

高平滑研削のための自動砥石作業面画像処理システムの開発

2002年 3月

熊本大学大学院自然科学研究科

開 豊

目 次

第1章 序 論

1.1	ファインセラミックスの高平滑研削	1
1.2	砥石作業面の評価	3
1.3	本研究の概要および論文の構成	5

第2章 粗粒ダイヤモンド砥石によるファインセラミックスの高平滑研削

2.1	緒 言	9
2.2	ファインセラミックスの研削加工	10
2.3	ファインセラミックスの延性モード研削	
2.3.1	実験装置および実験方法	13
2.3.2	従来の実験結果	16
2.3.3	Al ₂ O ₃ -TiC の延性モード研削実験	22
2.3.4	粗粒砥石によるファインセラミックスの延性モード研削の可能性	26
2.4	ファインセラミックスの超平滑研削	
2.4.1	実験装置および実験方法	29
2.4.2	超平滑研削実験(1) (HPSC の場合)	31
2.4.3	超平滑研削実験(2) (Al ₂ O ₃ -TiC の場合)	35
2.4.4	粗粒砥石によるファインセラミックスの高平滑研削の可能性	38
2.5	結 言	40

第3章 延性モード研削に及ぼす砥粒切れ刃状態の影響

3.1	緒 言	42
3.2	超砥粒砥石の構成と分類	
3.2.1	超砥粒砥石の構成	43
3.2.2	超砥粒砥石の分類	44
3.3	実験装置および実験方法	
3.3.1	実験装置の構成	48
3.3.2	砥石作業面の観察と測定	49
3.3.3	実験方法および条件	51
3.4	切れ刃面積率を変えた延性モード研削実験(1) (HPSC の場合)	
3.4.1	研削仕上面の観察結果	51
3.4.2	工作物仕上げ面粗さの変化	53
3.4.3	切れ刃面積率と仕上げ面粗さの関係	54
3.5	切れ刃面積率を変えた延性モード研削実験(2) (HIPSIN の場合)	
3.5.1	研削仕上面の観察結果	55
3.5.2	工作物仕上げ面粗さの変化	58
3.5.3	切れ刃面積率と仕上げ面粗さの関係	59
3.6	結 言	60

第4章 粗粒ダイヤモンド砥石の形直し・目直し過程における切れ刃挙動

4.1	緒 言	62
-----	-----	----

4.2	形直し過程における切れ刃挙動の追跡	
4.2.1	実験方法および条件	63
4.2.2	形直し過程における砥石作業面性状の変化	65
4.2.3	研削特性に及ぼす形直しの影響	68
4.3	目直し過程における切れ刃挙動の追跡	
4.3.1	実験方法および条件	71
4.3.2	目直し過程における砥石作業面性状の変化	72
4.4	結 言	76
第5章	自動砥石作業面画像処理システムの開発	
5.1	結 言	78
5.2	自動観察・評価システムの構築	
5.2.1	砥石作業面評価およびその測定法	79
5.2.2	砥石作業面画像処理システムの再構築	84
5.2.3	システムの基本構成	86
5.2.4	画像による砥石作業面性状の評価	87
5.2.5	輝度と輪郭処理を合せた切れ刃抽出法	89
5.2.6	自動撮影・作業面画像処理プログラム	91
5.3	自動砥石作業面画像処理システムの検証	
5.3.1	切れ刃密度および切れ刃面積率の算出	93
5.3.2	砥石作業面の連続撮影および全周観察	95
5.3.3	一般研削実験への適用	97
5.4	結 言	98
第6章	自動砥石作業面画像処理システムの実験への適用	
6.1	結 言	100
6.2	自動砥石作業面画像処理システムの構成	101
6.3	自動砥石作業面画像処理システムの拡張	
6.3.1	切れ刃抽出プログラムの改良—ボンドテールの抽出—	101
6.3.2	システム機能の拡張	103
6.3.3	システムの実行	106
6.4	自動砥石作業面画像処理システムの適用	
6.4.1	形直し過程における砥石作業面変化の追跡	107
6.4.2	切れ刃リストを利用した砥石作業面変化の追跡	109
6.4.3	切れ刃ヒストグラムによる形直し過程の砥石作業面変化の追跡	112
6.4.4	目直し過程における砥石作業面変化の全周観察	114
6.4.5	切れ刃ヒストグラムによる目直し過程の砥石作業面変化の追跡	119
6.5	結 言	120
第7章	総 括	122
	謝 辞	125

第 1 章 序 論

1.1 ファインセラミックスの高平滑研削

近年、機器の高精度化・高品位化には目覚ましいものがあり、その一方で、生産の高効率化・低価格化も急速に進みつつある。こうした状況に伴い、製造過程に関与するハード・ソフト両面での大きな技術改革が求められている。このような中で、機械加工分野でも、高能率加工・高品位加工の両面に可能性をもつ研削加工が大きな期待を寄せられている。特に、近年のマイクロメータ精度からナノメータ精度への急速な進展をみせる高品位加工においては、研削加工の役割が急速に拡大しつつある。

高品位加工における研削加工の位置付けは、従来、寸法形状等における高精度加工および高平滑研磨加工における前加工という 2 つの位置付けであった。これらの研削技術は、工作機械の高剛性化や NC 化、また超砥粒の出現による新型砥石の開発あるいは研削油剤等の改良によって進捗してきた。特に、高精度加工については、工作機械や砥石の高剛性化を背景に、いわゆる超精密加工技術として進展しつつある。

一方、ナノオーダーの超平滑加工に関しては、研削は依然として研磨加工の前加工の位置付けであることが多い。高平滑加工は、鉄鋼材料・非鉄金属材料などの金属材料はもとより、プラスチックやガラスあるいはセラミックス等の非金属材料まで、全ての材料加工に求められている技術であり、中でも、近年、構造材料あるいは電子部品材料として需要が増しているファインセラミックについては、硬脆性というその特質もあって、他の材料に比べてもその要求基準が高いものとなっている。

合成ダイヤモンドおよび立方晶窒化ホウ素 (CBN) という二つの超砥粒の出現は、砥粒による超精密加工の可能性を大きく進展させた。中でも研削加工においてダイヤモンド砥石や CBN 砥石の出現がもたらした効果は大きい。これら超砥粒砥石の出現によって、従来の砥石では不可能だった高硬度材の加工が可能となり、さらには粒度 #10000 以上の極微粒砥石や高剛性金属コア砥石の開発などが実現され、これによって、より微細な鏡面加工を追求する超精密研削から、高速化によって研削を切削の範囲にまで拡張する高能率研削の実現まで、研削加工の幅が大きく拡張されたことになる¹⁾。

こうした中で、ファインセラミックスの高平滑研削を実現するためのひとつの方法として、延性モード研削が提案されている²⁾。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ものである³⁾。その原理については、未だ完全には明確にされていないが、こうした研削法では砥石の表面状態を適正に保つことが重要であるとされ、ファインセラミックスなどの高脆性材料の研削においても、延性モード仕上面の実現が可能であることが予測されている。

ファインセラミックスは、多くの優れた機械的・電気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⁴⁾。一般に、ファインセラミックスは、素材の成形のあと、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。前述の非球面加工の例と同じように、高硬度・高脆性であるファインセラミックスの高精度加工でも、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、そのあとに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などの作業が生じ、加工効率が低下してコストが上昇し、さらには加工精度等にも悪影響を受ける⁵⁾。

ファインセラミックスの高平滑研削は、前述のように、研削仕上面に脆性破壊痕を生じない延性モード研削によって実現できる⁶⁾。従来、その実現方法として、微小な砥粒切込みが有効とされ、粒度#1500以上の細粒のダイヤモンド砥石の使用が一般的であり⁷⁾⁸⁾、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⁹⁾。しかし、砥粒が細粒から微粒になるにつれ、保持力が低下して研削中の砥粒の脱落が生じやすくなり、連続した研削の実現が難しくなる。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くなる。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、いくつかの基本的な課題を抱えている。

これに対し、粗粒の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える可能性があることが安井らによって示されている¹⁰⁾。

本研究では、まず、ファインセラミックスの高平滑研削加工の可能性を再確認する目的で、近年、磁気ヘッドなどの電子磁性体材料として重要性の高まっているアルミナチタンカーバイド（アルチック： $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiC}$ ）セラミックを対象として、粒度#140、#320の粗粒メタルボンドダイヤモンド砥石を用いて、延性モード研削実験を行った。これらの砥石は、集中度50、100と砥粒密度も小さく、結合剤も保持力の高いメタルであり、高剛性のホイールと合わせ、安定した砥石作業面状態の維持が期待できた。実験では、テーブル速度を遅くしながら、工作物送りを小さくして平面研削を行い、仕上面状態や仕上面粗さなどを測定して、延性モード研削の可能性を探った。また、これらの結果を、先に実験した、ホットプレス法で焼結した炭化けい素(HPSC)、あるいは熱間静水圧法で焼結された窒化けい素(HIPSN)などの結果と比較検討した。さらに、単純なプランジ研削では研削方向にそって直角な高さ300nm程度の研削条痕が発

