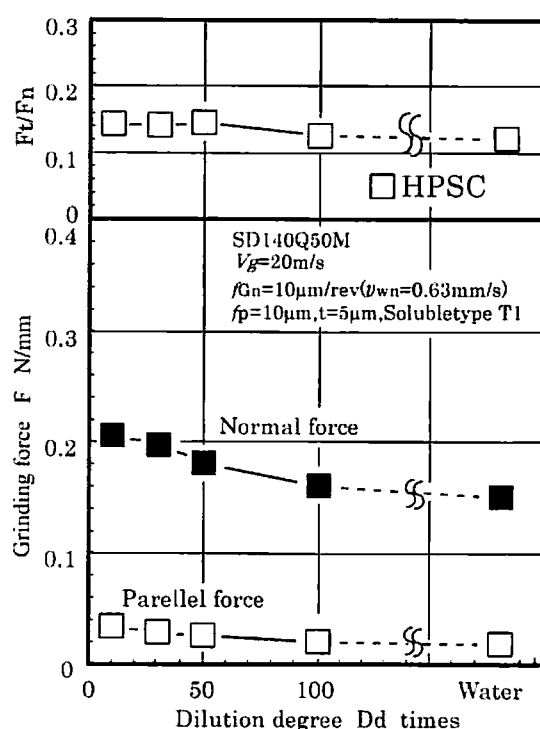


図 4.25 研削油剤 T1 を用いて HPSC を超平滑研削した場合の、研削油剤希釈倍率と研削抵抗  $F_n$ ,  $F_t$ ,  $F_t/F_n$  の関係

[ $V_g=20\text{m/s}$ ,  $f_{Gn}=10\mu\text{m/rev}$  ( $v_{wn}=0.63\text{mm/s}$ )  
 $f_p=10\mu\text{m}$ ,  $t=5\mu\text{m}$ , Soluble type T1 12 l/min]



倍から 50 倍では、ほとんど変化はなく一定の値となっているが、研削油剤希釈倍率  $D_d$  が 50 倍以上になると、幾分小さくなることがわかる。これは、図 4.20 で示した、研削仕上面の観察結果から、研削油剤希釈倍率  $D_d$  が 50 倍以下では、仕上面は、ほぼ脆性破壊痕がない、良好な延性モード研削仕上面となっている一方、研削油剤希釈倍率  $D_d$  が 50 倍以上では、脆性破壊痕が幾分点在している。このことから、研削油剤希釈倍率  $D_d$  が 50 倍以下では、研削抵抗が高くなる延性モード研削形態となり、研削油剤希釈倍率  $D_d$  が 50 倍以上では、延性・脆性モード範囲点での研削形態となり、このような研削形態の違いが、研削抵抗  $F_n$ 、 $F_t$  および  $F_t/F_n$  に影響しているものと考えられる。

図 4.26 に、図 4.20 で示した超平滑研削法で HPSC を湿式研削した場合の仕上面硬さ HV を、適当な条件でラッピング加工した場合と比較して示す。硬さ測定は、硬さの結果は、10 ヶ所測定した平均値をデータとしている。なお、測定は、脆性破壊痕を避けて行っている。図より、いずれの研削油剤希釈倍率においても、ラッピング硬さよりも低くなっていることがわかる。また、この低下傾向は、研削油剤希釈倍率が低い場合に表面硬度も低くなっている。これは、仕上面表面が溶解・軟化することを示しており、研削油剤が低希釈倍率では、研削油剤の冷却効果が小さくなるため、研削温度が高くなり、延性モード研削仕上面が得られ易くなる一方、仕上面の熱的影響が大きくなるものと考えられる。

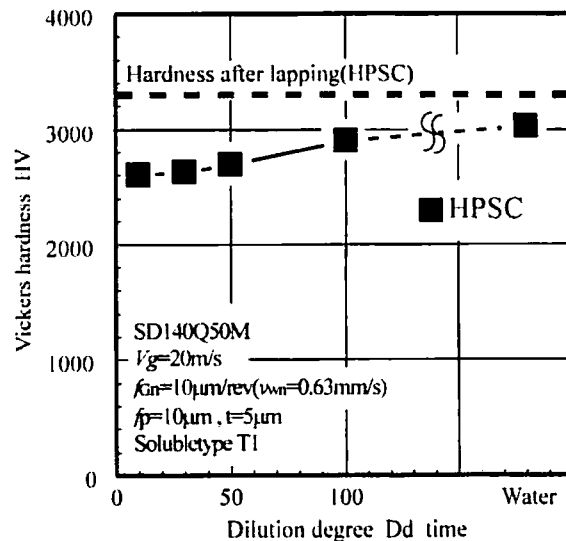


図 4.26 研削油剤 T1 を用いて HPSC を超平滑研削した場合の、研削油剤希釈倍率と研削抵抗の関係  
 $[V_g=20\text{m/s}, f_{Gn}=10\mu\text{m/rev} (v_{wn}=0.63\text{mm/s}), f_p=10\mu\text{m}, t=5\mu\text{m}, \text{Soluble type T1 } 12\text{ l/min}]$

#### 4.5 第4章の総括

本章では、超平滑研削加工法を平面研削加工に適用し、#140のメタルボンドダイヤモンド砥石を用いた超平滑研削加工を目的に、更なる仕上面の高平滑化・高能率化・高除去速度化への取り組みおよび、ファインセラミックの基本的な超平滑延性モード研削形態の一考察のとして、炭化けい素セラミック HPSC を用い、高平滑延性モード研削仕上面に及ぼす研削油剤の効果と影響について、実験的に検討した。検討は、乾式研削および、近年開発された環境対応型オイルフリータイプの研削油剤を3種類用いて、超平滑研削を行い、研削仕上面性状を光学顕微鏡、および SEM で観察し、研削仕上面粗さを WYKO、および AFM で測定することにより行った。また、研削加工時には、弾性八角リングにより研削抵抗を測定し、得られた研削抵抗から、HPSC の高平滑延性モード研削形態を考察した。以下に、得られた結果を示す。

- 1)炭化けい素セラミック HPSC の超平滑研削の場合には、第3章で得られたプランジカット研削の結果と同様、研削油剤を供給しない乾式研削では、仕上面が研削熱で溶融し、良好な延性モード研削仕上面は得られない。また、HPSC を乾式研削した場合では、超平滑研削法は、プランジカット研削よりも延性モード研削仕上面を得られ難いことがわかった。
- 2)一方、研削油剤を供給する湿式超平滑研削では、プランジ研削法で見られた研削条痕はほとんど見られない高平滑延性モード研削仕上面が得られ、研削油剤供給効果大きい。しかしながら、研削油剤の種類により、研削仕面上に発生する脆性破壊痕の数と大きさが異なり、同じ超平滑研削条件でも、すべての研削油剤で良好な延性モード研削仕上面を得ることはできなかった。今回用いた研削油剤の中では、プランジ研削法と同様に、アニオン界面活性剤を主体とした研削油剤タイプ T1 において、脆性破壊痕の発生が非常に少ない、最も良好な延性モード研削仕上面が得られることがわかった。これは、各研削油剤とも同じ希釈倍率で実験を行ったことから、研削油剤の冷却効果よりも、研削油剤の組成・成分に起因する潤滑効果が大きく影響するものと推察される。
- 3)最も良好な延性モード研削仕上面が得られたアニオン界面活性剤を主体とした研削油剤 T1 を用いた場合の、研削油剤希釈倍率が高平滑延性モード研削仕上面におよぼす影響を検討した結果、今回の実験条件の範囲では、HPSC の場合、研削油剤希釈倍率による大きな違いは見られなかったが、幾分低希釈倍率(高濃度)で、良好な延性モード研削仕上面が得られることがわかった。これは、工作物の機械的特性に大きく影響するものと思われるが、今後、研削形態も含め、詳細な検討が必要である。
- 4)超平滑研削法を、HPSCの平面研削加工に適用することにより、#140のメタルボンドダイヤモンド砥石を用いても、測定範囲 $256\mu\text{m} \times 256\mu\text{m}$ において、3次元仕上面粗さで、 $(R_z)_{3D}$ 値で約27nm、 $(Ra)_{3D}$ 値で約2.3nmの遊離砥粒研磨法に匹敵する高平滑研削

仕上面粗さに加工し得ることがわかった。

#### 第4章の参考文献

- 1)安井平司, 澤武一: 粗粒ダイヤモンド砥石によるファインセラミックの超平滑研削, 精密工学会誌, 70, 6(2004)848.
- 2)安井平司, 澤武一: 粗粒ダイヤモンド砥石によるファインセラミックの超平滑研削ー研削油剤の効果(続報)ー, 精密工学会誌, 70, 11(2004)1423.
- 3)安井平司, 有野芳弘, 松永邦夫: 粗粒ダイヤモンド砥石によるファインセラミックの延性モード高平滑研削(第1報)ー粒度#140のメタルボンドダイヤモンド砥石による延性モード研削ー, 精密工学会誌, 63, 9(1997)1270.
- 4)安井平司, 山崎豪: 粗粒ダイヤモンド砥石によるファインセラミックスの超平滑研削の可能性, 精密工学会誌, 69, 1(2003)115.
- 5)安井平司: 研摩レス超平滑研削法の開発(第1報)ーその考え方とー, 二の実験的検討ー, 精密工学会誌, 69, 12(2003)1713.

## 第5章 各種ファインセラミックの高平滑延性モード研削仕上面に及ぼす研削油剤の効果と影響

### 5.1 緒言

ファインセラミックは、高硬度、低熱膨張率、低熱伝導率、高耐熱性、高耐食性、高縦弾性係数、高絶縁性など工業的に優れた特性を持つ構造用材料であり、電気・電子機器、機械部品、自動車部品、および医療用機械器具など幅広く利用されている。

しかしながら、ファインセラミックは縦弾性係数が高いにも関わらず、引っ張り方向の強度信頼性を求められる構造用主要部品としては余り使用されていない傾向にある。これは、ファインセラミックは脆性材料であり、研削加工中に生じる微小クラック、残留応力、表面粗さ等に起因して、引張または曲げ方向の強度が低いためである。また、残留応力や微小クラックなどの加工変質層が光学的特性を劣化させるなどの指摘もあり、こういった加工品質をはじめとする問題点が未だ数多く残されており、構造材料としての広範な利用の妨げとなっている。

また、ガラスは透明性、化学的安定性、成形性、硬度等の特色を活かした利用が進められ、なかでも光学ガラスは、光ファイバーや光導波路、ハードディスク基板、電子部品等に採用されており、基幹産業とも言えるエレクトロニクス分野の技術革新を支える先端材料の一つである。

近年では、光学部品に要求される精度が、短波長光学部品に代表されるように極めて高くなってきており、多種多様な形状の光学部品に対して、微細な機能性構造部品を超精密に生産する超精密研削加工の必要性が生じている。

このように、これら高品位な構造材料、機能性材料の特性を十分有効に活かした部品とするためには、要求される形状寸法精度・仕上面粗さで、精密に加工する必要がある。ファインセラミックやガラスの広範な主要機械構造用部品への適用のためには、より高品位な研削加工技術が非常に重要である。

このような背景から、第4章では、超平滑研削法を炭化けい素セラミックに適用し、超平滑延性モード研削面に及ぼす研削油剤の影響を検討した。そして、研削油剤が仕上面性状に強い影響を与えることを確認し、良好な超平滑延性モード研削面を得るためには、適切な研削油剤の選択が必要不可欠であることが明確になった。

本章では、開発した超平滑研削法の実用化を目的に、様々な工作物への適用と研削仕上面の高平滑化・高能率化・高除去速度化の取り組みとして、ファインセラミックHIPSN、 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Tic}$ 、およびガラスの平面研削加工に超平滑研削加工を適用し、超平滑延性モード研削面に及ぼす研削油剤の効果と影響について、実験的に検討し、究明した。



## 5.2 実験装置および実験方法

### 5.2.1 実験方法および条件

実験は、第4章で記した方法と同様である。使用した研削盤は、NC横軸角テーブル形高精度平面研削盤Ultra Micro Grinder(UMS-100不二越機械製)を用いた。実験に用いた工作物は、ファインセラミックには、HPSC, HIPSN,  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiC}$ , およびガラスである。研削油剤は、砥石の研削方向前方を1/4程度側面から挟み込んだノズルを製作し、研削点近傍に供給している。今回の実験で使用した研削油剤は、第3章と同様に、3種類のソリュブルタイプである。各研削油剤の成分は、アニオン界面活性剤を主体としたタイプT1、グリコールと脂肪酸アミン塩を主体としたタイプT2、そして、グリセリンを主体としたタイプT3である。研削油剤の供給量は、12 l/minとし、希釈は水道水で行った。なお、実験中には、適宜形直し・目直しを行い、砥石作業面の一定化に努めている。研削後の工作物仕上面は、微分干渉顕微鏡および走査型電子顕微鏡(SEM)で観察し、仕上面粗さは、光干渉式非接触高精度表面形状測定機(WYKO 3D)、原子間力顕微鏡(AFM)で測定した。最大高さ仕上面粗さ表記は、JIS B 0601(2001)に基づき $R_z$ としている。仕上面の硬さ測定には、微小硬度計(島津製作所製DUH-200)を用いた。また、研削加工中における研削抵抗は、半導体ゲージを貼付した弾性八角形リング動力計で測定した。表5.1に、超平滑研削実験条件を示す。

表 5.1 超平滑研削実験条件表

工作物		HIPSN, $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiC}$ , Glass Length $\times$ Width: 10mm $\times$ 10mm
砥石		SD140Q50M Do $\times$ B $\times$ Di ; $\phi$ 100 $\times$ 6 $\times$ 40
研削方法		Ultra-smoothness grinding
砥石周速度 : $V_g$		12m/s(Glass) , 20m/s
研削方向直角方向送り量 : $f_{Gn}$		10 $\mu$ m/rev
研削方向直角方向送り速度 : $v_{wn}$		0.38mm/s(Glass) , 0.63mm/s
研削方向平行方向間欠送り量 : $f_p$		10 $\mu$ m, 30 $\mu$ m
砥石切込み量: $t$		5 $\mu$ m
研削油剤	種類	Soluble type T1, T2, T3
	希釈倍率	1/10, 1/30, 1/50, 1/100, Water
	供給量	12 l/min
	温度	20 $^{\circ}$ C

### 5.3 実験結果および考察

#### 5.3.1 粗粒ダイヤモンド砥石による超平滑研削実験(HIPSN)の場合

##### 5.3.1-1 研削油剤の種類が高平滑延性モード研削仕上面に及ぼす影響

図5.1に、乾式研削および、研削油剤T1, T2, T3の50倍希釈液を用いて、超平滑研削法でHIPSNを湿式研削した場合の仕上面を比較して示す。詳細な超平滑研削条件は、図中に示す。図より、乾式研削の場合には、一部延性モード研削仕上面が観察されるが、仕上面のほとんどが、脆性破壊痕および熱的な熔融状態となっており、大きな凹凸面となっていることがわかる。一方、各研削油剤を用いた研削仕上面は、いずれの場合も、研削条痕がほとんど観察されず、ほぼ延性モード研削面である。この結果から、HIPSNの高平滑延性モード研削加工には、HPSC同様、研削油剤は必要不可欠と言える。特に、研削油剤T1の場合には、脆性破壊痕はほとんど見られず、仕上面全面が高平滑な延性モード研削面となっているのが伺え、超平滑研削法の有用性が確認できる。しかし、研削油剤T2では、 $3\mu\text{m}$ 以下の微小な脆性破壊痕が幾分か発生し、さらに、研削油剤T3では、大きさが $10\mu\text{m}$ 以下の脆性破壊痕が相当発生している。この結果は、第3章図3.24で示したブレンジ研削の場合と同じ傾向であるが、研削油剤T2の場合、超平滑研削の場合の方が、