生するため、通常の研削方向のテーブル送りに合せて工作物を軸方向にも一定幅でスライドさせながら研削を行う「超平滑研削法」でも研削実験を行った。結果として、研削条痕が除去され、アルチックをより高平滑に研削できる可能性が確認できた。

これらの実験結果から、高平滑研削加工によって形成されるファインセラミックスの仕上面状態には、砥粒先端の切れ刃の状態が大きく関与することが再確認され、砥石作業面性状を詳細に調整することの重要性がクローズアップされてきた。そして、ファインセラミックスの高平滑研削実現のためには、砥石作業面を的確に把握するための自動砥石作業面観察・評価システムの開発が急務と考えた。

1.2 砥石作業面の評価

砥石作業面上の切れ刃の分布や形状、いわゆる砥石作業面性状の測定とその定量的把握は、重研削や精密研削などの種類を問わず、全ての研削作業において、工作物加工の良否を左右する極めて重要な課題である。特に近年、電子磁性材料として利用される難削材であるセラミックス等を、比較的番数の大きい粗粒ダイヤモンド砥石を用いて行う延性モード研削や超平滑研削では、砥石作業面上の砥粒切れ刃の微妙な調整具合が、そのまま仕上げ面の状態や精度に大きく影響を与えることがわかっている¹¹⁾。

こうした中で、砥石作業面の測定・評価については、これまでも多くの研究者によって、数々の方法が検討され、提案されている。現在、最もよく用いられている方法としては、触針等を用いて二次元的な砥石表面の外形を測定する断面プロフィール法がある¹²⁾¹³⁾。この方法では、砥石作業面上の砥粒やボンド材を含めた外形的な断面形状が比較的正確に測定でき、深さ方向の砥粒の突き出し量やボンド部分の空隙量いわゆるチップポケット深さなどが容易に求められる。

しかし、この方法では、得られた外形情報から砥粒とボンド部分を正確に分離して捉えることが難しく、さらに実際の研削に関与している砥粒切れ刃を判別することも容易ではない。また、物理的な針の接触を必要とするため測定の高速度化が難しく、研削方向に沿った触針幅の外形プロフィールを得るためにも長い測定時間が必要となる。

こうした触針法の問題点を解消するため、近年では触針の直接的な接触に代えて、光パルスやレーザー光あるいは超音波などを使う測定法が多数提案されている^{14)~18)}。これらの方法では、砥石表面からの光や音の反射を専用素子で受け、反射の強弱やスペクトル分布などを解析して表面の状態を把握する。その1例である光電走査法では、光電パルスを使って表面の反射を測定し、その反射パルスの形状やスペクトルパターンなどを使って切れ刃の有無や形状などを判定している。そのほか、熱電インパルス法¹⁸⁾やレーザーブレード法²⁰⁾なども同様の考え方を取るものである。これらの方法では、利用する光や音波の受動システムの特性にそって、表面測定の高速度化が実現可能などところに最大の利点があり、研削方法や条件によってはインプロセスでの測定も可

能という優れた特長をもつ。しかし現状では、利用する光や音波のスポット径や反射強度などの制約によって測定分解能に限界があり、粒度数十メッシュ程度の比較的粒径の大きい砥石の測定にしか適用されていないようである。また、計測装置自体が特殊で大がかりとなるため、一般の研削作業に適用するにはコスト的な面からも難しさが伴う。

また、こうした個々の測定機器を使う方法に関する研究だけでなく、研削した試片などを利用して、間接的なかたちで砥石作業面の評価を行おうという試みもある。クラスタ状石片を測定する方法²¹⁾や研削条痕を測定する転削法²²⁾などであり、実際的な研削結果に対応した判定が出来る点に特長があるが、測定が間接的であり、砥石作業面が研削に及ぼす影響などを詳細に測定するような試みには適用できない。

こうした測定法に対して、最も容易で直接的な方法は、光学顕微鏡を用いた観察であろう^{23)~25)}。この方法は、大きな導入コストもかからず、切れ刃の微視的な形状や状況が視覚的な画面で得られ、作業者が直感的に砥石作業面性状を把握するには最も適したものである。経験のある技能者であれば、実際の研削に関わっている切れ刃の有無や逃げ面摩耗の状態あるいはボンド部分のこすれや傷などの損傷等についても、ほぼ正確に捕捉することができる。しかし一方で、一回の顕微鏡観察で捉えられる範囲は数 mm² 程度と狭く、砥石全体の切れ刃状況を把握するためには、多数回の測定と確認作業が必要となり、多大な時間と労力を要する点に問題がある。

こうした中で、これら顕微鏡画像を用いた直接的な砥石作業面観察法の特長を生かしつつ、撮影の自動化あるいはコンピュータによる画像処理技術の導入によって、上記の問題解消をめざす検討もいくつか試みられてきている。本研究に先立つ、安井・細川によるコンピュータ画像技術を用いた砥石作業面評価に関する研究²⁶⁾は、こうした考え方を具体化したものである。この研究では、砥石作業面画像の撮影を CCD カメラで行い、この出力信号を画像フレームメモリに取り込むことによりデジタル化して、パーソナルコンピュータを使った画像処理技術を活用して自動的に砥粒や切れ刃の抽出を行おうとするものである。実際には、当初、手動撮影で砥石作業面上の 12 ヶ所程度を測定して、パーソナルコンピュータからの操作でフレームメモリ上の画像 1 枚を 1 分程度の時間で処理しながら、砥粒密度や切れ刃面積などの評価パラメータを算出して、砥石作業面性状の評価を行うものであった。

このシステムについては、その後、第 2 報²⁷⁾に示されているように、研削盤の砥石回転用主軸モータを 12bit エンコーダ付きの AC サーボモータに交換することで、コンピュータの指令によって正確な位置決め制御ができるように改良した。これによって、基本的には、撮影位置の制御からデジタル画像の入力そして画像処理による自動的な切れ刃抽出や評価パラメータの算出まで、一連の測定がほぼ自動化できるところまで基本的なシステムの準備が整ったことになる。

このシステムでは、主として画像処理上、色彩的な特長から砥粒とボンド部の区別のつきやすいレジンボンドダイヤモンド砥石を対象として、研削過程での切れ刃変化や目直し過程での砥粒密度の変化を追跡する実験等を行っている。しかし、パーソナルコンピュータの演算速度の制約や個々の装置の連携の難しさから、完全な自動化には至らず、実際的な実験への適用にはいくつかの課題があった。

本研究では、このシステムの基本的な考え方を受け継ぎつつ、位置決めから画像撮影そして切れ刃抽出まで、一連の処理を完全に自動化・高速化することによって、大量の画像を用いて砥石全面にわたる作業面の詳細な状態把握など、実際の研削実験への適用に絶えられるシステムの実現をめざした。

1.3 本研究の概要および論文の構成

研削砥石は、その外周に点在する多数の砥粒を切れ刃とするために、実際の研削に関与する切れ刃の状態が不確定であり、その状態を適正に維持することが難しい。元来、砥粒層中の砥粒の配置は、平面的・立体的にばらつきがあり、砥石表面に表れる多数の切れ刃の大きさや形状も不揃いになる。また、各砥粒を固定するボンド部分の状態も切り屑の除去等に関与して研削仕上面の良否を左右するといわれている。したがって、良好な研削を実現するためには、まず砥石作業面状態を的確に把握する必要がある。特に、ダイヤモンドやCBN砥石などの超砥粒砥石を用いた高平滑研削においては、要求される仕上げ面の高精度化などもあって、より正確な砥石作業面状態把握のための手法の確立が求められている。

本研究では、光学顕微鏡とCCDカメラを用いた砥石作業面観察システムを構成して、撮影位置を決定するサーボモータの制御や高速な画像処理を実現するためのソフトウェア開発などを含め、従来にない正確で実用的な砥石作業面観察・評価システムの構築を実現した。具体的には、画像の測定や処理を行うコンピュータをマルチタスク型のWindows PCに一元化して、位置決めから画像撮影、切れ刃認識そして評価パラメータの算出までを完全に自動化した。また、輪郭を用いた新しい切れ刃抽出アルゴリズムの考案や画像処理プログラムの高速化によって、大幅な時間短縮と省力化を実現して、従来困難とされていた大量画像を使った砥石作業面全体の詳細な測定・評価を可能とした。加えて、個々の切れ刃の位置や大きさを記録した精密な切れ刃リストを作成することで、切れ刃マップ等の機能と合わせ、様々な研削実験過程における砥石作業面変化を詳細に追跡できるようにした。

実験では、粗粒メタルボンドダイヤモンド砥石の作業面全周を約1000枚の画像で自動測定して、形直し・目直し過程における切れ刃状態を正確に捕捉し、極めて詳細な砥石作業面の状態変化を追跡できることを確認した。

本論文は7章からなり、その構成は以下の通りである。

第2章では、粗粒砥石による高平滑研削実現の可能性を確認するために、粒度#140、#320のメタルボンドダイヤモンド砥石を用いて、磁気ヘッドスライダ等の電子部品材料として利用価値の高いアルチックファインセラミック ($\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiC}$) を工作物とし、テーブル送り速度を遅くしながら延性モード研削実験を行った結果を示した。また、新しく開発された超平滑研削法を同じくアルチックおよび炭化けい素セラミック (HPSC) を対象に実施して、いずれの場合も実現の可能性があることを示した。

第3章では、上記の粗粒砥石を用いた高平滑研削の実現において重要となった砥石作業面状態の影響を検証するために、炭化けい素と窒化けい素 (HIPSIN) を工作物として、砥石作業面状態を示す評価パラメータである切れ刃面積率を変えながら、延性モード研削を行った結果について示した。そして、高平滑研削に及ぼす切れ刃面積率の影響について検討した結果について示した。

第4章では、上記の実験で用いた粗粒メタルボンドダイヤモンド砥石について、多石ダイヤモンドブロックツルアを用いた形直し実験とWAスティックを用いた自動目直し実験を行い、手動撮影で形直し・目直し過程における砥石の形状や砥石作業面状態の変化を調べ、予備的に両過程における砥粒切れ刃の挙動について検討した結果について示した。

第5章では、本論の中心テーマとなっている光学顕微鏡とCCDカメラを利用した自動砥石作業面画像システムの開発について述べた。上述のように、ここではシステムをより連携的なかたちに統合して完全自動化して、大量画像による高精度な砥石作業面評価が実現できたことを示した。

第6章では、上記システムをさらに詳細な砥石作業面変化の追跡・観察に適用する目的で、切れ刃マップ作成等の機能拡張を行った結果と、これを使って実際の形直し・目直し時の砥石作業面観察実験へと適用した結果について述べた。そして、これらの実験における砥石作業面変化の追跡から得た具体的な知見についても示した。

第7章では、以上の各章の内容について総括している。

参考文献

- 1) 庄司克雄：研削加工の軌跡，精密工学会誌，65, 1 (1999) 31.
- 2) 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.
- 3) 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)
- 4) 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.
- 5) セラミックス加工研究会編：ファインセラミックスの精密加工，工業調査会，(1990).
- 6) 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, 05(1990)782.
- 7) 大森 整：超精密鏡面加工に対応した電解インプロセスドレッシング(ELID)研削法。精密工学会誌，59, 09(1993)1451.
- 8) 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スの延性研削，63, 04(1997)535.
- 9) 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, 03(1993)455.
- 10) 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ス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.
- 11) 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スの延性モード高平滑研削(第1報)，精密工学会誌，63, 9 (1997) 1270.
- 12) 中園 汎，安井平司，砂本 章：切れ刃の破壊・脱落に及ぼす研削条件の影響—高切込み研削における砥石半径減の定量化に関する研究(第1報)，精密機械，42, 9 (1976) 869.
- 13) 松井正己，田牧純一：砥石表面トポグラフィの測定に関する研究—触針法，精密機械，50, 4 (1984) 672.
- 14) 田中義信，津和秀夫，河村末久：研削加工の諸条件が研削砥石の性能に及ぼす影響について(第1報)—切れ刃に及ぼす振動の影響，精密機械，30, 11 (1964) 845.
- 15) 須藤徹也：砥石切れ刃の新しい測定装置，精密機械，34, 9 (1968) 606.
- 16) 臼井英治，井上 誠：砥粒面形状測定器の試作と測定例—砥石面性状の統計的研究(第1報)，精密機械，40, 5 (1974) 415.

- 17) 三好隆志, 斎藤勝政: 光学的フーリエ変換による砥石作業面性状の評価, 精密機械, 48, 8 (1982) 1045.
- 18) A.M.Besuyen: The Measurement of the Grinding Wheel Wear with the Quantimet Image Analyzing Computer, Ann. CIRP. 19. (1971) 619.
- 19) 玉井廉人, 河村末久, 寺田勝三: 研削中における砥石切れ刃高さの分布について — 実験の方法と二, 三の結果(第1報), 精密機械, 36, 4 (1970) 263.
- 20) 松井正己, 庄司克雄: 統計的手法による研削機構の考察(第3報) — 二, 三の実験的考察, 精密機械, 37, 10 (1971) 708.
- 21) 松井正己, 田牧純一: 三次元粗さ測定器による砥石表面トポグラフィの測定, 精密工学会誌, 54, 5 (1988) 871.
- 22) 中山一雄, M. C. Shaw: 研削仕上面のあらさ, 日本機械学会論文集(第3部), 37, 293 (1971) 178.
- 23) 津和秀夫: 研削における砥粒の挙動について(第4報) — 切れ刃の顕微鏡観察, 精密機械, 27, 11 (1961) 719.
- 24) 吉川弘之: 研削砥石の目立て間寿命判定基準, 精密機械, 28, 5 (1962) 286.
- 25) 安井平司, 津和秀夫: 砥石作業面性状の定量化に関する研究(第1報) — 切れ刃分布, 精密機械, 40, 8 (1974) 639.
- 26) 細川 晃, 安井平司他: 画像解析によると石作業面の評価 (第1報), 精密工学会誌, 62, 9 (1996) 1297
- 27) 細川 晃, 安井平司他: 画像解析によると石作業面の評価 (第2報), 精密工学会誌, 65, 10 (1999) 1440

第2章 粗粒ダイヤモンド砥石によるファインセラミックスの高平滑研削

2.1 緒言

ナノオーダーの平滑度が要求されるようなファインセラミックスの高平滑研削においては、仕上面に脆性破壊を生じさせない加工を実現することが肝要であり、これには微小な砥粒切込みによる延性モード研削を行うことが有効だとされている¹⁾。そのため、一般的には、粒度#800以下の細粒・微粒の砥石が用いられ、最近では粒度#15000以上の超微粒砥石の適用も検討されている²⁾⁻⁵⁾。しかし、砥粒が細粒から微粒になるにつれ、ボンドの保持力は弱まり、研削加工時に砥粒が脱落して、砥石作業面が一定の状態維持され難く、安定した研削加工を行うことが難しい。また、砥石作業面の回復をはかる目直し・形直し作業も、細粒・微粒の砥石では適正に実施することが難しい。また、砥石と結合剤との物理的な構造からも、細粒・微粒の砥石は、チップポケットが小さく、切り屑の除去効率が低いため、目詰まりを起こしやすく、加工能率を大きくできないことが指摘されている⁶⁾。

これに対して、粗粒砥石を用いた高平滑研削が可能になれば上記の細粒・微粒砥石での問題点を克服して、荒研削から最終工程まで、安定した極めて能率の良い研削が実現できることが安井らによって提案されている⁷⁾⁸⁾。これらの実験では、粒度#140、集中度50のメタルボンドダイヤモンド砥石を用い、代表的な構造用ファインセラミックスであるホットプレス法で焼結した炭化けい素(HPSC)や熱間静水圧法で焼結した窒化けい素(HIPSN)を対象として、延性モード研削の可能性について検討している。これらの実験結果から、HPSCやHIPSNについて、粗粒ダイヤモンド砥石を用いても延性モード研削を実現し得ることが示されているが、これらの実験は、多くの条件で検討されたものではなく、さらに数多くの材料についても検討してみる必要がある。

そこで、本章では、近年磁気ヘッドなどの電子磁性材料として重要度の高いアルチック(アルミナチタンカーバイド： $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiC}$)を工作物として、粗粒ダイヤモンド砥石を用いた延性モード研削および超平滑研削の可能性について検討した。なお、本章の前半では、比較のために本研究に先立つ安井、有野らの研究成果⁹⁾を、本論の要旨にそって再録した。また、これらの一般的な延性モード研削では、砥粒径に対応した研削条痕が発生するため、この条痕を除去する研削法として、通常のテーブル送りに合わせて工作物を軸方向にも一定幅でスライドさせながら研削を行う「超平滑研削法」を使って、同じくアルチックを工作物として研削した結果についても報告する。

2.2 ファインセラミックスの研削加工

近年、代表的な新素材としてセラミックスが注目されており、その多岐にわたる特性から、センサーなどの機能性材料、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、セラミックスの切削加工について未だ十分な成果が出ていないこともあって、機械的成形加工の中心技術として期待されており、その加工適用範囲も、極めて幅広い領域にわたることが予想されている。

しかし、表 2.1 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、その特異性の反映だと考えることができる。

セラミックの加工に関する研究については、従来から用いられてきた剛硬バイトなどの工具材料に関するものが多い。材料物性を比較すると、金属は低硬度・高靱性であり、セラミックスは高硬度・高脆性であるが、このセラミックスを微小切削したときの材料除去機構をみると常に脆性破壊によるものばかりとはかぎらない。