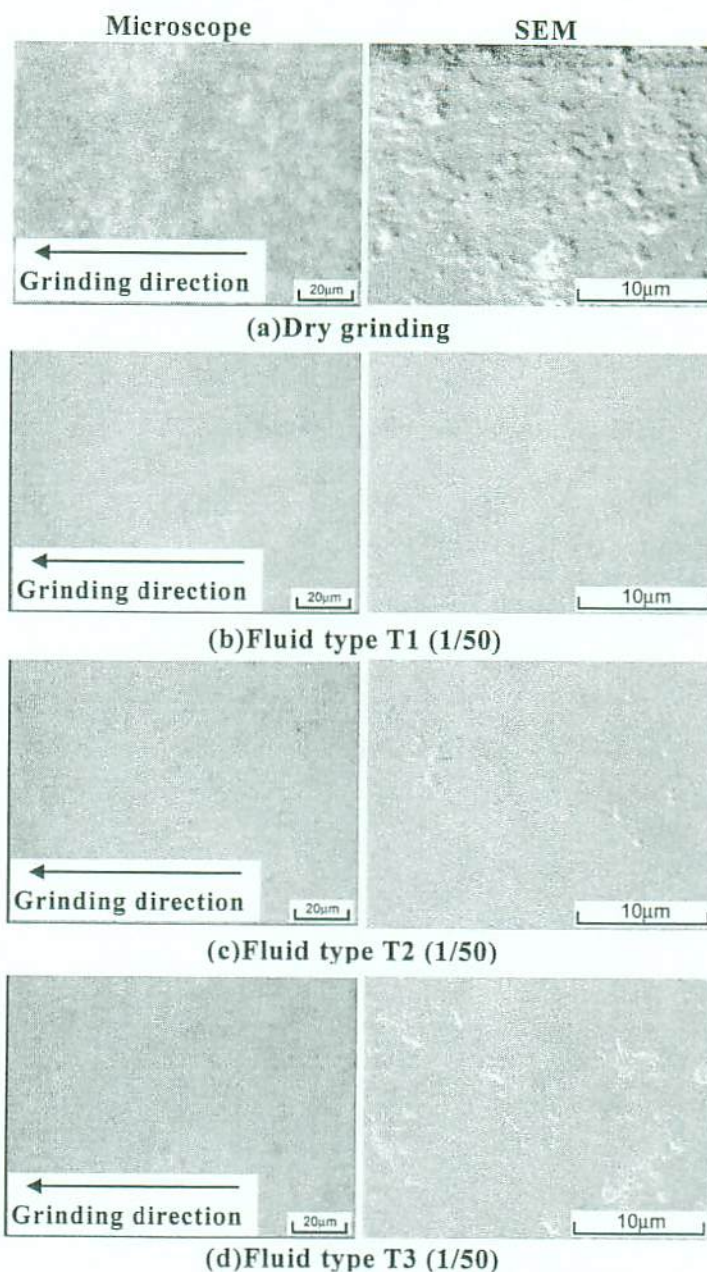


図 5.1 乾式研削および T1,T2,T3 の 3 種類の研削油剤を 50 倍に希釈して、HIPSN を超平滑研削した場合の仕上面の比較

[ $V_g=20\text{m/s}$ ,  $f_{Gn}=10\mu\text{m/rev}$  ( $v_{wn}=0.63\text{mm/s}$ )  
 $f_p=30\mu\text{m}$ ,  $t=5\mu\text{m}$ , Soluble type(1/50)12 l/min]

プランジ研削よりも幾分脆性破壊痕が少なくなっている。先に示したHPSCの場合には、逆に、超平滑研削の方がプランジ研削よりも、脆性破壊痕が幾分多くなっており、セラミックの種類により、超平滑研削現象が異なることが考えられる。上述のようにセラミックの種類により、研削温度に大きな違いがあることを始め、今後、超平滑研削法の研削現象をさらに詳細に検討する必要があると考えている。いずれにしても、このように、同じ研削条件で研削を行っても、研削油剤の種類により、仕上面に生成される脆性破壊痕の数と大きさが異なることから、HIPSNの場合にも、HPSCと同様、研削油剤の組成・成分が、高平滑延性モード研削仕上面に与える影響が大きいと言える。

図5.2に、図5.1に示したT1, T2, T3の3種類の研削油剤を50倍に希釈して、HIPSNを超平滑研削した場合の、研削油剤の種類と法線研削抵抗 $F_n$ 、接線研削抵抗 $F_t$ 、研削抵抗比 $F_t/F_n$ の関係を示す。また、参考のために、先に示したHPSCの場合における $F_n$ 、 $F_t$ と $F_t/F_n$ を比較して示す。図より、HIPSNの超平滑研削における湿式研削の法線研削抵抗 $F_n$ 、接線研削抵抗 $F_t$ は、第3章図3.23に示すプランジ研削の研削抵抗に比較すると、1/3弱程度と小さな値である。また、研削油剤T1の法線研削抵抗 $F_n$ が最も低く、次いで、T2, T3の順で高くなっており、図3.23で示したプランジ研削の場合とは、逆の順序になっている。図5.1で示した、仕上面の観察結果からは、研削油剤T3の脆性破壊痕が最も多く、研削抵抗 $F_n$ 、 $F_t$ が低くなる脆性モード研削状態を示す。しかし、T3の法線研削抵抗 $F_n$ は最も高くなっており、法線研削抵抗 $F_n$ に、脆性破壊状態が強いことの影響は見られない。このことに加え、超平滑研削

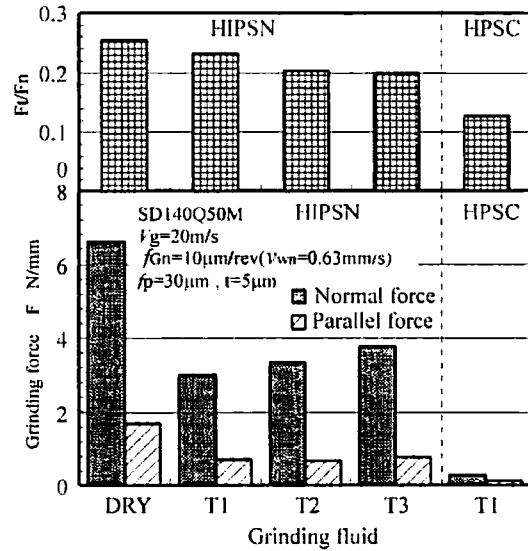


図 5.2 超平滑研削法で HIPSN を T1,T2,T3 の 3 種類の研削油剤を用いて湿式研削した場合の研削抵抗  $F_n$ ,  $F_t$  および研削抵抗比  $F_t/F_n$  の比較  
 $[V_g=20\text{m/s}, f_{Gn}=10\mu\text{m/rev}(v_{wn}=0.63\text{mm/s})$   
 $f_p=30\mu\text{m}, t=5\mu\text{m}, \text{Soluble type}(1/50)12\text{ l/min}]$

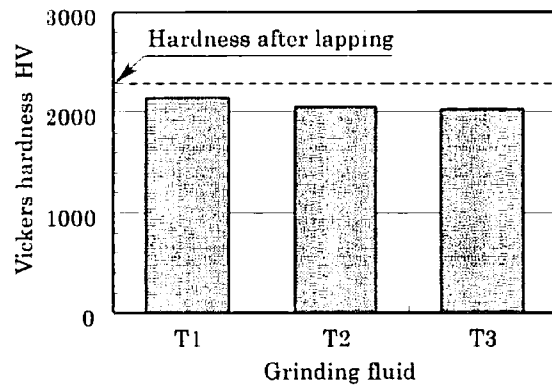


図 5.3 超平滑研削で HIPSN を T1,T2,T3 の 3 種類の研削油剤を用いて湿式研削した場合の仕上面表層硬さの比較  
 $[V_g=20\text{m/s}, f_{Gn}=10\mu\text{m/rev}(v_{wn}=0.63\text{mm/s})$   
 $f_p=30\mu\text{m}, t=5\mu\text{m}, \text{Soluble type}(1/50)12\text{ l/min}]$

プランジ研削の研削抵抗に比較すると、1/3弱程度と小さな値である。また、研削油剤T1の法線研削抵抗 $F_n$ が最も低く、次いで、T2, T3の順で高くなっており、図3.23で示したプランジ研削の場合とは、逆の順序になっている。図5.1で示した、仕上面の観察結果からは、研削油剤T3の脆性破壊痕が最も多く、研削抵抗 $F_n$ 、 $F_t$ が低くなる脆性モード研削状態を示す。しかし、T3の法線研削抵抗 $F_n$ は最も高くなっており、法線研削抵抗 $F_n$ に、脆性破壊状態が強いことの影響は見られない。このことに加え、超平滑研削

法の研削抵抗 $F_n$ ,  $F_t$ が、プランジ研削法に比べ、1/3弱程度とかなり小さく、研削抵抗 $F_n$ ,  $F_t$ に摩擦への影響が大きくなることが考えられる。これらのことから、HIPSNの超平滑研削の場合も、HPSCの場合と同様、研削油剤T1, T2, T3の順で潤滑効果が悪く結果的に研削温度が上昇し、砥粒切れ刃と工作物との接触面積が増加した結果、研削油剤T1, T2, T3の順で研削抵抗が高くなったものと考えられる。なお、研削抵抗比 $F_t/F_n$ が、T1, T2, T3の順で低くなるのには、脆性破壊痕がその順で増加することが影響していると考えられる。

図5.3に、図5.1で示したT1, T2, T3の3種類の研削油剤を50倍に希釈して、HIPSNを超平滑研削した場合の仕上面表層硬さを測定した結果を示す。硬さの結果は、10ヶ所測定した平均値をデータとしている。なお、測定は、脆性破壊痕を避けて行っている。また、参考のためにHIPSNを適当な条件でラッピング加工した面の硬さも示した。図より、いずれの研削油剤ともに、ラッピング加工面硬さよりも低くなっており、その低下率は、研削油剤タイプT1が最も小さく、T3が最も大きい。図4.20に示した研削抵抗の結果では、研削油剤タイプT3の研削抵抗 $F_n$ ,  $F_t$ が最も大きいことから、研削点温度が最も高くなっていると考えられ、このような工作物表面硬さの低下には、工作物表面の研削温度上昇による軟化が影響していると思われる。



### 5.3.1-2 研削油剤希釈倍率が高平滑延性モード研削仕上面に及ぼす影響

図5.4に、前項で最も良好な延性モード研削仕上面が得られた研削油剤T1を用い、希釈倍率を10倍、30倍、50倍、100倍および参考のための水道水のみでHIPSNを超平滑研削法で湿式研削した場合の仕上面を微分干渉顕微鏡およびSEMで観察した結果を示す。詳細な超平滑研削条件は、図中に示す。図より、研削油剤希釈倍率が10倍および50倍の場合に、研削仕上面に脆性破壊痕が比較的多く発生していることがわかる。一方、研削油剤希釈倍率100倍では、脆性破壊痕がほとんど見られず、良好な延性モード研削仕上面となっており、水道水のみによる湿式研削の場合には、若干脆性破壊痕が発生していることがわかる。この結果より、HIPSNの超平滑研削の場合には、研削油剤希釈倍率100倍の時に、最も良好な延性モード研削仕上面が得られることが確認できる。これは、HIPSNの場合には、熱伝導率が低いため、研削熱が溜まりやすく、研削油剤の潤滑効果よりも、冷却効果の方が大きく作用する方が、良好な延性モード研削となりやすいものと思われる。また、先の図4.20で示したHPSCの場合では、希釈倍率が低い時に、比較的良好な延性モード研削仕上面となったことからわかるように、HPSCとHIPSNでは、材料特性に基づく研削形態が異なることが考えられる。

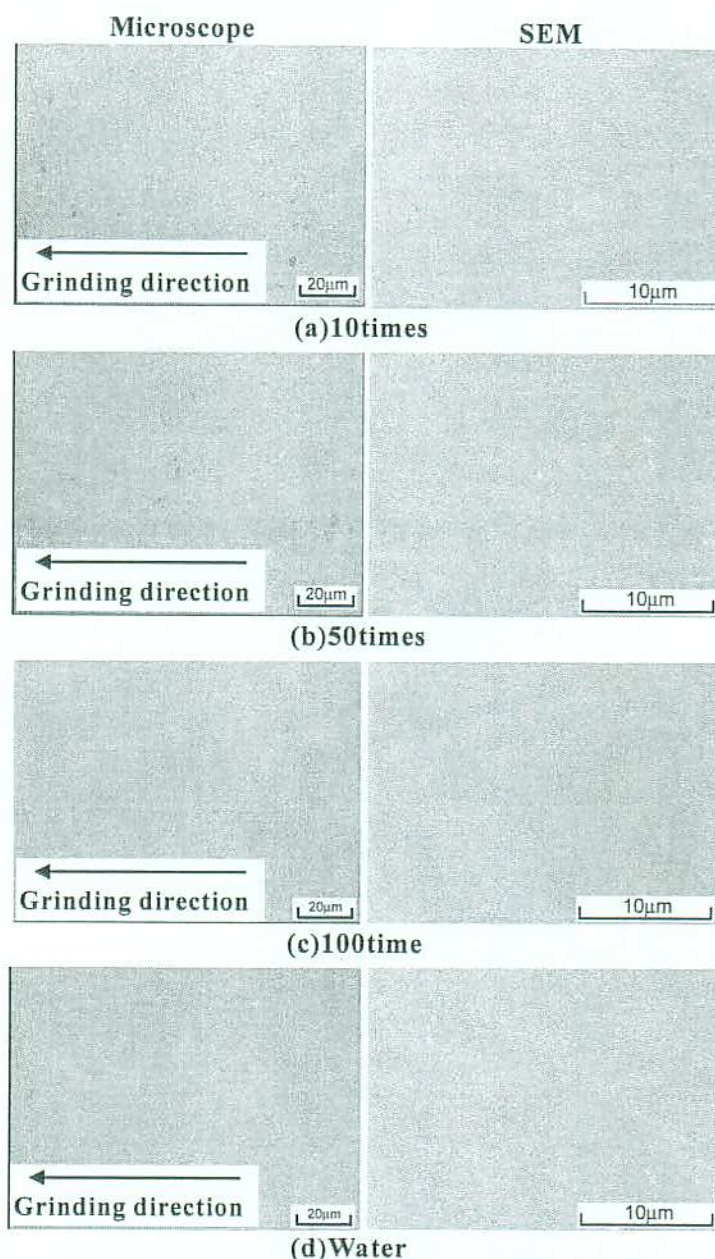


図 5.4 研削油剤 T1 を用いて HIPSN を超平滑研削した場合の、研削油剤希釈倍率  $D_d$  と仕上面性状の比較

[ $V_g=20\text{m/s}$ ,  $f_{Gn}=10\mu\text{m/rev}$  ( $v_{wn}=0.63\text{mm/s}$ )  
 $f_p=10\mu\text{m}$ ,  $t=5\mu\text{m}$ , Soluble type T1 12 l/min]



図5.5に、図5.4で示した研削油剤T1を用い、希釈倍率を10倍、30倍、50倍、100倍および参考のための水道水のための5種類でHIPSNを超平滑研削法で湿式研削した場合の研削油剤希釈倍率Ddと仕上面粗さ $Hr(3D)$ の関係を示す。仕上面粗さは、WYKO 3Dで測定し、 $(Ra)_{3D}$  (算術平均粗さ)と $(Rz)_{3D}$  (最大高さ粗さ)で評価した。なお、測定範囲は、微小範囲粗さ $256\mu m \times 256\mu m$ であり、測定値は、測定した10ヶ所の平均値である。また、参考のために、先に示したHPSCの測定値も比較して示す。図より、HIPSNでは、研削油剤希釈倍率10倍で、最も仕上面粗さが大きくなり、希釈倍率100倍まで、希釈倍率を高くしていくと仕上げ面粗さは小さくなる。しかし、水道水のための湿式研削の場合には、仕上面粗さは幾分悪くなる。この結果から、HIPSNでは、良い延性モード超平滑面を得るためには、研削油剤希釈倍率を適当な倍率まで大きくして、研削するのが肝要であることがわかった。一方、HPSCでは、先に示したように、希釈倍率100倍程度まで、仕上げ面粗さには大きな差が見られず、水道水のみを用いた超平滑研削では、仕上面粗さが悪化する。このことより、HPSCの場合、100倍以上に希釈倍率を大きくすると、仕上面に悪く影響すると言える。

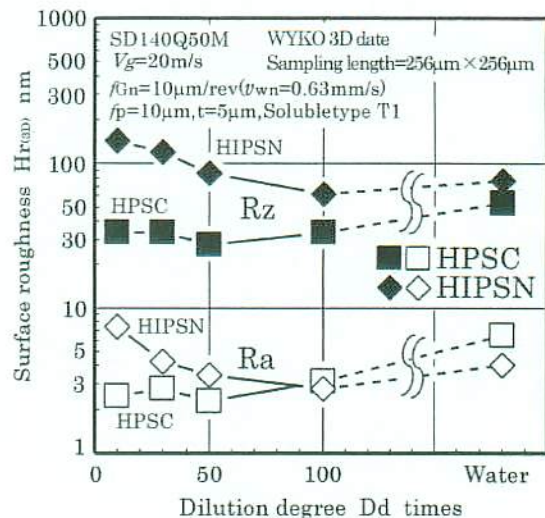


図5.5研削油剤T1を用いてHIPSNを超平滑研削した場合の、研削油剤希釈倍率と研削抵抗 $F_n, F_t, F_t/F_n$ の関係  
[ $V_g=20m/s, f_{Gn}=10\mu m/rev (v_{wn}=0.63mm/s)$   
 $f_p=10\mu m, t=5\mu m, Soluble type T1 12 l/min$ ]

図5.6に、図5.5において、最も良い延性モード研削仕上面粗さとなった研削油剤希釈倍率100倍の場合の仕上面をWYKOで測定した結果を示す。測定範囲は、微小範囲 $256\mu m \times 256\mu m$ である。図よりわかるように、研削条痕はまったく見られず、3次元仕上面粗さは、 $(Rz)_{3D}$ 値で約57nm、 $(Ra)_{3D}$

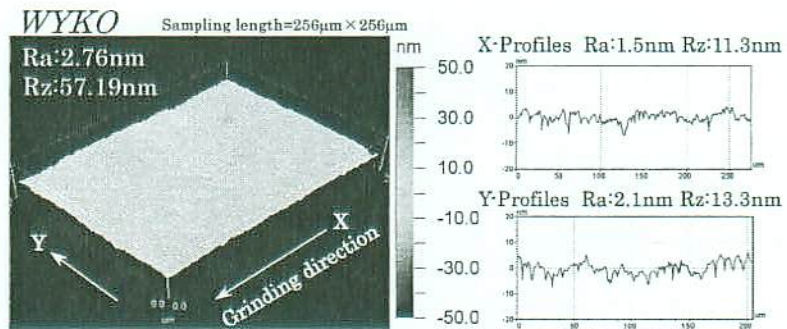
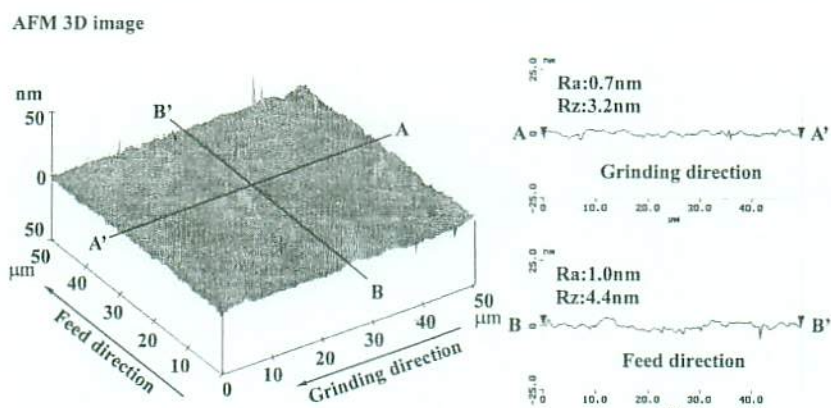


図5.6研削油剤T1 100倍希釈でHIPSNを超平滑研削した場合の仕上面のWYKO観察結果  
[ $V_g=20m/s, f_{Gn}=10\mu m/rev (v_{wn}=0.63mm/s)$   
 $f_p=10\mu m, t=5\mu m, Soluble type T1 12 l/min$ ]

値では、約2.7nmである。さらに、2次元仕上面粗では、研削方向平行仕上面粗さ(図中X-profile)は、 $(Rz)_{2D}$ 値で約11nm、 $(Ra)_{2D}$ 値では、約1.5nmであり、また、研削方向直角



工作物仕上面粗さ(図中Y-profile)は,  $(Rz)_{2D}$ 値で約13nm,  $(Ra)_{2D}$ 値では約2.1nmとなり, 超平滑研削法を平面研削に適用することにより, #140の粗粒ダイヤモンドメタルボン  
ド砥石を用いても, HIPSINで超平滑面に近い表面が得られることが確認できる。



測定範囲【50μm×50μm】

図 5.7 HIPSIN を超平滑研削した場合の仕上面の AFM 観察結果

[ $V_g=20\text{m/s}$ ,  $f_{Gn}=10\mu\text{m/rev}$ ( $v_{wn}=0.63\text{mm/s}$ ),  $f_p=10\mu\text{m}$ ,  $t=5\mu\text{m}$ , Soluble type T1 12 l/min]

図5.7に, 図5.6に示す, HIPSIN仕上面を, 高解像度の原子間力顕微鏡AFMで, さらに詳細に測定した結果を示す. なお, 測定範囲は,  $50\mu\text{m} \times 50\mu\text{m}$ であり, 仕上面に発生する微小穴を反転して示している. 図の3次元画像より, 仕上面の一部に, 深さ数nmの微小穴が観察される. この微小穴は, 脆性的な研削により発生した微小クラックもしくは, HIPSIN自体が持つ気孔ではないかと思われる. しかしながら, この微小穴を含まない2次元仕上面粗さは, 研削方向平行仕上面粗さ(図中A-A'-profile)は,  $(Rz)_{2D}$ 値で約3.2nm,  $(Ra)_{2D}$ 値では, 約0.7nmであり, また, 研削方向直角仕上面粗さ(図中B-B'-profile)は,  $(Rz)_{2D}$ 値で約4.4nm,  $(Ra)_{2D}$ 値では約1.0nmである. ここで, 第4章図4.22に示したHPSC仕上面のAFM観察結果と比較すると, HIPSINの方がHPSCに比べ, 仕上面全体の凹凸が幾分大きいことがわかる. このことは, 2Dプロファイルの仕上面粗さを比較してもわかるように, HIPSINの方がHPSCに比べ,  $Rz$ 値は, ほぼ同じであるが,  $Ra$ 値が幾分大きい. これは, 工作物の機械的特性の差異による研削形態の違い, および材料自体の組成・成分が影響しておるものと思われる. この結果から, 運動転写方式を採用した平面研削加工で, 粗粒である#140のメタルボン  
ドダイヤモンド砥石を用いても, 超平滑研削法を適用することにより, 一部深い脆性破壊痕が発生するものの, HIPSINをラッピングやポリッシング加工に匹敵する超平滑な仕上面に加工し得ることが認められ, 超平滑研削法の有用性が確認できる。

図5.8に, 図5.4で示した研削油剤T1を用い, 希釈倍率を10倍, 30倍, 50倍, 100倍および参考のための水道水のための5種類でHIPSINを超平滑研削法で湿式研削した場合の

法線研削抵抗 $F_n$ 、接線研削抵抗 $F_t$ および、研削抵抗比 $F_t/F_n$ を示す。なお、参考のために、先に示したHPSCの場合も比較して示す。図より、HIPSN、HPSC両セラミックの場合とも、研削油剤希釈倍率を10倍から100倍に高くすると、法線研削抵抗 $F_n$ 、接線研削抵抗 $F_t$ ともに小さくなるのがわかる。これは、HIPSNの場合には、図5.4より、研削油剤希釈倍率が低い時に、脆性破壊痕が多く発生しているにもかかわらず、法線研削抵抗 $F_n$ 、接線研削抵抗 $F_t$ が最も大きくなっている。そして、研削油剤希釈倍率を100倍にすると、脆性破壊痕の無い延性モード研削になる。このことから、低希釈倍率から高希釈倍率になると、研削油剤の冷却効果が高くなるため、研削温度が低下することが考えられる。このため、砥石-工作物接触面内の砥粒切れ刃と工作物との接触面積が減少することによるものと推測される。一方、HPSCの場合には、このような研削温度が低くなることに加えて、図4.20に示した研削仕上面性状の結果から、研削油剤希釈倍率を高くすると、仕上面の脆性破壊痕数が増すことから、加工形態が脆性的になることも影響していると思われる。

図5.9に、図5.4で示した研削油剤T1を用い、希釈倍率を10倍、30倍、50倍、100倍および参考のための水道水のための5種類でHIPSNを超平滑研削法で湿式研削した場合の仕上面表面硬さHVを、適当な条件でラッピング加工した場合と比較して示す。硬さの値は、10ヶ所測定した平均値をデータとしている。なお、測定は、脆性破壊痕を避けて行っている。ま

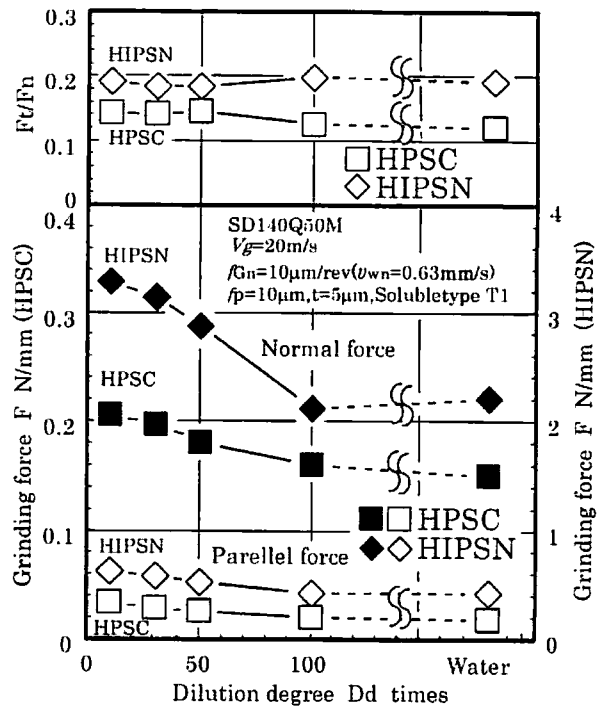


図5.8研削油剤T1を用いてHIPSNを超平滑研削した場合の、研削油剤希釈倍率と研削抵抗 $F_n, F_t, F_t/F_n$ の関係  
[ $V_g=20\text{m/s}, f_{Gn}=10\mu\text{m/rev} (v_{wn}=0.63\text{mm/s})$   
 $f_p=10\mu\text{m}, t=5\mu\text{m}$ , Soluble type T1 12 l/min]

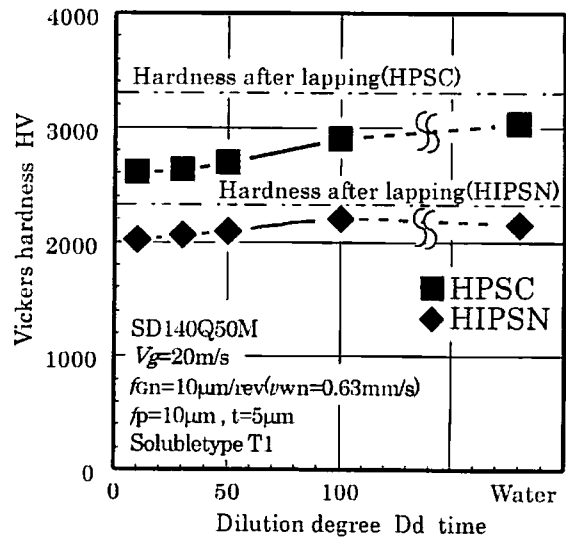


図5.9研削油剤T1を用いてHIPSNを超平滑研削した場合の、研削油剤希釈倍率と仕上面表面硬さの関係  
[ $V_g=20\text{m/s}, f_{Gn}=10\mu\text{m/rev} (v_{wn}=0.63\text{mm/s})$   
 $f_p=10\mu\text{m}, t=5\mu\text{m}$ , Soluble type T1 12 l/min]



た，参考のために，先に示したHPSCも比較して示した．図より，HIPS<sub>N</sub>，HPSC両セラミックとも，いずれの研削油剤希釈倍率においても，ラッピング硬さよりも低くなっていることがわかる．また，研削油剤希釈倍率が低い方が，仕上面表面硬度も低くなっており，研削油剤低希釈倍率の方が，研削温度が高くなることを示し，前述した研削油剤希釈倍率が低い場合に，研削抵抗 $F_n$ ， $F_t$ が大きくなる考察を裏付けるものと考えられる．

### 5.3.2 粗粒ダイヤモンド砥石による超平滑研削実験( $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiC}$ )の場合

#### 5.3.2-1 研削油剤の種類が高平滑延性モード研削仕上面に及ぼす影響

図5.10に、超平滑研削法で $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiC}$ を研削油剤T1, T2, T3の50倍希釈液を用いて湿式研削した場合の仕上面を、微分干渉顕微鏡およびSEMで観察した結果を示す。詳細な超平滑研削条件は図中に示す。図より、各研削油剤の仕上面は、いずれの油剤の場合とも、ほぼ延性モード研削面であり、特に、研削油剤T1の場合には、脆性破壊痕はほとんど見られず、さらに、プランジカット研削法に見られた研削条痕も観察されず、仕上面全面が平滑な延性モード研削面となっているのが伺え、超平滑研削法の有用性が確認できる。SEM画像に見られる気泡のような模様は、脆性破壊痕ではなく、材料自体に存在する気孔であると思われる。この詳細な検討は、次に示す図5.11で行うこととする。一方、研削油剤T2では、研削仕上面に $5\mu\text{m}$ 程度の微

小な脆性破壊痕が幾分発生しており、研削油剤T3では、さらに大きな脆性破壊痕が多数発生しており、SEM画像では、仕上面の一部が溶融したような凹凸面となっていることがわかる。このような結果は、図3.26で示したプランジカット研削の場合と同じである。このように、同じ研削条件でプランジカット研削および超平滑研削を行っても、研削油剤の種類により、仕上面に点在する脆性破壊痕の数と大きさが異なることから、 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiC}$ の場合には、研削油剤の種類、すなわち、研削油剤の組成・成分が、高平滑延性モード研削仕上面に与える影響が大きいものと言える。さらに、 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiC}$ の場合には、プランジ研削法よりも、超平滑研削法の方が、脆性破壊痕の発生する割合が少ない。これは、HIPSと同様の結果であり、一方、HPSCとは、逆の傾向である。