表 2.1 各種材料の物性値

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

一般的な平面研削における研削抵抗を考えると、酸化物・窒化物系セラミックスは、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。セラミックス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スでは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ス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、法線抵抗が大となると考えられている。したがって、セラミックスの研削に用いる研削盤や砥石などの剛性は、一般にかなり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、セラミックス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) と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。セラミックスは、組織感性が高く、強度と破壊靱性が非常に似た関係にあるために、組織構造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などによって、強度も破壊靱性も大幅に異なってくるとされる。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 $1/2 \sim 1/3$ の強度であり、脆性破壊を起こしやすいため、一般的な研削効率は高くなるとされる。

このように、セラミックス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、とくに、ファインセラミックス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。

本章では、表 2.2 に示すようなファインセラミックスを対象として、高平滑研削加工の可能性を検討した結果について示す。材料は、ホットプレス法を用いて焼結した炭化けい素 (HPSC)、熱間静水圧法で焼結した窒化けい素 (HIPSN)、そしてアルミナを主成分とするアルチック ($\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiC}$) などである。これらのセラミックスは一般的に、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。

表の上の数値はメーカーの公称値であり、データが欠けた部分もあるが、本実験で用いたファインセラミックスの中では、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定される。これに対し、HIPSN は剛性も HPSC より低い、熱伝導性が HPSC よりかなり低く、逆に熱膨張率は比較的高いなど、加工時の熱特性がかなり異なることが予想される。また、 Al_2O_3 -TiC に関しては、HIPSN よりさらに硬脆性のセラミックであると考えられる。

表 2.2 ファインセラミックの物性値

	HPSC	HIPSN	Al_2O_3 -TiC
密度 (g/cm^3)	3.23	3.3	4.24
比熱 ($J/g \cdot K$)	0.60	0.68	—
熱伝導率 ($W/m \cdot K$)	100	25.4	21.0
熱膨張係数 ($\times 10^{-6}/K$)	—	3.4	0.78
曲げ強度 (MPa)	—	1100	835
破壊靱性 ($MN/m^{3/2}$)	—	7.5	5.0
ヤング率 (GPa)	441	310	392
硬さ ($H_R A$)	(3302) _{HV}	93.5	94.0

2.3 ファインセラミックスの延性モード研削

ここでは、粗粒ダイヤモンド砥石を用いたファインセラミックスの延性モード研削（プランジ研削）の可能性を確認するため、アルチックセラミックを工作物として研削実験を行った結果について示す。なお、前述のように、比較のため、先に実験した炭化けい素（HPSC）および窒化けい素（HIPSIN）の実験結果についても示す。

2.3.1 実験装置および実験方法

実験は、図 2.1 に示す平面研削盤（岡本工作機械製作所 PSG-63DX）を用い、プランジカット湿式研削で行った。工作物には、ホットプレス法で製造された炭化けい素（HPSC）、熱間静水圧法で製造された窒化けい素（HIPSIN）、およびアルミナを主成分とするアルチック（ $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiC}$ ）の3種のファインセラミックスを用いた。砥石は粗粒の#140あるいは#320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。

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に、各研削の開始時に総研削量 $150\sim 300\text{mm}^3$ 程度の予備的な研削を行っている。

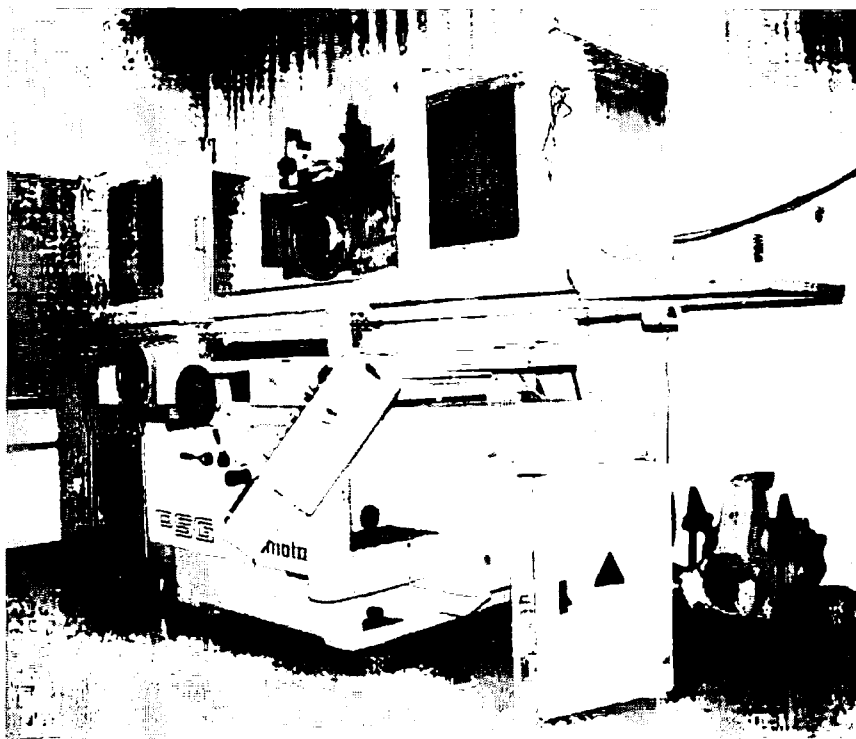


図 2.1 平面研削盤（PSG-63DX）の外観

図 2.2 には、本研究で用いた小坂触針式粗さ測定器の外観を示す。仕上面粗さの測定では、測定倍率は研削表面の粗さに応じて設定した。測定距離は、研削表面の粗さに応じて基準長さを考慮して決定した。粗粒ダイヤモンド砥石による研削仕上面には、研削方向と直角方向に $100\ \mu\text{m}$ 以上の長波長の盛り上がり条痕が形成されるため、研削方向と直角方向の仕上面粗さを測定する場合は、測定長 $250\ \mu\text{m}$ では正確に仕上面粗さを測定することができないため、測定長を $800\ \mu\text{m}$ として測定した。また、研削仕上面粗さは、研削方向と平行方向および直角方向の 2 方向で測定し、その評価を行った。この際、正確に方向にそって測定するために、CCD カメラを用いて触針の走査方向を確認して行っている。触針式粗さ計からの電圧信号は、A/D 変換してパーソナルコンピュータで処理する。このとき、粗さ測定器からの電圧信号はデジタルストレージオシロスコープを用いて観察して試験片が水平になっているかを確認した。表 2.3 に、小坂式触針式表面粗さ計の主な仕様を示す。

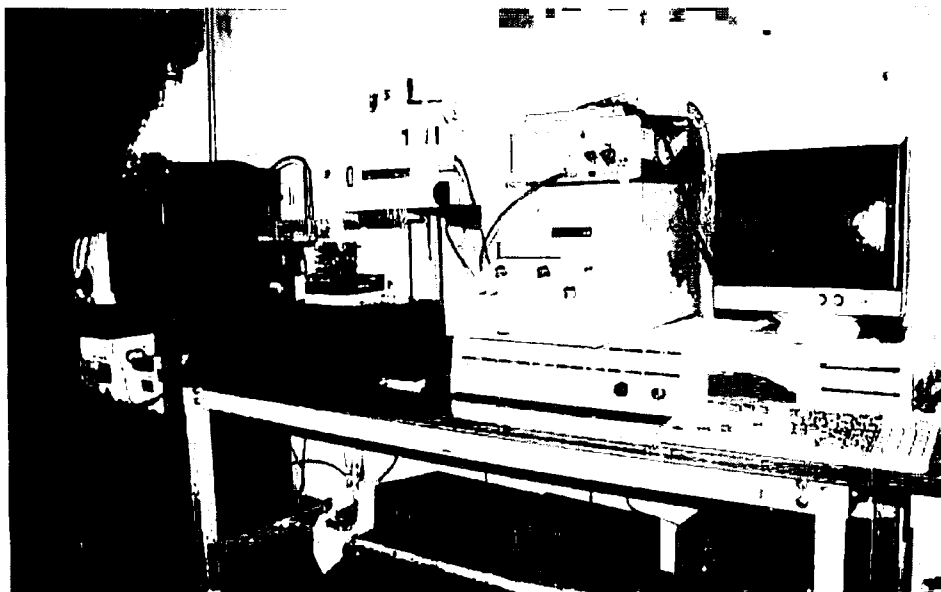


図 2.2 表面粗さ測定器

表 2.3 小坂式触針式表面粗さ計 (SE-30C) の主な仕様

測定パラメータ	Ra, RMS, Rmax, Rz, Rt, Wca, Wea, Wcm, Wem
測定範囲	縦: $600\ \mu\text{m}$, 横: $100\ \mu\text{m}$
フィルタ種類	2CRノーマル
真直度測定精度	$0.2\ \mu\text{m}/100\ \text{mm}$
検出器	方式: 差動変圧器 触針 R= $5\ \mu\text{m}$, $0.7\ \text{mN}$