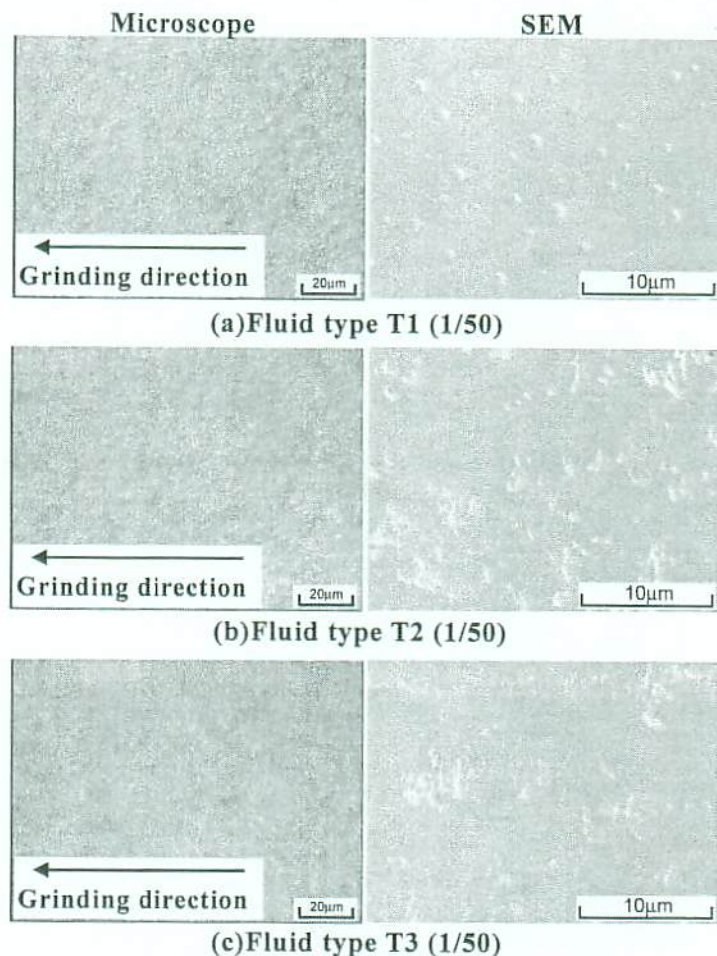


図 5.10 T1,T2,T3 の 3 種類の研削油剤を 50 倍に希釈して、 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiC}$  を超平滑研削した場合の仕上面の比較

[ $V_g=20\text{m/s}$ ,  $f_{Gn}=10\mu\text{m/rev}$  ( $v_{wn}=0.63\text{mm/s}$ )  
 $f_p=30\mu\text{m}$ ,  $t=5\mu\text{m}$ , Soluble type(1/50)12 l/min]



これらの結果は、工作物の機械的特性に起因するものと考えられるが、今後、超平滑研削法の研削メカニズムも含めて詳細に検討する必要があると言える。

AFM 3D image

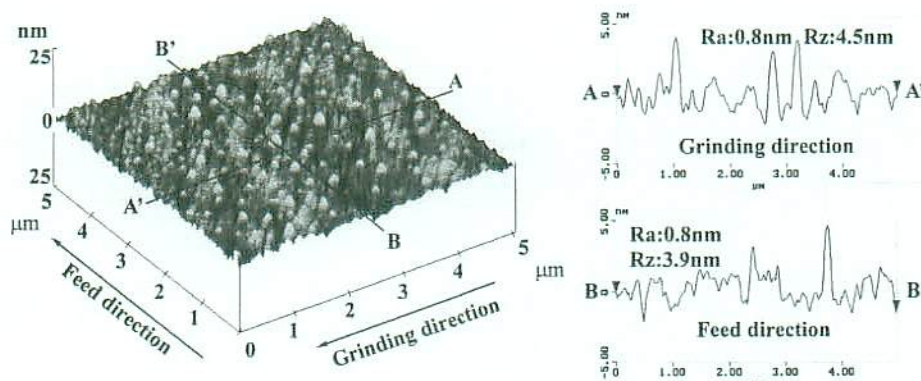


図 5.11  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiC}$  を超平滑研削した場合の仕上面の AFM 観察結果  
 $[V_g=20\text{m/s}, f_{Gn}=10\mu\text{m/rev} (v_{wn}=0.63\text{mm/s}), f_p=30\mu\text{m}, t=5\mu\text{m},$   
 Soluble type T1 12 l/min]

図5.11に、図5.10に示す、研削油剤T1を用いた場合の $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiC}$ 仕上面を、高解像度の原子間力顕微鏡AFMで、詳細に測定した結果を示す。なお、測定範囲は、 $5\mu\text{m} \times 5\mu\text{m}$ であり、仕上面に発生する微小穴を反転して示している。図の3次元画像より、仕上面全体に、深さ5nm程度の微小穴が観察される。この微小穴は、仕上面全体に均一に観察されることから、研削により発生した微小クラックではなく、 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiC}$ 自体が持つ材料的な気孔ではないかと考えられる。なお、この微小穴を含む2次元仕上面粗さは、研削方向平行仕上面粗さ(図中A-A'-profile)は、 $(R_z)_{2D}$ 値で約4.5nm、 $(Ra)_{2D}$ 値では、約0.8nmであり、また、研削方向直角仕上面粗さ(図中B-B'-profile)は、 $(R_z)_{2D}$ 値で約3.9nm、 $(Ra)_{2D}$ 値では約0.8nmである。

図5.12に、T1, T2, T3の3種類の研削油剤を50倍に希釈して、 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiC}$ を超平滑研削した場合の法線研削抵抗 $F_n$ 、接線研削抵抗 $F_t$ と研削抵抗比 $F_t/F_n$ をまとめて示す。なお、参考のため、先に示したHPSC、およびHIPSNの研削

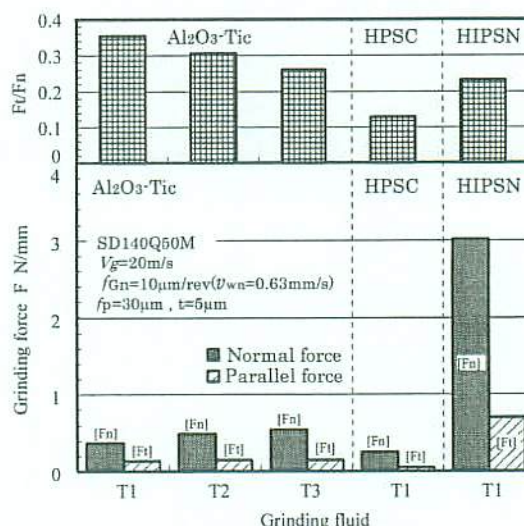


図 5.12 超平滑研削で  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiC}$  を T1,T2,T3 の 3 種類の研削油剤を用いて湿式研削した場合の研削抵抗  $F_n$ ,  $F_t$  および研削抵抗比  $F_t/F_n$  の比較

$[V_g=20\text{m/s}, f_{Gn}=10\mu\text{m/rev} (v_{wn}=0.63\text{mm/s})$   
 $f_p=30\mu\text{m}, t=5\mu\text{m}, \text{Soluble type}(1/50)12 \text{ l/min}]$

油剤T1を用いた湿式研削抵抗 $F_n$ 、 $F_t$ も比較して示す。図より、まず、 $Al_2O_3$ -TiCの各研削油剤の研削抵抗 $F_n$ 、 $F_t$ を比較すると、研削油剤タイプT1が最も低く、次いでT2、T3の順で高くなっている。これは、第3章図3.26で示したプランジ研削時の傾向と同じである。そして、図5.10で示した、仕上面の観察結果からは、研削油剤T3は、研削抵抗 $F_n$ 、 $F_t$ が低くなる脆性モード研削状態を示す脆性破壊痕が最も多い。しかしながら、研削油剤T3の研削抵抗 $F_n$ 、 $F_t$ は高くな

っており、研削抵抗 $F_n$ 、 $F_t$ に、脆性破壊状態が強いことの影響は見られない。このことから、 $Al_2O_3$ -TiCの場合にも、HPSCおよびHIPSNと同様に、研削油剤の種類による研削抵抗 $F_n$ 、 $F_t$ の差異には、研削油剤の潤滑効果が影響しているものと思われる。次に、研削抵抗比 $F_t/F_n$ では、研削油剤T1が最も高く、次いでT2、T3の順で低くなっている。これは、研削油剤T1において、延性モード研削状態が強く作用することに起因するものと言える。すなわち、研削油剤T1では、幾分研削熱により、工作物表面が軟化し、法線研削抵抗 $F_n$ が小さくなると同時に、延性モード臨界砥粒切込み以下で研削が進むことにより、良好な延性モード研削状態になるものと思われる。

また、研削油剤タイプT1を用いた、それぞれのセラミックの湿式研削抵抗 $F_n$ 、 $F_t$ を比較すると、HIPSNにおける研削抵抗 $F_n$ 、 $F_t$ が、HPSCや $Al_2O_3$ -TiCに比べて、約4倍と高い値になっていることがわかる。しかしながら、HIPSNでは、研削油剤タイプT1において、良好な延性モード研削面となっている。これは、3.2.3に示したように、HIPSNは、HPSCおよび $Al_2O_3$ -TiCよりも、延性モード研削臨界砥粒切込み深さが大きいためであると考えられる。

図5.13に、T1、T2、T3の3種類の研削油剤を50倍に希釈して、 $Al_2O_3$ -TiCを超平滑研削した場合の仕上面表層の硬さを測定した結果を示す。硬さ測定は、10ヶ所測定した平均値をデータとしている。なお、測定は、脆性破壊痕を避けて行っている。また、参考のために適当な条件でラッピング加工した面の硬さも比較して示した。図より、いずれの研削油剤ともに、ラッピング加工面硬さよりも幾分低くなっており、その低下率は、研削油剤タイプT1が最も小さく、T3が最も大きいことがわかる。このような仕上面表面硬さの低下には、HPSC、およびHIPSNと同様、研削熱による仕上面の軟化や熱衝撃など仕上面表面層のダメージに起因するものと思われる。

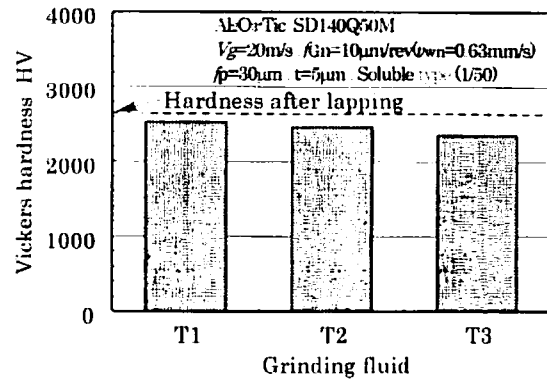


図 5.13 超平滑研削で  $Al_2O_3$ -TiC を T1,T2,T3 の 3 種類の研削油剤を用いて湿式研削した場合の仕上面表層硬さの比較  
 $[V_g=20\text{m/s}, f_{Gn}=10\mu\text{m/rev} (v_{wn}=0.63\text{mm/s})$   
 $f_p=30\mu\text{m}, t=5\mu\text{m}, \text{Soluble type}(1/50) 12\text{ l/min}]$



### 5.3.2-2 研削油剤希釈倍率が高平滑延性モード研削仕上面に及ぼす影響

図5.14に、先に行った実験で、最も良好な延性モード研削仕上面が得られた研削油剤T1を用い、希釈倍率を10倍、30倍、50倍および100倍と変化させて $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiC}$ を超平滑研削法で湿式研削した場合の仕上面を微分干渉顕微鏡とSEMで観察した結果をまとめて示す。また、研削油剤を用いずに、水道水のみで湿式研削した研削仕上面結果も比較して示した。超平滑研削条件は図中に示す。図より、研削油剤希釈倍率Dd 10倍の場合には、脆性破壊痕が小さく、発生数も少ない。一方、研削油剤希釈倍率50倍の場合には、大きさが数 $\mu\text{m}$ 程度の脆性破壊痕が幾分点在し、そして、100倍の場合には、大きさが10 $\mu\text{m}$ 程度の脆性破壊痕が多数発生していることがわかる。さらに、水道水のみでの湿式研削では、仕上面全体に脆性破壊が点在している。このように、 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiC}$ では、研削油剤希釈倍率を高くする、すなわち、研削油剤の濃度を低くすると、脆性破壊痕の発生が多くなり、良好な延性モード研削仕上面

が得られ難いと言える。 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiC}$ では、HIPSNと同様に、熱伝導率が低いため、当初は、希釈倍率が高い方がよいと考えられたが、上記の結果のように、希釈倍率は低い方がよい。これは、 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiC}$ では、熱伝導率が低くても、熱膨張率が極めて低いため、HIPSNとは同様にはならなかったと考えられるが、詳細な検討は今後の課題としたい。

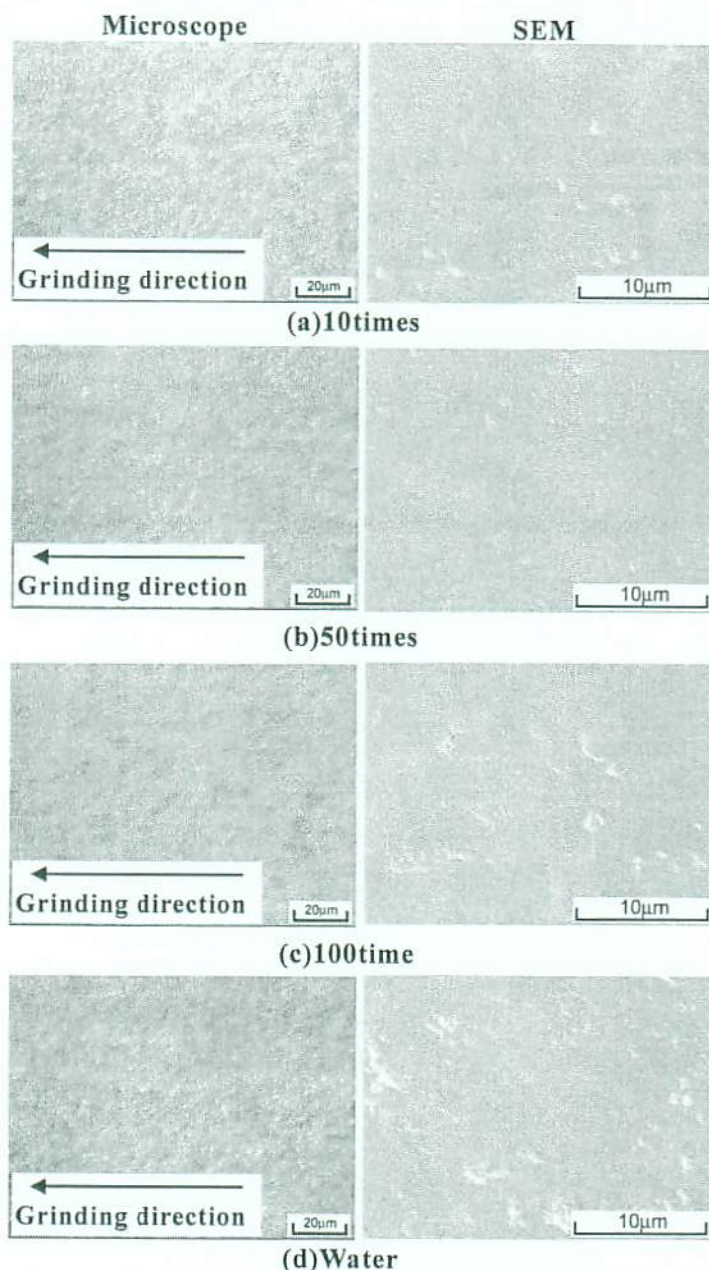


図 5.14 研削油剤 T1 を用いて  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiC}$  を超平滑研削した場合の、研削油剤希釈倍率と仕上面性状の比較

[ $V_g=50\text{m/s}$ ,  $f_{Gn}=10\mu\text{m/rev}$  ( $v_{wn}=1.59\text{mm/s}$ )

$f_p=10\mu\text{m}$ ,  $t=5\mu\text{m}$ , Soluble type T1 12 l/min]



図5.15に、研削油剤希釈倍率を10倍、30倍、50倍および100倍に設定し、超平滑研削法で $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiC}$ を湿式研削した場合の研削油剤希釈倍率と仕上面粗さの関係を示す。仕上面粗さは、WYKO 3Dで測定し、 $(Ra)_{3D}$  (算術平均粗さ)と $(Rz)_{3D}$  (最大高さ粗さ)で評価した。なお、測定値は、10ヶ所測定した平均値である。また、参考のため、先に示したHPSCの場合も比較して示す。図より、研削油剤希釈倍率Ddが10倍において、仕上げ面粗さ $Rz$ 値、および $Ra$ 値ともに最小値となり、研削油剤希釈倍率Ddを高くすると、仕上面粗さが大きくなることがわかる。そして、水道水のみを使用した湿式研削の場合には、

最も仕上面粗さが大きくなる。これは、図5.13に示した仕上面の観察結果からわかるように、脆性破壊痕の発生により、仕上面粗さが大きくなるものと考えられる。

図5.16に、図5.15で示した最もよい研削仕上面粗さとなった研削油剤希釈倍率10倍の仕上面を示す。

測定範囲は、微小範囲 $256\mu\text{m} \times 256\mu\text{m}$ としている。図の3次元画像からわかるように、研削条痕は見られず、 $(Rz)_{3D}$ 値で約25nm、 $(Ra)_{3D}$ 値では、約2nmである。また、2次元仕上面粗さについては、研削方向平行仕上面粗さ(図中X-profile)は、 $(Rz)_{2D}$ 値で約14.7nm、 $(Ra)_{2D}$ 値では、約2.2nmで、研削方向直角工作物仕上面粗さ(図中Y-profile)は、 $(Rz)_{2D}$ 値で約15.3nm、 $(Ra)_{2D}$ 値では2.0nmとなっており、超平滑研削法を平面研削加工に適用することにより、#140の粗粒メタルボンドダイヤモンド砥石を用いても、遊離砥粒加工の仕上面粗さに匹敵する高平滑面に近い表面が得られることがわかる。

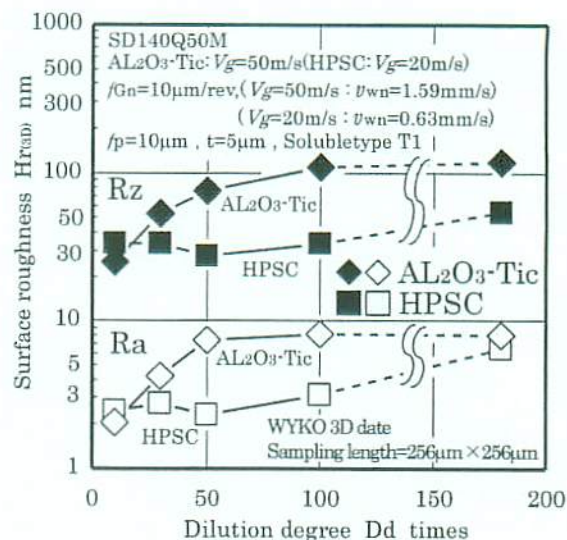


図 5.15 研削油剤 T1 を用いて  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiC}$  を超平滑研削した場合の、研削油剤希釈倍率と仕上面性状の関係

[ $V_g=50\text{m/s}$ ,  $f_{Gn}=10\mu\text{m/rev}$  ( $v_{wn}=1.59\text{mm/s}$ )  
 $f_p=10\mu\text{m}$ ,  $t=5\mu\text{m}$ , Soluble type(1/50)12 l/min]

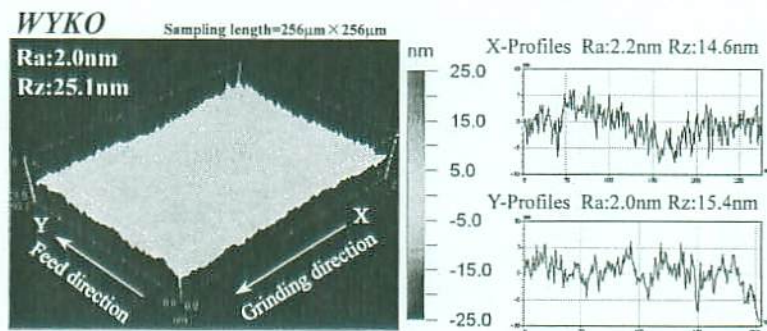
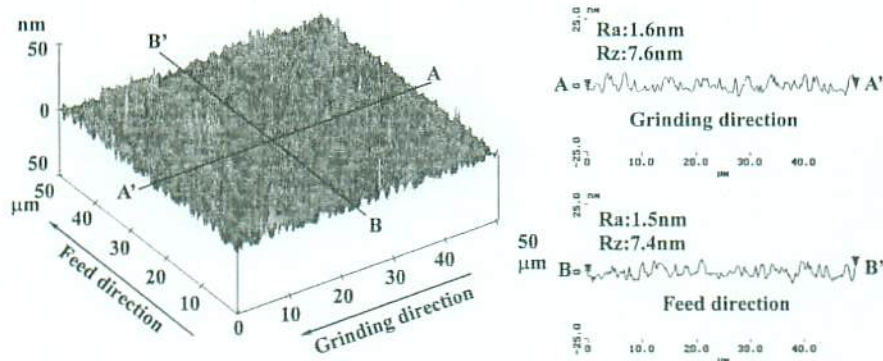


図 5.16 研削油剤 T1 10 倍希釈で  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiC}$  を超平滑研削した場合の仕上面の WYKO 観察結果

[ $V_g=50\text{m/s}$ ,  $f_{Gn}=10\mu\text{m/rev}$  ( $v_{wn}=1.59\text{mm/s}$ )  
 $f_p=10\mu\text{m}$ ,  $t=5\mu\text{m}$ , Soluble type(1/50)12 l/min]

AFM 3D image



測定範囲【50μm×50μm】

図 5.17 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiC を超平滑研削した場合の仕上面の AFM 観察結果  
 $[V_g=50\text{m/s}, f_{Gn}=10\mu\text{m/rev} (v_{wn}=1.59\text{mm/s}), f_p=10\mu\text{m}, t=5\mu\text{m},$   
 Soluble type T1 12 l/min]

図 5.17 に、図 5.16 に示す、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiC 仕上面を、高解像度の原子間力顕微鏡 AFM で、さらに詳細に測定した結果を示す。なお、測定範囲は、50μm×50μm であり、仕上面に発生する微小穴を反転して示している。図の 3 次元画像より、仕上面に若干数 μm の微小穴が観察されるが、この微小穴を含まない 2 次元仕上面粗さは、研削方向平行仕上面粗さ(図中 A-A'-profile)は、(Rz)<sub>2D</sub> 値で約 7.6 nm, (Ra)<sub>2D</sub> 値では、約 1.6 nm であり、また、研削方向直角仕上面粗さ(図中 B-B'-profile)は、(Rz)<sub>2D</sub> 値で約 7.4 nm, (Ra)<sub>2D</sub> 値では約 1.5 nm である。第 4 章 4.22 に示した HPSC の仕上面 AFM 観察結果の 3 次元画像、および 2 次元プロファイルと比較すると、仕上面の凹凸が大きい。これは、工作物の機械的特性が異なることによる延性モード研削加工形態の違い、および結晶粒界など工作物組織の差異に起因するものと考えられる。

図 5.18 に、研削油剤希釈倍率を 10 倍、30 倍、50 倍および 100 倍に設定し、超平滑研削法で Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiC を湿式研削した場合の法線研削抵抗  $F_n$ 、接線研削抵抗  $F_t$ 、および研削抵抗比  $F_t/F_n$  を算出した結果をまとめて示す。参考のために、先の実験で示した HPSC の研削抵抗も同時に示した。図より、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiC の場合には、研削油剤希釈倍率が 10 倍の場合に、幾分研削抵抗  $F_n$ 、 $F_t$  が大きくなり、研削油剤希釈倍率が 50 倍で、研削抵抗  $F_n$ 、 $F_t$  が最も小さくなる。そして、研削油剤希釈倍率が 50 倍以上および水道水のみでの湿式研削では、研削抵抗  $F_n$ 、 $F_t$  が一段と大きくなるのがわかる。これは、図 4.22 で示した研削仕上面観察結果から、研削油剤希釈倍率が 10 倍の場合には、脆性破壊痕が少ない、良好な延性モード研削仕上面が得られ、研削抵抗  $F_n$ 、 $F_t$  が高くなる延性モード状態となっていると考えられる。そして、研削油剤希釈倍率倍では、脆性破壊痕が多数点在していたことから、研削抵抗  $F_n$ 、 $F_t$  が低くなる、脆性モード研削状態である。さ



らに、研削油剤希釈倍率が50倍以上では、研削油剤の潤滑効果が失われ、研削抵抗 $F_n$ 、 $F_t$ が高くなるものと思われる。

図5.19に、研削油剤希釈倍率を10倍、30倍、50倍および100倍に設定し、超平滑研削法で $Al_2O_3$ -TiCを湿式研削した場合の研削油剤希釈倍率 $D_d$ と仕上面表面硬さHVの関係を示す。硬さ測定は、硬さの結果は、10ヶ所測定した平均値をデータとしている。なお、測定は、脆性破壊痕を避けて行っている。また、参考のために適当な条件でラッピング加工した面の硬さ、および先に示したHPSCの結果も比較して示した。図より、両セラミックとも、ラッピング硬さよりも幾分低くなっていることがわかる。そして、 $Al_2O_3$ -TiCでは、研削油剤希釈倍率が10倍から50倍までは、ほとんど変化はなく、研削油剤希釈倍率10倍で若干小さくなっている。そして、研削油剤希釈倍率が高くなると、仕上面表面硬さが低下することがわかる。これは、 $Al_2O_3$ -TiCでは、図5.13で示したように、研削油剤希釈倍率が10倍の場合には、仕上面表面の軟化を伴う延性モード研削仕上面となっており、一方研削油剤希釈倍率が50倍以上の場合には、研削抵抗 $F_n$ 、 $F_t$ が大きく、仕上面全体に脆性破壊痕が発生していることから、仕上面表面層のダメージが大きく、このような研削特性が仕上面表面硬さの低下に影響を与えるものと思われる。

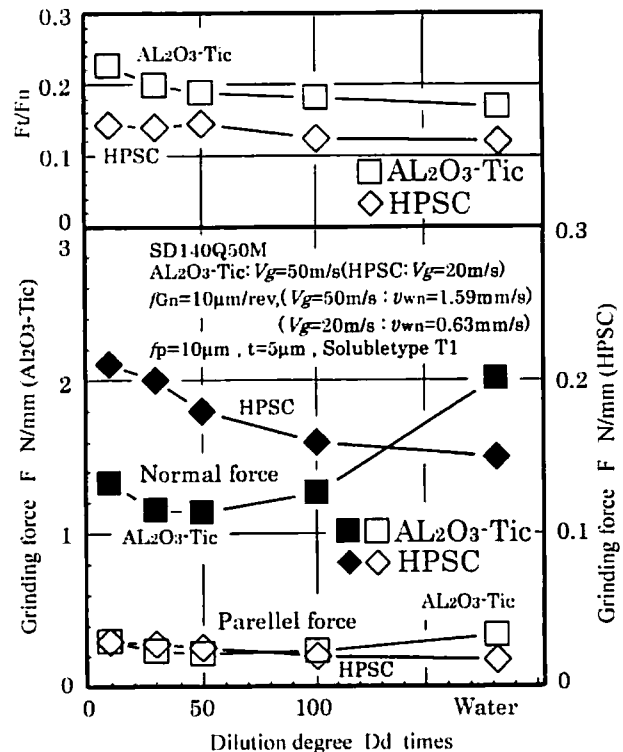


図 5.18 研削油剤 T1 を用いて  $Al_2O_3$ -TiC を超平滑研削した場合の、研削油剤希釈倍率と研削抵抗  $F_n$ 、 $F_t$ 、 $F_t/F_n$  の関係

[ $V_g=50\text{m/s}$ ,  $f_g=10\mu\text{m/rev}$  ( $v_{wn}=1.59\text{mm/s}$ )  
 $f_p=10\mu\text{m}$ ,  $t=5\mu\text{m}$ , Soluble type (1/50) 12 l/min]

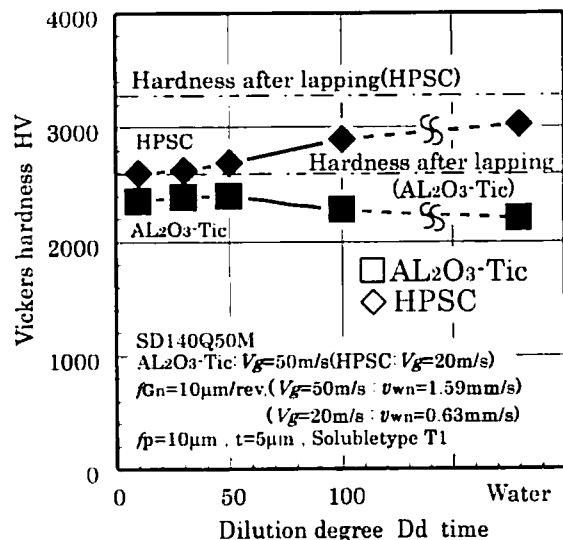


図 5.19 研削油剤 T1 を用いて  $Al_2O_3$ -TiC を超平滑研削した場合の、研削油剤希釈倍率と仕上面表面硬さの関係

[ $V_g=50\text{m/s}$ ,  $f_g=10\mu\text{m/rev}$  ( $v_{wn}=1.59\text{mm/s}$ )  
 $f_p=10\mu\text{m}$ ,  $t=5\mu\text{m}$ , Soluble type (1/50) 12 l/min]



### 5.3.3 粗粒ダイヤモンド砥石による超平滑研削実験(ガラスの場合)

#### 5.3.3-1 研削油剤の種類が高平滑延性モード研削仕上面に及ぼす影響

図 5.20 に、乾式研削および、研削油剤 T1, T2, T3 の 10 倍希釈液を用いて、超平滑研削法でガラスを湿式研削した場合の仕上面を比較して示す。詳細な超平滑研削条件は、図中に示す。図より、乾式研削の場合には、研削仕上面全面が激しい凹凸面となっており、滑らかな延性モード研削仕上面は見られない。一方、各研削油剤を用いた湿式研削仕上面では、研削油剤 T1 の場合で、脆性破壊痕はほとんど見られず、仕上面全面が高平滑な延性モード研削面となっていることがわかる。また、その仕上面には、研削条痕が全く観察されず、超平滑研削法の有用性が確認できる。しかし、研削油剤 T2 では、微小な脆性破壊痕が幾分か発生し、研削油剤 T3 では、さらに多数の脆性破壊痕が発生し、ほとんど延性モード研削仕上面は観察できない。この結果から、ガラスの高平滑延性モード研削仕上面を得るためには、研削油剤の供給が必要不可欠であり、さらに適切な研削油剤の選択が肝要であることがわかる。また、これら研削油剤の種類と研削仕上面の関係は、第 3 章図 3.24 で示したプランジ研削の場合と同じ傾向であるが、研削油剤 T2 および T3 では、超平滑研削法がプランジ研削法の場合に比べて、仕上面に発生す