同様に、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 2.3 に、WYKO TOPO-3D の外観を示す。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、測定するファイナセラミックスの研削加工面は数十 nm 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。TOPO-2D, および OPO-3D の主な仕様を表 2.4 示す。



図 2.3 WYKO TOPO-3D の外観

表 2.4 TOPO-2D, TOPO-3D の仕様

	TOPO-2D	TOPO-3D
干渉タイプ	ミラウ	ミラウ
エレメント数	1024	256×256
倍率	×40	×40
測定範囲	333 μm	□256×256 μm
最小高さ分解能	0.02nm	0.05nm
最小横分解能	0.325 μm	1 μm
光学的分解能	0.65 μm	0.65 μm
視野深度	2.25 μm	2.25 μm
最大表面粗さ	2.25 μm	2.25 μm
最大表面傾斜	19.9°	6.92°
最大ステップ 段差	1.1 μm	1.1 μm
表示能力	2次元	2次元, 3次元

2.3.2 従来の研究結果

a) HPSC の延性モード研削結果

高強度の構造用ファインセラミックス材料である、ホットプレス炭化けい素(HPSC)について、テーブル送りを遅くしながら、徐々に砥粒切込みを小さくする方法で、延性モード研削の可能性を探った結果を示す。表 2.5 には、その実験条件を示す。

図 2.4 には、テーブル速度を $v_w=5\sim 0.05\text{mm/s}$ と変化させてプランジ研削した場合の仕上面を微分干渉顕微鏡と SEM での観察した結果を示す。図より、いずれのテーブル速度においても平坦な延性モード研削面が見られるが、テーブル速度が遅くなるにつれて、脆性破壊痕が少なくなり、延性モード研削面が増えていくのがわかる。そして、 $v_w=0.05\text{mm/s}$ では、ほぼ脆性破壊痕が消え、作業面全面にわたって延性モード研削が実現していることがわかる。

図 2.5 は、上記の $v_w=0.05\text{mm/s}$ のときの HPSC の仕上面を WYKO で測定した結果（測定範囲： $240\times 240\mu\text{m}$ ）である。仕上面粗さは、約 200nm (P-V) であり、図からもわかるように、盛り上がりが条痕が形成されており、この条痕が仕上面粗さを大きくしていることがわかる。

図 2.6 は、さらにこの仕上面を AFM を用いて測定したもの（測定範囲： $50\times 50\mu\text{m}$ ）である。ここでは、仕上面に形成される穴形状を捉えるために、凹凸を反転しているが、図からわかるように、全面で極めて平滑な仕上面となっている。また、図中に示したマイクロクラックを含む 2 次元プロファイル（研削方向）を見ると、穴は幅 $1\sim 3\mu\text{m}$ 、深さが約 50nm で、これを除く部分の粗さ R_{max} は、約 9nm と極めて高平滑となっていることがわかる。

このように、通常困難と考えられている粗粒の #140 の砥石でも、条件によっては、高平滑な延性モード研削が実現可能であることが確かめられた。

表 2.5 実験条件

研削盤	平面研削盤（岡本工作機械製 PSG63DX）
工作物	HPSC □10mm×10mm
砥石	SD140Q50M
砥石周速度	$V_g = 20\text{ m/s}$
研削方法	プランジ研削
送り速度	$(v_w)_p = 0.05 - 5\text{ mm/s}$
切込み量	$t_i = 2\mu\text{m} \times 2\text{ pass}$
研削液	Soluble(ss7 1/50), Flow rate: 12 l/min

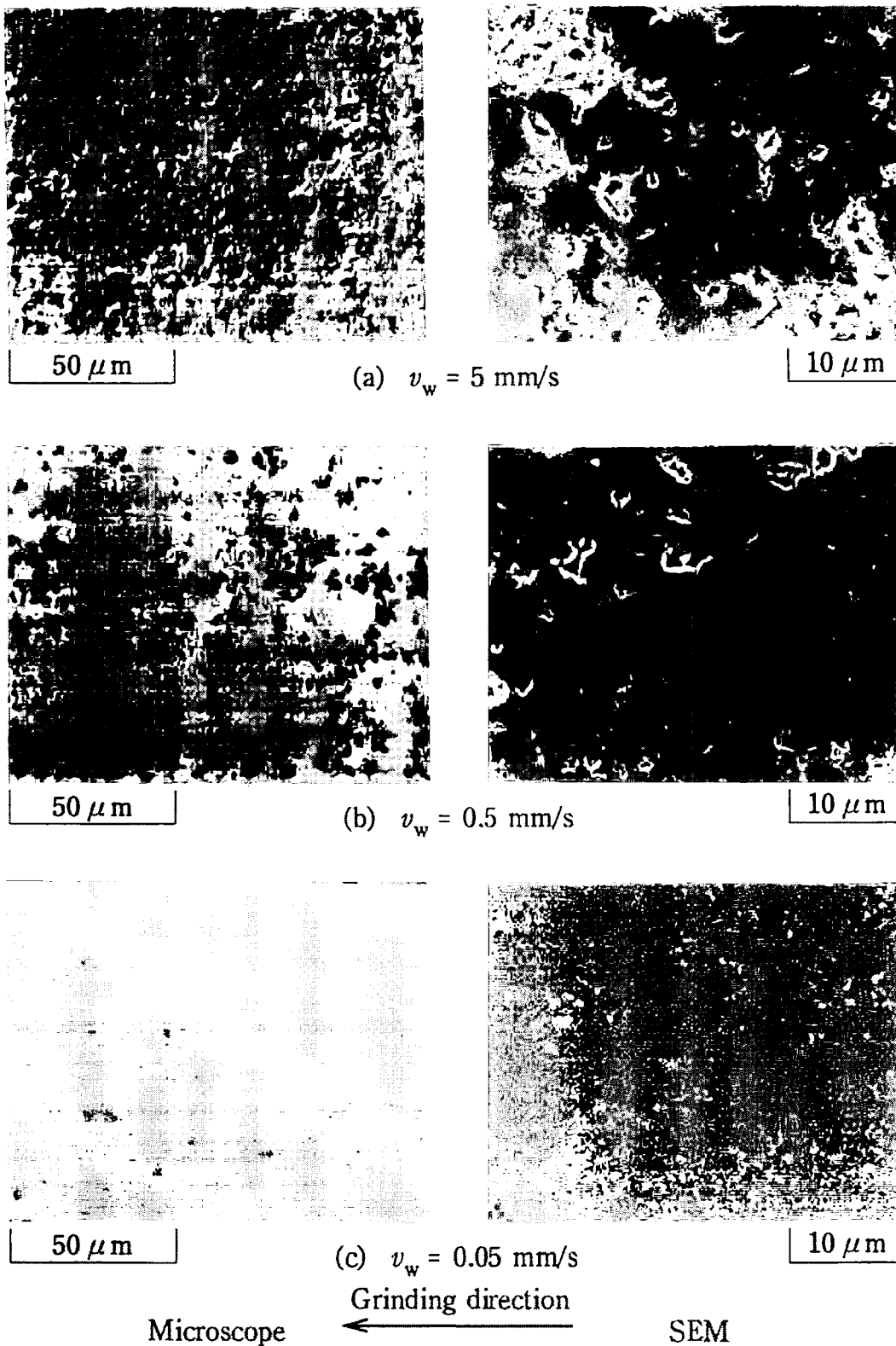


図 2.4 微分干渉顕微鏡と SEM による仕上面観察結果 (HPSC)
 [SD140Q50M, $V_g=20\text{m/s}$, $v_w=5\sim 0.05\text{mm/s}$ $t_t=2 \mu\text{m}$, Soluble(1/50)]

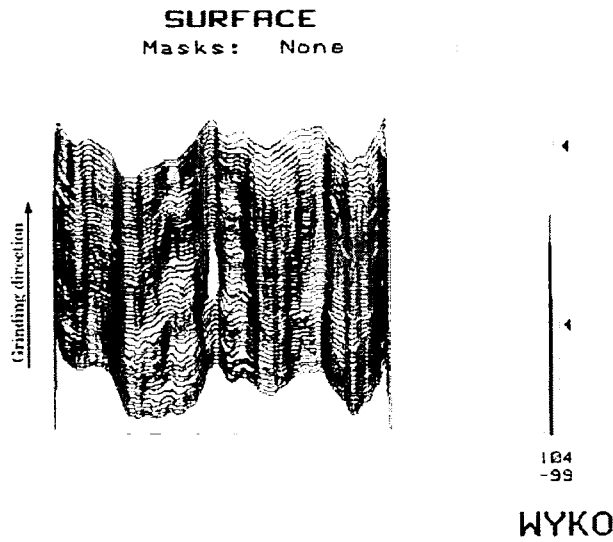


図 2.5 WYKO による HPSC の延性モード研削面観察結果
[SD140Q50M, $V_g=20\text{m/s}$, $v_w=0.05\text{mm/s}$ $t_t=2\ \mu\text{m}$, Soluble(1/50)]