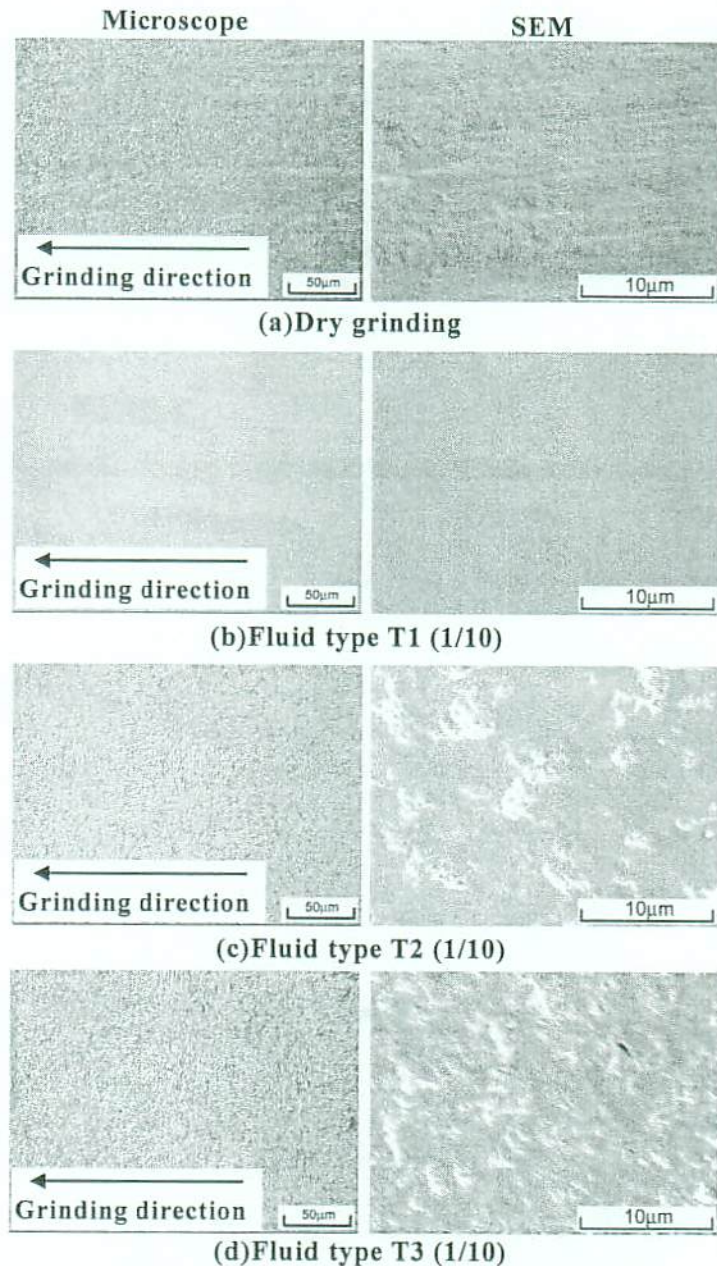


図 5.20 乾式研削および T1,T2,T3 の 3 種類の研削油剤を 10 倍に希釈して、ガラスを超平滑研削した場合の仕上面の比較

[ $V_g=12\text{m/s}$ ,  $f_{Gn}=10\mu\text{m/rev}$  ( $v_{wn}=0.38\text{mm/s}$ )  
 $f_p=10\mu\text{m}$ ,  $t=5\mu\text{m}$ , Soluble type(1/10)12 l/min]

る脆性破壊痕の割合が大きい。これは、先に示した HPSC と同様な傾向であり、一方、HIPSN および  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiC}$  とは、逆の傾向である、これらの結果は、前述したように、工作物の機械的特性に起因するものと考えられるが、今後、超平滑研削法の研削メカニズムも含めて詳細に検討する必要があると言える。

図 5.21 に、図 5.20 に示した乾式研削および、T1, T2, T3 の 3 種類の研削油剤を 10 倍に希釈して、ガラスを超平滑研削した場合の、研削油剤の種類と法線研削抵抗  $F_n$ 、接線研削抵抗  $F_t$ 、研削抵抗比  $F_t/F_n$  の関係を示す。ガラスの超平滑研削における法線研削抵抗  $F_n$ 、接線研削抵抗  $F_t$  は、第 3 章図 3.26 に示すプランジ研削の研削抵抗  $F_n$ 、 $F_t$  と比較すると、1/10 程度小さな研削抵抗値となっている。また、乾式研削の場合には、湿式研削と比較し、約 2 倍程度大きな研削抵抗  $F_n$ 、 $F_t$  値であることがわかる。

次に、湿式研削の場合における研削抵抗  $F_n$ 、 $F_t$  をそれぞれ比較すると、研削油剤 T1 の法線研削抵抗  $F_n$  が最も高く、次いで、T2, T3 の順で低くなっている。また、研削抵抗比  $F_t/F_n$  においても、研削油剤 T1 で最も大きく、次いで、T2, T3 の順で低くなっている。これは、図 5.20 で示した研削仕上面の観察結果から、研削油剤 T1 では、研削抵抗  $F_n$ 、 $F_t$ 、研削抵抗比  $F_t/F_n$  が高くなる延性モード研削状態であり、延性モード研削臨界砥粒切込み深さで良好に研削が行われたと考えられ、延性モード研削では、工作物の軟化を伴うことから、砥粒切れ刃と工作物の接触面積が大きくなり、法線研削抵抗  $F_n$ 、 $F_t$  が大きくなるものと考えられる。一方、研削油剤 T3 では、研削仕上面に脆性破壊痕が多く、特に研削油剤 T3 の場合には、非常に多数発生している。このことから、延性モード研削臨界砥粒切込み深さで以上の研削状態であったと考えられ、砥粒切込み深さは大きくなるものの、加工形態が脆性モード研削状態となり、研削抵抗  $F_n$ 、 $F_t$ 、研削抵抗比  $F_t/F_n$  が小さくなるものと考えられる。

ここで、超平滑研削法における、研削油剤の種類と研削抵抗  $F_n$ 、 $F_t$  の傾向は、図 3.23 で示したプランジ研削の場合とは、逆の傾向になっている。具体的には、プランジ研削法では、研削油剤 T3 の場合、研削仕上面に脆性破壊痕が多数発生し、研削抵

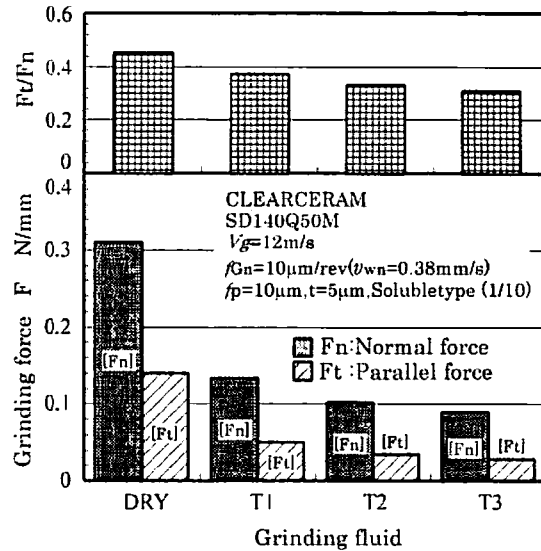


図 5.21 乾式研削および T1, T2, T3 の 3 種類の研削油剤を 10 倍に希釈して、ガラスを超平滑研削した場合の研削抵抗  $F_n$ ,  $F_t$  および研削抵抗比  $F_t/F_n$  の比較  
[ $V_g=12\text{m/s}$ ,  $f_{Gn}=10\mu\text{m/rev}$  ( $v_{wn}=0.38\text{mm/s}$ )  
 $f_p=10\mu\text{m}$ ,  $t=5\mu\text{m}$ , Soluble type (1/50) 12 l/min]

抗  $F_n$ ,  $F_t$  を小さくする脆性モード研削状態にも関わらず、研削抵抗  $F_n$ ,  $F_t$  が最も大きくなり、一方、研削油剤 T1 の場合には、脆性破壊痕がない延性モード仕上面にも関わらず、研削抵抗  $F_n$ ,  $F_t$  が最も小さくなった。これは、プランジ研削では、超平滑研削法に比べ、仕上面に発生する脆性破壊痕が極めて少ないことや研削抵抗  $F_n$ ,  $F_t$  が 10 倍程度大きくなること、そして、研削油剤の潤滑効果が研削抵抗に大きく影響することに起因するものと考えられる。

図 5.22 に、図 5.20 で示した乾式研削および、T1, T2, T3 の 3 種類の研削油剤を 10 倍に希釈して、ガラスを超平滑研削した場合の仕上面表層硬さを測定した結果を示す。硬さの結果は、10 ヶ所測定した平均値をデータとしている。なお、測定は、脆性破壊痕を避けて行っている。図より、いずれの研削油剤ともに、ラッピング加工面硬さよりも相当低くなっていることがわかる。特に、乾式研削の場合には、ラッピング硬さよりも 1/3 程度低くなっている。図 5.18 に示しように、乾式研削の場合の研削仕上面表面は、研削熱で熔融したような激しい凹凸面となっており、非常に過酷な研削状態であることが予測できる。この研削熱により、ガラスの表面硬さが極めて低下したものと考えられる。また、研削油剤を使用した湿式研削の場合においても、ラッピング硬さよりも 1/2 程度低くなっていることがわかる。そして、その傾向は、研削油剤 T1 が最も小さく、T3 が最も大きくなる。研削油剤 T1 において、最も仕上面表面硬さが小さくなるのは、図 5.20 の観察結果からわかるように、仕上面表面の軟化を伴う、延性モード研削面となっていることに起因すると思われる。しかしながら、前述したように、いずれの湿式研削の場合においても、ラッピング硬さよりも 1/2 程度低くなっており、研削熱が大きく影響しているものと推察される。これは、今回用いたガラスの熱伝導率が小さく、研削加工時にガラス表面に熱が溜まり易く、熱膨張が発生し、研削点では、設定切込み深さ以上の切込み深さとなり、研削熱が極めて大きくなるものと思われる。

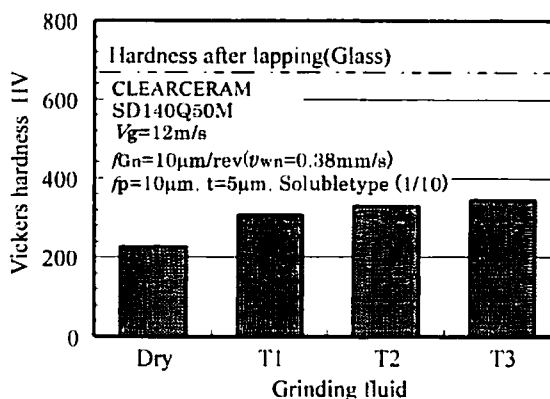


図 5.22 超平滑研削でガラスを T1,T2,T3 の 3 種類の研削油剤を用いて湿式研削した場合の仕上面表層硬さの比較  
 $V_g=12\text{m/s}$ ,  $f_{Gn}=10\mu\text{m/rev}$  ( $v_{wn}=0.38\text{mm/s}$ )  
 $f_p=10\mu\text{m}$ ,  $t=5\mu\text{m}$ , Solubletype (1/50)  
 [Ultra-smoothness grinding]



### 5.3.3-2 研削油剤希釈倍率が高平滑延性モード研削仕上面に及ぼす影響

図 5.23 に、前項で最も良好な延性モード研削仕上面が得られた研削油剤 T1 を用い、希釈倍率を 10 倍、30 倍、50 倍、100 倍および参考のための水道水のみでガラスを超平滑研削法で湿式研削した場合の仕上面を微分干渉顕微鏡および SEM で観察した結果を示す。詳細な超平滑研削条件は、図中に示す。図より、研削油剤希釈倍率が 10 倍の場合には、脆性破壊痕が見られず、研削条痕も観察されない、極めて良好な延性モード高平滑研削仕上げ面となっていることがわかる。一方、研削油剤希釈倍率 50 倍の場合では、研削仕上面に大きさが  $5\mu\text{m}$  程度の脆性破壊痕が比較的多く発生していることがわかる。そして、研削油剤希釈倍率 100 倍では、さらに多くの脆性破壊痕が存在し、水道水のみによる湿式研削の場合では、研削仕上面全面に脆性破壊痕が発生し、延性モード研削面は全く見られない。この結果より、ガラスの超平滑研削において、今回行った実験条件下では、研削油剤希釈倍率を小さくする、すなわち研削油剤の濃度を高くすることにより、脆性破壊痕の発生を抑制でき、良好な延性モード高平滑仕上面が得られ易くなることがわかった。

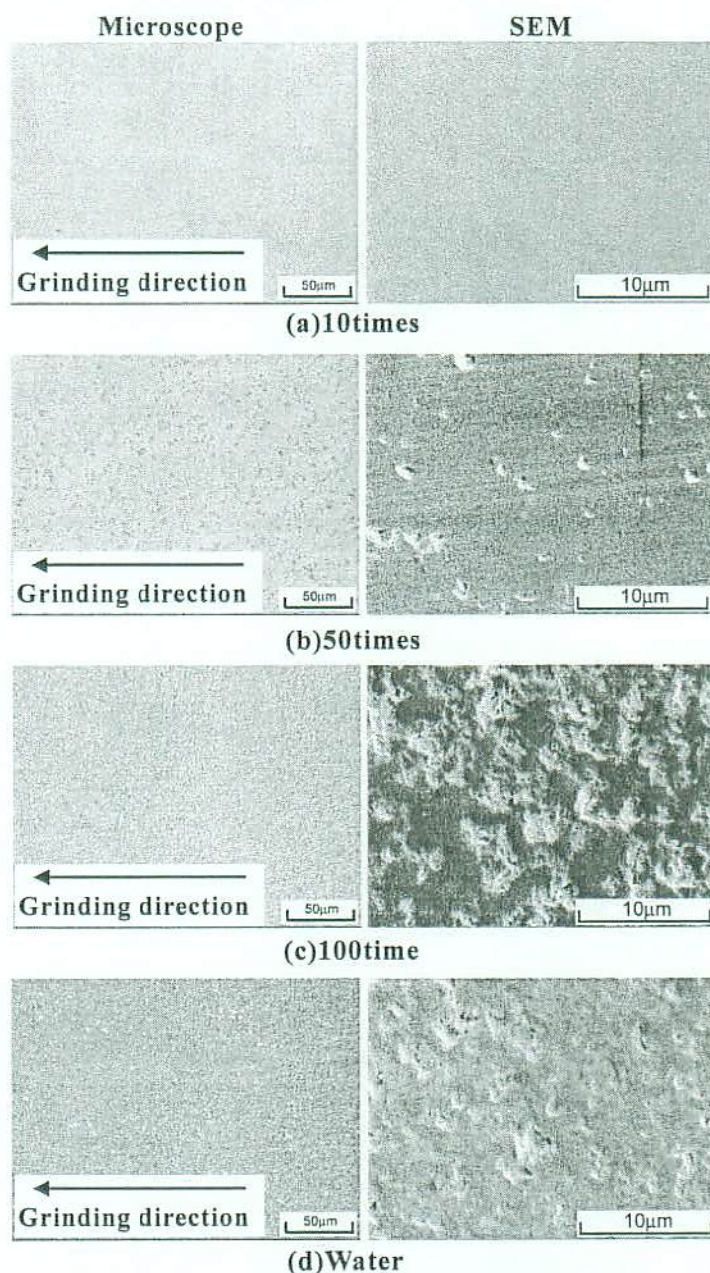


図 5.23 研削油剤 T1 を用いてガラスを超平滑研削した場合の、研削油剤希釈倍率と仕上面性状の比較  
 $[V_g=12\text{m/s}, f_{Gn}=10\mu\text{m/rev} (v_{wn}=0.38\text{mm/s})$   
 $f_p=10\mu\text{m}, t=5\mu\text{m}, \text{Soluble type T1 } 12\text{ l/min}]$



図5.24に、図5.23で示した研削油剤 T1を用い、希釈倍率を10倍、30倍、50倍、100倍および参考のための水道水のための5種類でガラスを超平滑研削法で湿式研削した場合の研削油剤希釈倍率 Dd と仕上面粗さ Hr(3D) の関係を示す。仕上面粗さは、WYKO 3Dで測定し、(Ra)3D (算術平均粗さ) と (Rz)3D (最大高さ粗さ) で評価した。なお、測定範囲は、微小範囲粗さ  $256\mu\text{m} \times 256\mu\text{m}$  であり、測定値は、測定した10ヶ所の平均値である。図より、研削油剤希釈倍率10倍で、最も仕上面粗さが小さく、研削油剤希釈倍率100倍まで高くすると、仕上面粗さが大きくなる。そして、水道水

のみの湿式研削の場合には、さらに、仕上面粗さは悪くなる。これは、図5.23で示した研削仕上面観察結果から、研削油剤希釈倍率が高くなると、仕上面に、脆性破壊痕が点在し、仕上面粗さが悪くなると考えられる。この結果から、ガラスでは、良い超平滑面粗さを得るためには、研削油剤希釈倍率を低くすることが肝要であることがわかる。

図5.25に、図5.24において、最も良い延性モード研削仕上面粗さとなった研削油剤希釈倍率10倍の場合の仕上面、および研削油剤を用いた湿式研削で最も仕上面粗さが大きくなった研削油剤希釈倍率100倍の仕上面をWYKOで測定した結果を示す。測定範

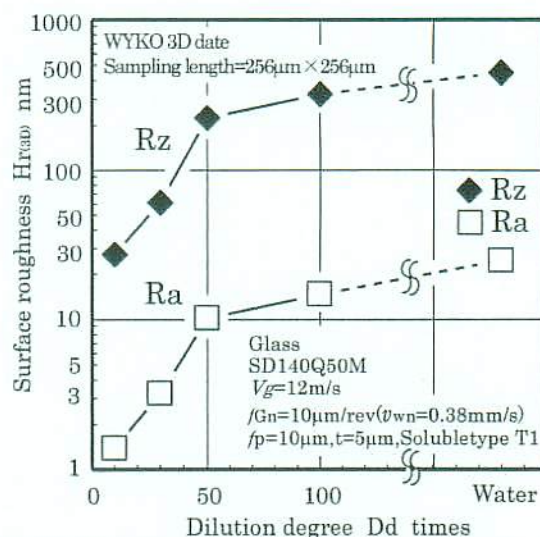
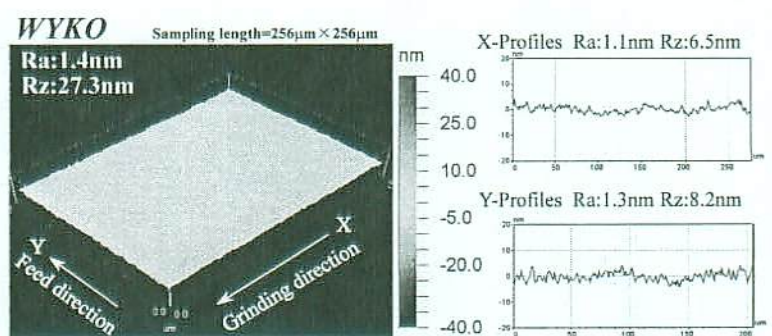
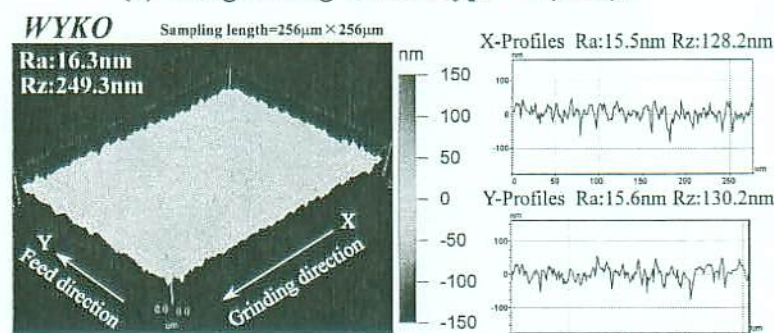


図 5.24 研削油剤 T1 を用いてガラスを超平滑研削した場合の、研削油剤希釈倍率と仕上面性状の関係

[ $V_g=12\text{m/s}$ ,  $f_g=10\mu\text{m/rev}$  ( $v_{wn}=0.38\text{mm/s}$ )  
 $f_p=10\mu\text{m}$ ,  $t=5\mu\text{m}$ , Soluble type T1 12 l/min]



(a) Wet grinding [Fluid type T1 (1/10)]



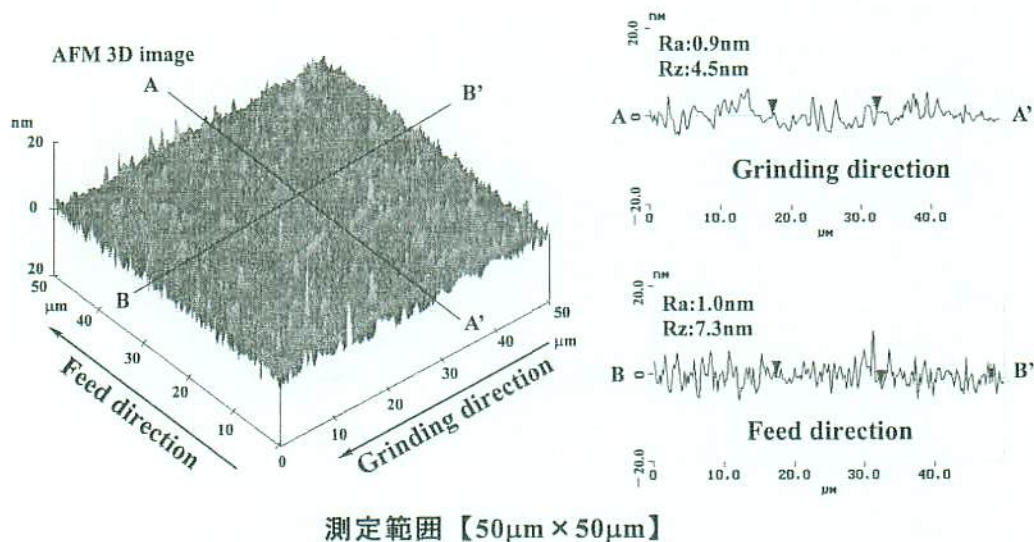
(b) Wet grinding [Fluid type T1 (1/100)]

図 5.25 研削油剤 T1 でガラスを超平滑研削した場合の仕上面の WYKO 観察結果

[ $V_g=12\text{m/s}$ ,  $f_g=10\mu\text{m/rev}$  ( $v_{wn}=0.38\text{mm/s}$ )  
 $f_p=10\mu\text{m}$ ,  $t=5\mu\text{m}$ , Soluble type T1 12 l/min]



囲は、微小範囲 $256\mu\text{m} \times 256\mu\text{m}$ である。図よりわかるように、研削油剤希釈倍率10倍では、研削条痕はまったく見られず、3次元仕上面粗さは、 $(Rz)_{3D}$ 値で約 $27.3\text{nm}$ 、 $(Ra)_{3D}$ 値では、約 $1.4\text{nm}$ である。さらに、2次元仕上面粗では、研削方向平行仕上面粗さ(図中X-profile)は、 $(Rz)_{2D}$ 値で約 $6.5\text{nm}$ 、 $(Ra)_{2D}$ 値では、約 $1.1\text{nm}$ であり、また、研削方向直角工作物仕上面粗さ(図中Y-profile)は、 $(Rz)_{2D}$ 値で約 $8.2\text{nm}$ 、 $(Ra)_{2D}$ 値では約 $1.3\text{nm}$ となり、超平滑研削法を平面研削に適用することにより、#140の粗粒ダイヤモンドメタルボンド砥石を用いても、ガラスで超平滑面に近い表面が得られることが確認できる。一方、研削油剤希釈倍率100倍では、研削条痕は見られないものの、研削仕上面は、微小な凹凸面となっており、平滑な仕上面ではないことがわかる。3次元仕上面粗さは、 $(Rz)_{3D}$ 値で約 $249.3\text{nm}$ 、 $(Ra)_{3D}$ 値では、約 $16.3\text{nm}$ である。さらに、2次元仕上面粗では、研削方向平行仕上面粗さ(図中X-profile)は、 $(Rz)_{2D}$ 値で約 $128.2\text{nm}$ 、 $(Ra)_{2D}$ 値では、約 $15.5\text{nm}$ であり、また、研削方向直角工作物仕上面粗さ(図中Y-profile)は、 $(Rz)_{2D}$ 値で約 $130.2\text{nm}$ 、 $(Ra)_{2D}$ 値では約 $15.6\text{nm}$ となり、具体的な仕上面粗さからもわかるように、高平滑仕上面となっていない。



測定範囲【 $50\mu\text{m} \times 50\mu\text{m}$ 】  
 図 5.26 ガラスを超平滑研削した場合の仕上面の AFM 観察結果  
 $[V_g=12\text{m/s}, f_{Gn}=10\mu\text{m/rev}(v_{wn}=0.38\text{mm/s}), f_p=10\mu\text{m}, t=5\mu\text{m},$   
 $\text{Soluble type T1 } 12 \text{ l/min}]$

図 5.26 に、図 5.25 に示す、ガラス仕上面を、高解像度の原子間力顕微鏡 AFM で、さらに詳細に測定した結果を示す。なお、測定範囲は、 $50\mu\text{m} \times 50\mu\text{m}$  であり、仕上面に発生する微小穴を反転して示している。図の 3 次元画像より、仕上面の一部に、深さ  $10\text{nm}$  程度の微小穴が観察されるが、この微小穴を含まない 2 次元仕上面粗さは、研削方向平行仕上面粗さ(図中 A-A'-profile)は、 $(Rz)_{2D}$  値で約  $4.5\text{nm}$ 、 $(Ra)_{2D}$  値では、約  $0.9\text{nm}$  であり、また、研削方向直角仕上面粗さ(図中 B-B'-profile)は、 $(Rz)_{2D}$  値で約  $7.3\text{nm}$ 、 $(Ra)_{2D}$  値では

約1.0nmである。第4章4.22に示したHPSCの仕上面AFM観察結果の3次元画像、および2次元プロファイルと比較すると、仕上面の凹凸が大きい。これは、先に示した $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiC}$ と同様で、工作物の機械的特性が異なることによる延性モード研削加工形態の違い、および結晶粒界など工作物組織の差異に起因するものと考えられる。

この結果から、運動転写方式を採用した平面研削加工で、粗粒である#140のメタルボンドダイヤモンド砥石を用いても、超平滑研削法を適用することにより、圧力転写方式である遊離砥粒加工を用いた、ラッピングやポリッシング加工に匹敵する超平滑な仕上面が得られることが認められ、超平滑研削法の有用性が確認できる。

図5.27に、図5.23で示した研削油剤T1を用い、希釈倍率を10倍、30倍、50倍、100倍および参考のための水道水のための5種類でガラスを超平滑研削法で湿式研削した場合の法線研削抵抗 $F_n$ 、接線研削抵抗 $F_t$ および、研削抵抗比 $F_t/F_n$ を示す。図より、研削油剤希釈倍率を10倍から100倍に高くすると、法線研削抵抗 $F_n$ 、接線研削抵抗 $F_t$ ともに大きくなることがわかる。これは、研削油剤希釈倍率が高くなると、研削油剤の濃度が低くなることで、研削油剤の潤滑効果が小さくなり、結果的に法線研削抵抗 $F_n$ 、接線研削抵抗 $F_t$ が大きくなるものと思われる。そして、研削抵抗比 $F_t/F_n$ は、研削油剤希釈倍率が高くなると、小さくなる傾向にある。これは、図5.23で示した研削仕上面観察結果から、研削油剤希釈倍率が高くなると、脆性

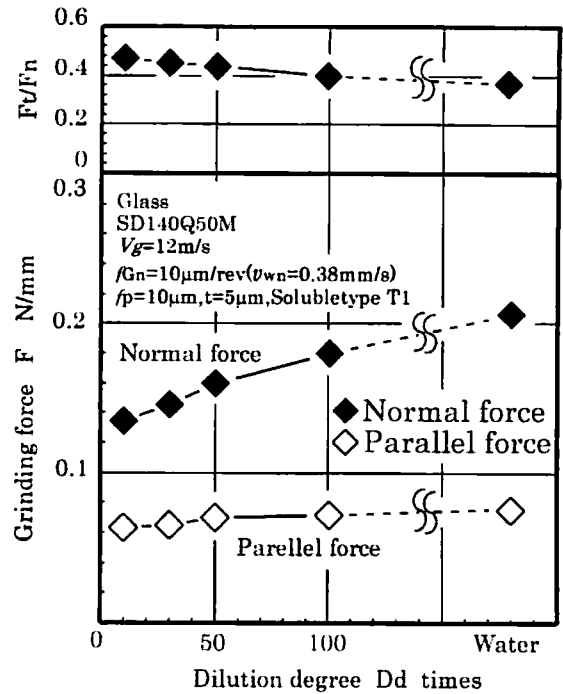


図 5.27 研削油剤 T1 を用いてガラスを超平滑研削した場合の、研削油剤希釈倍率と研削抵抗の関係

[ $V_g=12\text{m/s}$ ,  $f_g=10\mu\text{m/rev}$  ( $v_{wn}=0.38\text{mm/s}$ )  
 $f_p=10\mu\text{m}$ ,  $t=5\mu\text{m}$ , Soluble type T1 12 l/min]

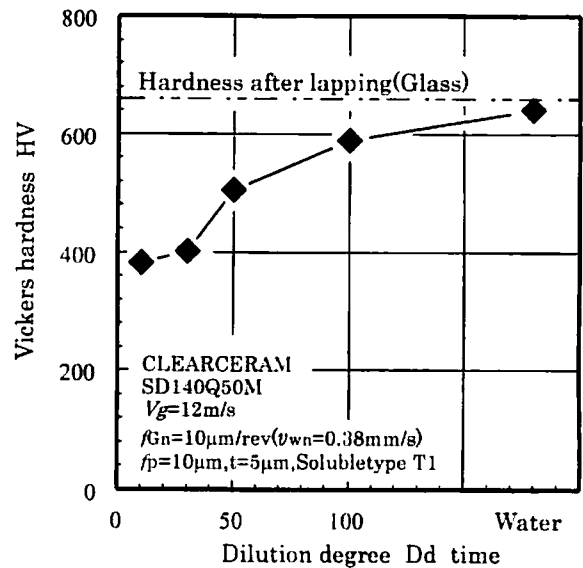


図 5.28 研削油剤 T1 を用いてガラスを超平滑研削した場合の、研削油剤希釈倍率と仕上面表面硬さの関係

[ $V_g=12\text{m/s}$ ,  $f_g=10\mu\text{m/rev}$  ( $v_{wn}=0.38\text{mm/s}$ )  
 $f_p=10\mu\text{m}$ ,  $t=5\mu\text{m}$ , Soluble type T1 12 l/min]