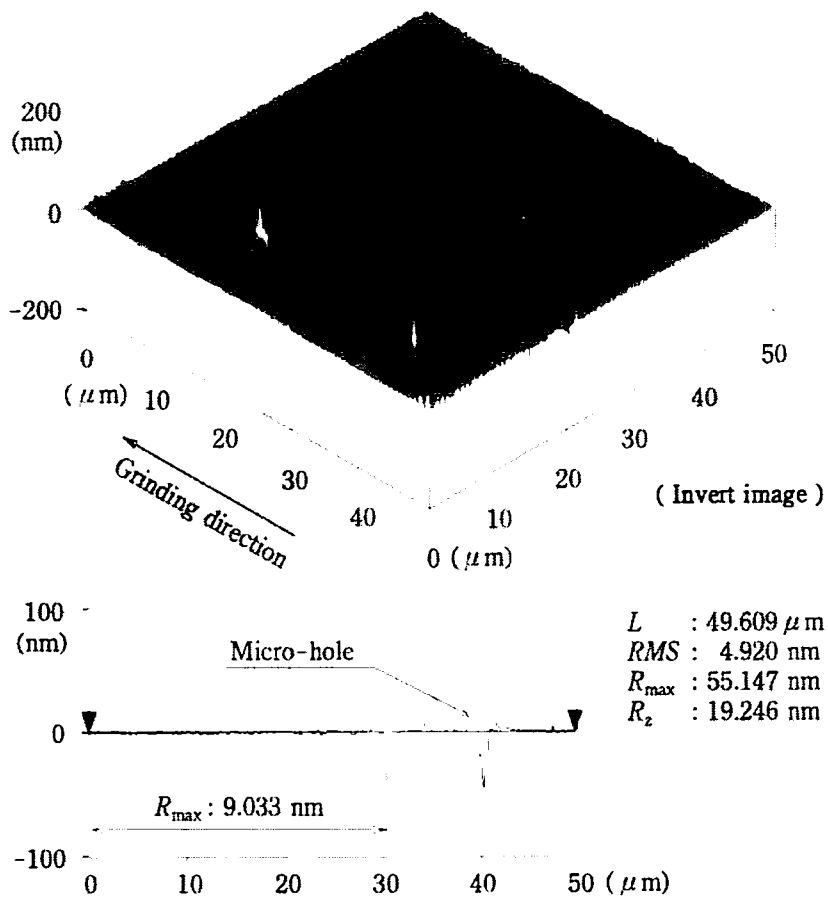


図 2.6 AFM による HPSC の延性モード研削面観察結果
[SD140Q50M, $V_g=20\text{m/s}$, $v_w=0.05\text{mm/s}$ $t_t=2\ \mu\text{m}$, Soluble(1/50)]

b) HIPSN の延性モード研削結果

同じく構造用ファインセラミックス材料である静水圧法による窒化けい素 (HIPSN) について、同様にテーブル送りを遅くして、徐々に砥粒切込みを小さくする方法で、延性モード研削の可能性を探った結果について示す。表 2.6 には実験条件を示す。

図 2.7 に、窒化けい素 (HIPSN) について、テーブル速度を $v_w=5\sim 0.05\text{mm/s}$ と変化させて、プランジ研削した場合の仕上面を SEM で観察した結果を示す。左が #140 の粗粒砥石、右側が #800 の砥石での研削結果である。

#140 では、HPSC ほどではないが、テーブル速度が遅くなるにつれ、脆性破壊痕が少なくなっていくのがわかる。HIPSN では、 $v_w=0.05\text{mm/s}$ でも完全には脆性破壊痕が消えないが、作業面全面にわたってほぼ延性モード研削に近づいている様子がわかる。

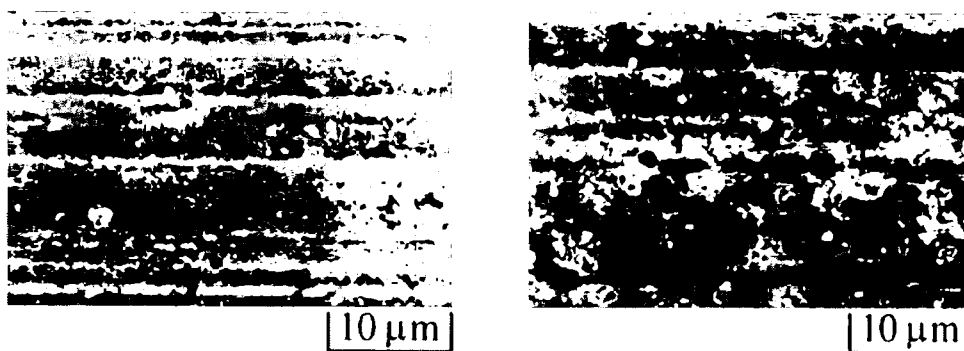
一方、#800 の方では、やはりテーブル速度が遅くなるにつれ、脆性破壊痕が少なくなっていくが、 $v_w=0.05\text{mm/s}$ でも完全には脆性破壊痕が消えず、仕上面状態は #140 のものに及ばない。このことは、延性モード研削の実現が、単なる砥粒の切込み深さの小ささだけを要因とするのではなく、より複雑な砥石作業面の状態が関与していることを示している。

図 2.8 は、上記の砥石 #140 で、 $v_w=0.05\text{mm/s}$ のときの HIPSN の仕上面を WYKO で測定した結果 (測定範囲: $\square 240\times 240\mu\text{m}$) を示している。仕上面粗さは、HPSC と同じく約 200nm (P-V) であり、盛上がり条痕が同様に形成されている。

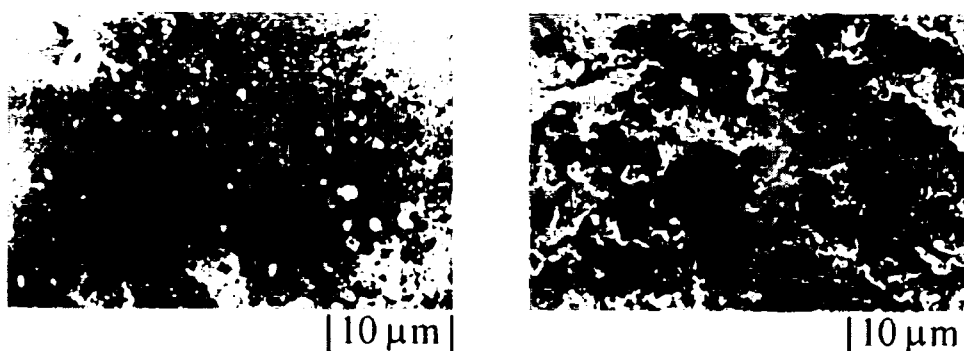
図 2.9 は、さらにこの仕上面を AFM を用いて測定したもの (測定範囲: $\square 50\times 50\mu\text{m}$) である。ここでも、仕上面に形成される穴形状を捉えるため、凹凸を反転させているが、HPSC に比べるとクラックの大きさがやや大きい。図中に示したマイクロクラックを含む 2 次元プロフィール (研削方向) を見ても、穴の幅が $5\sim 10\mu\text{m}$ 、深さも約 250nm ある。しかし、これを除く部分の粗さ R_{max} は、HPSC と同様に極めて高平滑となっていることがわかる。

表 2.6 実験条件

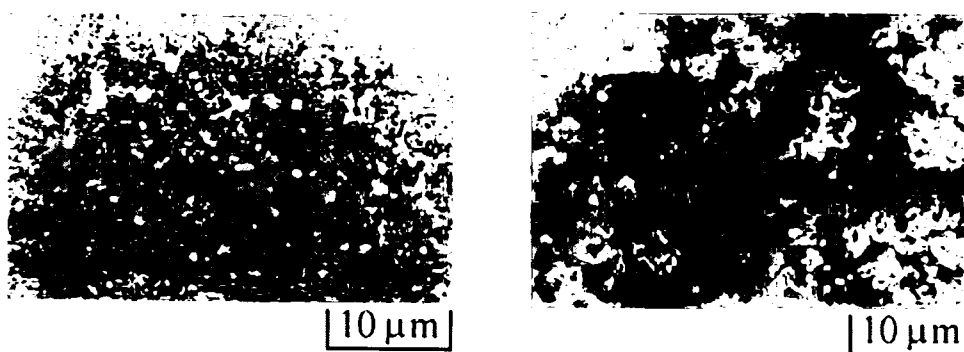
研削盤	平面研削盤 (岡本工作機械製 PSG63DX)
工作物	HIPSN $\square 10\text{mm}\times 10\text{mm}$
砥石	SD140Q50M, SD800Q50M
砥石周速度	$V_g = 20\text{ m/s}$
研削方法	プランジ研削
送り速度	$(v_w)_p = 0.05 - 5\text{ mm/s}$
切込み量	$t_i = 2\mu\text{m} \times 2\text{ pass}$
研削液	Soluble (ss7 1/50), Flow rate: 12 l/min