破壊痕の発生割合が多くなり、加工形態が脆性モード状態になることに加え、前述したように、研削油剤の潤滑効果が小さくなり、法線研削抵抗 $F_n$ 、接線研削抵抗 $F_t$ ともに大きくなるが、その増加率が、法線研削抵抗 $F_n$ が接線研削抵抗 $F_t$ よりも大きく、結果的に、研削抵抗比 $F_t/F_n$ が小さくなるものと推察される。

図 5.28 に、図 5.23 で示した研削油剤 T1 を用い、希釈倍率を 10 倍、30 倍、50 倍、100 倍および参考のための水道水のための 5 種類でガラスを超平滑研削法で湿式研削した場合の仕上面表面硬さ HV を、適当な条件でラッピング加工した場合と比較して示す。硬さの値は、10 ヶ所測定した平均値をデータとしている。なお、測定は、脆性破壊痕を避けて行っている。図より、いずれの研削油剤希釈倍率においても、ラッピング硬さよりも低くなっていることがわかる。そして、その低下率は、研削油剤希釈倍率が低いほど大きく、研削油剤希釈倍率 10 倍の場合には、ラッピング硬さよりも 1/3 程度低くなっている。これは、研削油剤希釈倍率が低い場合には、研削油剤の冷却効果が小さくなり、研削点温度が高くなったものと思われる。しかし、この一方で、図 5.23 で示した研削仕上面観察結果からわかるように、研削油剤希釈倍率 10 倍では、この研削熱の影響で、加工形態が延性モード状態になり、脆性破壊痕がない良好な延性モード研削仕上面が得られたものと考えられる。



## 5.4第5章の総括

本章では、超平滑研削加工法を平面研削加工に適用し、#140のメタルボンドダイヤモンド砥石を用いた超平滑研削加工の実用化を目的に、様々な工作物への適用と研削仕上面の高平滑化・高能率化・高除去速度化の取り組みとして、各種ファインセラミック HPSN、 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Tic}$ 、およびガラスの高平滑延性モード研削仕上面に及ぼす研削油剤の効果と影響について、実験的に検討した。検討は、第4章と同様に、乾式研削および、近年開発された環境対応型オイルフリータイプの研削油剤を3種類用いて、超平滑研削を行い、研削仕上面性状を光学顕微鏡、および SEM で観察し、研削仕上面粗さを WYKO、および AFM で測定することにより行った。また、研削加工時には、弾性八角リングにより研削抵抗を測定し、得られた研削抵抗から、各種工作物の高平滑延性モード研削形態の特徴を考察した。

- 1) 今回の実験で使用したすべての工作物 HPSN、 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Tic}$  および、ガラスの超平滑研削の場合には、第4章で得られた HPSC の実験結果と同様に、研削油剤を供給しない乾式研削では、良好な延性モード研削仕上面は得られない。
- 2) 一方、研削油剤を供給する湿式超平滑研削では、プランジ研削法で見られた研削条痕はほとんど見られない高平滑延性モード研削仕上面が得られ、研削油剤供給効果大きい。しかしながら、研削油剤の種類により、研削仕面上に発生する脆性破壊痕の数と大きさが異なり、同じ超平滑研削条件でも、すべての研削油剤で良好な延性モード研削仕上面を得ることはできなかった。今回用いた研削油剤の中では、プランジ研削法と同様に、アニオン界面活性剤を主体とした研削油剤タイプ T1 において、脆性破壊痕の発生が非常に少ない、最も良好な延性モード研削仕上面が得られることがわかった。
- 3) 最も良好な延性モード研削仕上面が得られたアニオン界面活性剤を主体とした研削油剤 T1 を用いた場合の、研削油剤希釈倍率が高平滑延性モード研削仕上面におよぼす影響は、各材料により異なり、今回の実験条件の範囲では、 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Tic}$ 、ガラスでは、幾分低希釈倍率で、そして、HPSN では、比較的高希釈倍率で、良好な延性モード研削仕上面が得られる。これは、材料の機械的特性が大きく影響するものと思われるが、今後、研削形態も含め、詳細な検討が必要である。
- 4) 超平滑研削法を平面研削加工に適用することにより、#140のメタルボンドダイヤモンド砥石を用いても、測定範囲 $256\mu\text{m} \times 256\mu\text{m}$ において、3次元仕上面粗さで、HPSN では、 $(R_z)_{3D}$ 値で約 $57\text{nm}$ 、 $(Ra)_{3D}$ 値で約 $2.7\text{nm}$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Tic}$ では、 $(R_z)_{3D}$ 値で約 $25\text{nm}$ 、 $(Ra)_{3D}$ 値で約 $2\text{nm}$ 、ガラスでは、 $(R_z)_{3D}$ 値で約 $27\text{nm}$ 、 $(Ra)_{3D}$ 値で約 $1.4\text{nm}$ の遊離砥粒研磨法に匹敵する高平滑研削仕上面粗さの仕上面が得られることがわかった。

## 第6章 総 括

### 6.1 本研究の成果と概要

本論文では、機械構造用材料として、優れた特性を持つファインセラミック HPSC、HIPSIN、 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiC}$ 、および近年、大型液晶パネルなど光エレクトロニクス産業のキーパーツであるガラスに注目し、これら各種材料の高能率・高平滑平面研削加工を目的に、高平滑延性モード研削仕上面に及ぼす研削油剤の効果と影響について、プランジ研削法、そして開発した超平滑研削法を平面研削加工に適用することにより実験的に考究した。

第1章「序論」では、近年の生研削加工技術および研削油剤の近状と動向を調査検討するとともに、本論文の意義について記述した。次いで、本論文の構成と内容の概略について述べた。

第2章「粗粒メタルボンドダイヤモンド砥石の目直し法の開発ー直流電源を用いたツイン電極電解目直し法の考案ー」では、高形状精度加工および高能率加工に適しているメタルボンド砥石の新たな目直し法として、直流電源を使用したツイン電極ドレッシング法を考案し、装置の試作、システムの構築を行い、目直し性能を実験的に検討した。そして、考案したツイン電極目直し法は、#140のメタルボンドダイヤモンド砥石の平均砥粒径約  $1/3$  である約  $35\mu\text{m}$  以上の砥粒突出し高さの形成が可能であり、メタルボンドダイヤモンド砥石の目直し法として十分に適用でき、ツイン電極目直し法を施した砥石は、従来の電解目直し法であるカーボンブラシを用いたシングル電極目直し法、および既存の機械的目直し法である立型ロータリドレッサ法の場合と比較し、目こぼれを評価基準とした場合の目立て間寿命が長く、仕上面粗さも安定し、研削比が高いことなど優れた効果を確認した。

第3章「プランジ研削法における延性モード研削仕上面に及ぼす研削油剤の効果と影響」では、本実験で用いたファインセラミックの機械特性および延性モード研削技術、実験装置、測定装置、実験方法についての概略を説明した。そして、#140の粗粒メタルボンドダイヤモンド砥石を用いて、HPSC、HIPSIN、 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiC}$ の各種ファインセラミックおよびガラスのプランジ研削を行い、工作物送り速度を小さくすることにより、#140の粗粒メタルボンドダイヤモンド砥石を用いても延性モード研削が可能であることを示し、この延性モード研削仕上面に及ぼす研削油剤の効果と影響について検討した。その結果、研削油剤を用いない乾式研削の場合には、研削仕上面が溶融剥離し、激しい凹凸面になる一方、研削油剤を用いた湿式研削の場合には、延性モード研削仕上面が得られることがわかった。しかし、研削油剤の種類(成分・組成)により、同研削条件においても、研削仕上面に発生する脆性破壊痕の大きさと数に違いがあり、良好な延

性モード研削仕上面を得るためには、適切な研削油剤の選択が肝要であることを解明した。また、すべての工作物において、今回使用した研削油剤では、合成潤滑油としてアニオン界面活性剤を主体とした研削油剤T1の場合に、良好な延性モード研削仕上面が得られ、今後、現場で使用する研削油剤の選択指針を示した。

第4章「平面研削加工に超平滑研削法を適用した場合の炭化けい素セラミック高平滑延性モード研削仕上面に及ぼす研削油剤の効果と影響」では、本研究に先立ち、安井が考案した超平滑研削法を、炭化けい素セラミック(HPSC)に適用し、#140の粗粒砥石を用いた高能率・高平滑研削加工の可能性を考究する一考察として、高平滑延性モード研削仕上面に及ぼす研削油剤の効果と影響を実験的に検討した。その結果、超平滑研削法においても、プランジ研削法と同様に、研削油剤を供給しない乾式研削では、良好な延性モード研削仕上面は得られない。この一方で、研削油剤を供給する湿式超平滑研削では、プランジ研削法で見られた研削条痕はほとんど見られない高平滑延性モード研削仕上面が得られ、研削油剤の供給効果について確認した。しかしながら、研削油剤の種類により、研削仕上面に発生する脆性破壊痕の数と大きさが異なり、同じ超平滑研削条件でも、すべての研削油剤で良好な延性モード研削仕上面を得ることはできず、超平滑研削法においても、適切な研削油剤の選択が肝要であることを明確にした。今回用いた研削油剤の中では、プランジ研削法と同様に、アニオン界面活性剤を主体とした研削油剤タイプ T1 において、脆性破壊痕の発生が非常に少ない、最も良好な延性モード研削仕上面が得られることがわかった。さらに、研削油剤の希釈倍率についても考究し、研削油剤希釈倍率が高平滑延性モード研削仕上面に及ぼす影響は、今回の実験条件の範囲では、HPSC の場合、希釈倍率 10 倍から 100 倍と低希釈倍率から高希釈倍率まで、研削仕上面への大きな影響の違いは見られなかったが、幾分低希釈倍率で良好な延性モード研削仕上面が得られることが明らかになった。そして、最も高平滑な研削仕上面が得られた微小範囲粗さ(測定範囲  $256\mu\text{m} \times 256\mu\text{m}$ )は、HPSC では、 $H_{3D}(R_z)$ で 27.5nm,  $H_{3D}(R_a)$ で 2.3nm と、遊離砥粒加工法に匹敵する高平滑研削仕上面であり、研削油剤の適切な選択と希釈倍率の設定の重要性および、超平滑研削法の有用性を同時に確認した。

第5章「各種ファインセラミックの高平滑延性モード研削仕上面に及ぼす研削油剤の効果と影響」では、超平滑研削法の実用化を最終的な目的に定め、窒化けい素セラミック(HIPSN)、アルチックセラミック( $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiC}$ )、およびガラスの超平滑平面研削加工を行い、各種硬脆材料の高平滑研削仕上げ面に及ぼす研削油剤の効果と影響について、第4章で得られた HPSC 超平滑実験結果と比較しながら、検討した。さらに、高平滑研削仕上面性状に及ぼす研削油剤希釈倍率の影響について、得られた実験結果から、各種工作物の機械的特性値と延性モード研削形態の関係についても考察、究明した。その結果、今回の用いた窒化けい素セラミック(HIPSN)、アルチックセラミック

( $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiC}$ )、およびガラスでは、第4章で得られた HPSC の実験結果と同様に、すべての工作物において、アニオン界面活性剤を主体とした研削油剤タイプ T1 を使用した場合に、脆性破壊痕の発生が非常に少ない、最も良好な延性モード研削仕上面が得られることがわかった。しかしながら、研削油剤希釈倍率が高平滑延性モード研削仕上面におよぼす影響は、各材料により異なり、今回の実験条件の範囲では、 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiC}$ 、ガラスでは、低希釈倍率で、そして、HIPSIN では、比較的高希釈倍率で、良好な延性モード研削仕上面が得られることが明らかになった。そして、今回の実験条件において、最も高平滑な研削仕上面が得られた微小範囲粗さ(測定範囲  $256\mu\text{m} \times 256\mu\text{m}$ )は、HIPSIN では、 $\text{H3D(Rz)}$ で  $57.1\text{nm}$ 、 $\text{H3D(Ra)}$ で  $2.7\text{nm}$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiC}$  では、 $\text{H3D(Rz)}$ で  $25.1\text{nm}$ 、 $\text{H3D(Ra)}$ で  $2.0\text{nm}$ 、ガラスでは、 $\text{H3D(Rz)}$ で  $27.3\text{nm}$ 、 $\text{H3D(Ra)}$ で  $1.4\text{nm}$  が得られ、いずれの工作物においても、高平滑研削仕上面が得られており、超平滑研削法の有用性を確認するとともに、実用化の見地を見出した。

そして、本章「総括」では、本研究により得られた主要な研究成果を総括し、記述する。

以上、本論文では、HPSC、HIPSIN、 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiC}$ の各種ファインセラミックおよびガラスに注目し、本研究に先立ち考案された超平滑研削法を平面研削加工に適用し、高平滑延性モード研削仕上面性状および粗さに及ぼす研削油剤の効果を実験的に考究した。その結果、高平滑延性モード研削仕上面を得るためには、研削油剤の供給が不可欠であり、研削油剤の適切な選別と希釈倍率の設定が肝要であることを明らかにした。加えて、粗粒メタルボンドダイヤモンド砥石の新たな目直し法を開発し、従来の目直し法と比較し、仕上面粗さの安定や研削比の向上など、新目直し法の有効性を明らかにした。

本論文で得られた成果は、高能率・高平滑平面研削加工の更なる高能率化・高品位化・高平滑化について、超平滑研削法の実用化に向けた検討の第一歩であり、また、21世紀の最重要課題である環境問題を捉え、今後ますます普及するであろう環境対応型研削油剤の適切な選択指針を見出し、超平滑研削加工法という新たな研削加工理論の体系と技術的な確立の一考察になるものと確信している。



## 謝 辞

本論文は、筆者が2002年4月に熊本大学大学院博士後期課程に入学してから現在までの3年間に、熊本大学 安井平司教授の御懇篤なる御指導のもとに完成することができました。本課程に入学して以来、御懇篤なる御指導を賜わるとともに、本論文の主査をして頂きました安井平司教授に心から御礼申し上げます。

また、副査を担当して頂きました渡邊純二教授、小田勇教授におかれましては、御多忙中にも関わらず主論文を査読頂き有益な御教示、御助言を賜りました。ここに謹んで御礼申し上げます。

筆者が3年間にわたりこの研究を遂行できたのも知能機械製作学分野(安井研究室)の方々の御協力に負うところが多く、とりわけ、協力指導委員を担当して頂きました坂本重彦助教授には貴重なご意見を頂きました。また、熊本大学安井研究室卒業研究生、小山泰弘君、園村一馬君、田中佑樹君、宮本兼輔君をはじめ研究室の皆様には本研究にあたり熱心な御協力を頂きました。ここに記して厚く御礼申し上げます。

そして、実験機材を御提供頂きました、(株)ノリタケカンパニーリミテッド、(株)ユシロ化学工業、(株)日本タングステンの各社に心から感謝致します。

終わりに、上記の方々の御教授と御鞭撻なくしては、本研究は完成しなかったことを記し、あらためて心より御礼申し上げます。