$v_w = 5 \text{ mm/s}$



$v_w = 0.5 \text{ mm/s}$



$v_w = 0.05 \text{ mm/s}$

(a) SD140Q50M

(b) SD800Q50M

図 2.7 SEM による仕上面観察結果 (HIPS)

[SD140Q50M および SD800Q50M, $V_g=20\text{m/s}$, $v_w=5\sim 0.05\text{mm/s}$ $t_c=2 \mu\text{m}$, Soluble(1/50)]

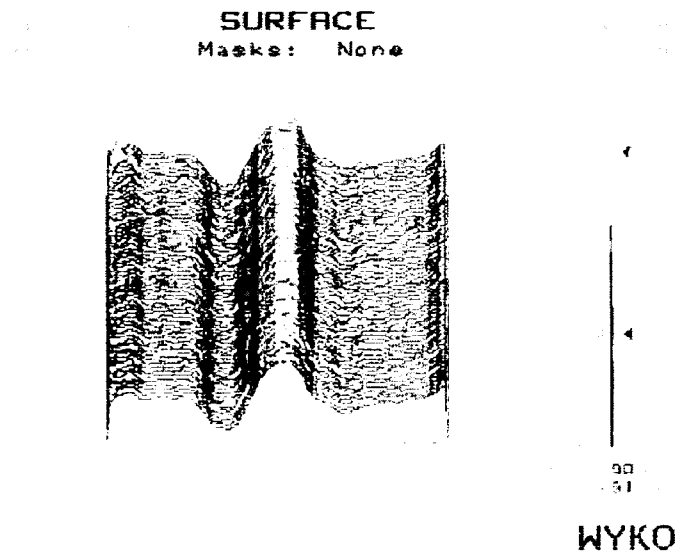


図 2.8 WYKO による HIPSN の延性モード研削面観察結果
 [SD140Q50M, $V_g=20\text{m/s}$, $v_w=0.05\text{mm/s}$ $t_t=2\ \mu\text{m}$, Soluble(1/50)]

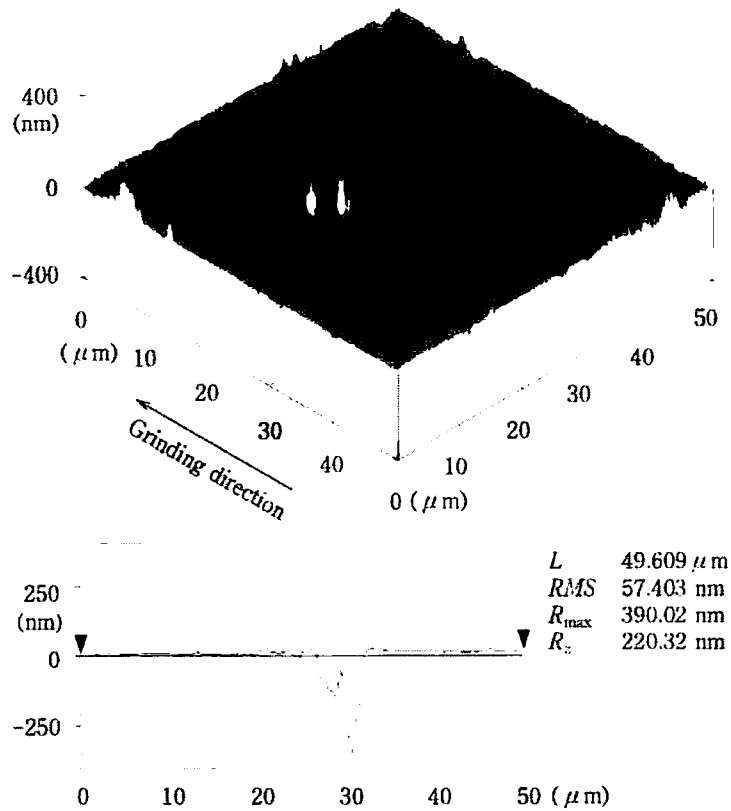


図 2.9 AFM による HIPSN の延性モード研削面観察結果
 [SD140Q50M, $V_g=20\text{m/s}$, $v_w=0.05\text{mm/s}$ $t_t=2\ \mu\text{m}$, Soluble(1/50)]

2.3.3 Al₂O₃-TiC の延性モード研削実験

HPSC, HIPS_N の実験に合せて、粗粒ダイヤモンド砥石を用いたアルチック (Al₂O₃-TiC) の延性モード研削実験を行った。実験条件は表 2.7 に示すとおりである。

図 2.10 に、テーブル速度を $v_w=5\sim 0.005\text{mm/s}$ と変化させて、プランジ研削した場合の仕上面を光学顕微鏡で観察した結果を示す。砥石は同じく #140 である。アルチックの場合も、HIPS_N と同じように、テーブル速度 $v_w=0.05\text{mm/s}$ でも完全には脆性破壊痕が消えない。そこで、 $v_w=0.005\text{mm/s}$ と極めて遅い速度で送ることにより、延性モード研削が実現できた。

また、同じく粗粒の #320 (集中度 50) の砥石を用いて、同じテーブル速度 $v_w=0.005\text{mm/s}$ で、同様の研削を実施してみた結果が図 2.11 である。この場合、ほぼ延性モード研削面となっているが、よく見ると若干のクラックが発生しており、仕上面状態は #140 のものにやや及ばなかった。このことは、2.4.2 でも述べたように、延性モード研削の実現が、単なる切込みやテーブル送り速度といった一般的な研削条件だけでなく、より細かな砥石作業面の状態に影響を受けることを裏付けている。

図 2.12(a)は、#140 の砥石で、テーブル速度 $v_w=0.005\text{mm/s}$ のときのアルチックの仕上面を WYKO で測定した結果 (測定範囲: $\square 240\times 240\ \mu\text{m}$) である。仕上面粗さは、HPSC や HIPS_N よりやや悪く約 300nm (P-V) になっており、同じく盛上がり条痕が形成されている。また、図 2.12(b)は、上述の #320 の砥石で、テーブル速度 $v_w=0.005\text{mm/s}$ のときの仕上面を WYKO で測定した結果 (測定範囲: $\square 240\times 240\ \mu\text{m}$) である。仕上面粗さは、#140 の場合よりさらに大きく約 500nm (P-V) になっているが、盛上がり条痕の幅は砥粒の大きさを反映してやや小さくなっている。

図 2.13 は、#140 の砥石による仕上面を AFM を用いて測定したもの (測定範囲: $\square 50\times 50\ \mu\text{m}$) である。ここでも穴形状を捉えるため凹凸を反転させているが、盛上がり条痕が大きいこともあって、HPSC や HIPS_N に比べるとクラックが目立ち、平滑度が低く感じられる。しかし、下図のマイクロクラックを含む 2次元プロフィール (研削方向) を見ると、穴の幅は HIPS_N と同じく $5\sim 10\ \mu\text{m}$ と大きい、深さは約 100nm 程度と比較的浅い。したがって、これはアルチック自体が含む材料成分的な要素が影響した結果であり、基本的には高平滑な延性モード研削面が得られていると考えられる。

表 2.7 実験条件

研削盤	平面研削盤 (岡本工作機械製 PSG63DX)
工作物	Al ₂ O ₃ -TiC $\square 10\text{mm}\times 10\text{mm}$
砥石	SD140Q50M, SD320Q100M
砥石周速度	$V_g = 20\ \text{m/s}$
研削方法	プランジ研削
送り速度	$(v_w)_p = 0.005 - 0.5\ \text{mm/s}$
切込み量	$t_i = 2\ \mu\text{m} \times 2\ \text{pass}$
研削液	Soluble (ss7.1/50), Flow rate: 12 l/min

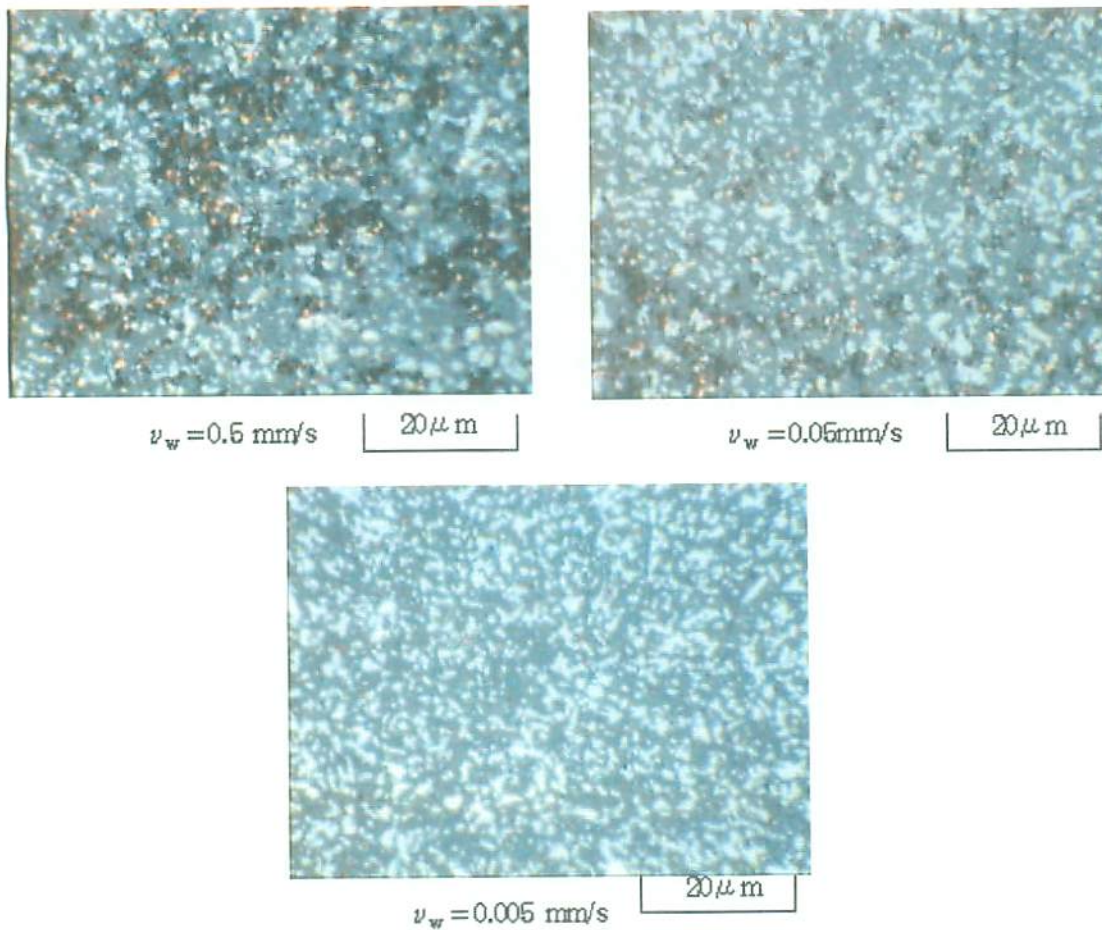


図 2.10 微分干渉顕微鏡による仕上面観察結果(1) ($\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiC}$)
 [SD140Q50M, $V_g=20\text{m/s}$, $v_w=0.5\sim 0.005\text{mm/s}$ $t_t=2\ \mu\text{m}$, Soluble(1/50)]

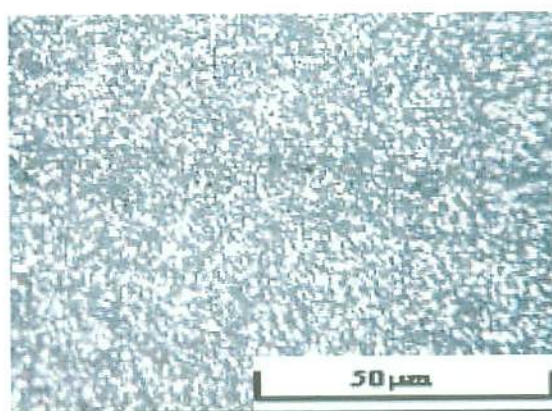
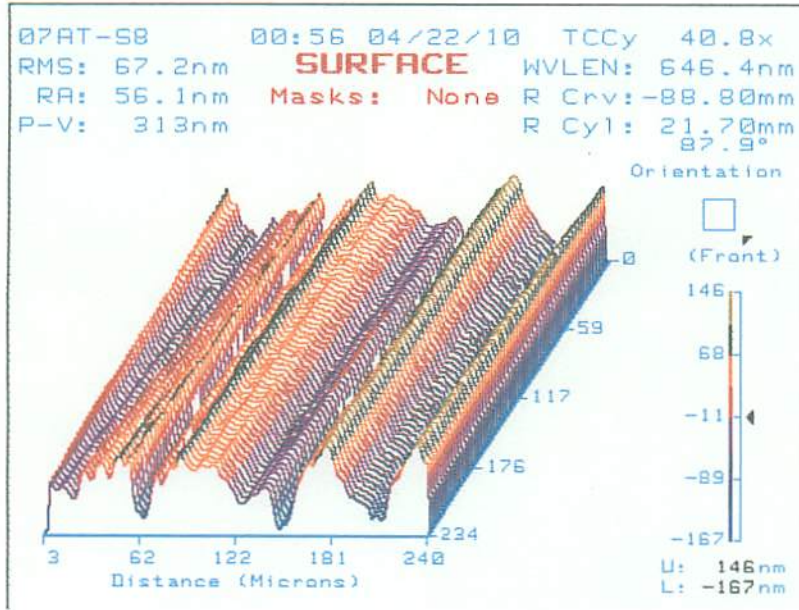
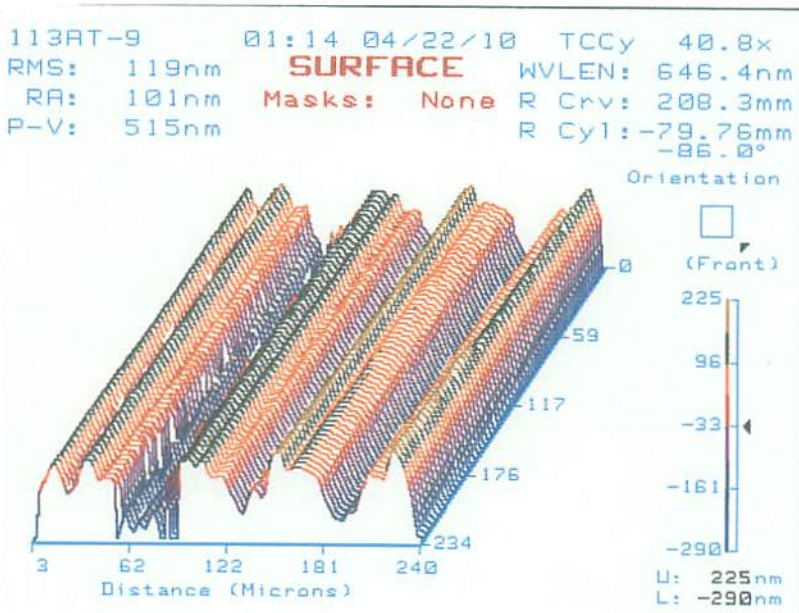


図 2.11 微分干渉顕微鏡による仕上面観察結果(2) ($\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiC}$)
 [SD320Q50M, $V_g=20\text{m/s}$, $v_w=0.005\text{mm/s}$ $t_t=2\ \mu\text{m}$, Soluble(1/50)]



(a) #140 での結果

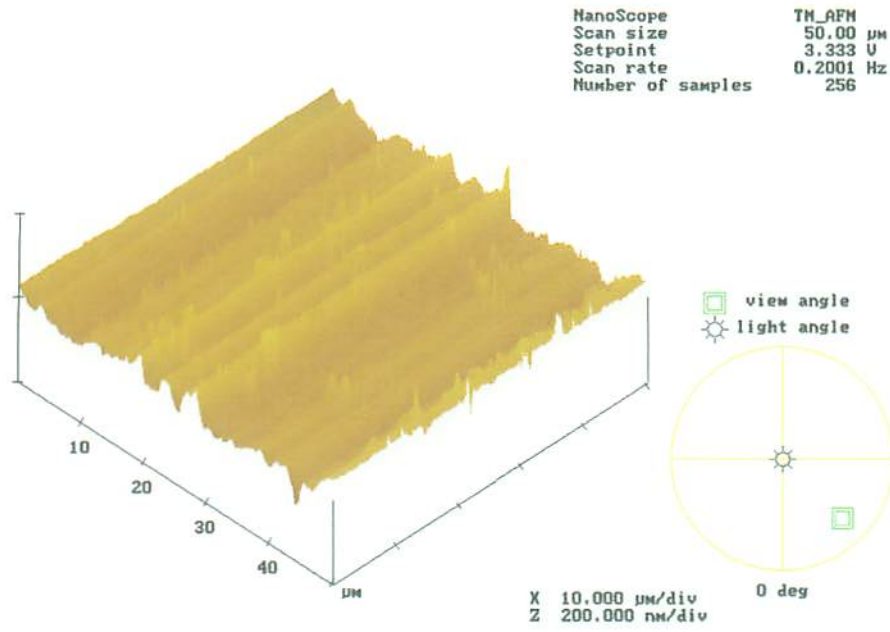
[SD140Q50M, $V_g=20\text{m/s}$, $v_w=0.005\text{mm/s}$, $t_t=2\ \mu\text{m}$, Soluble(1/50)]



(b) #320 での結果

[SD320Q50M, $V_g=20\text{m/s}$, $v_w=0.005\text{mm/s}$, $t_t=2\ \mu\text{m}$, Soluble(1/50)]

図 2.12 WYKO による $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiC}$ の延性モード研削面観察結果



07

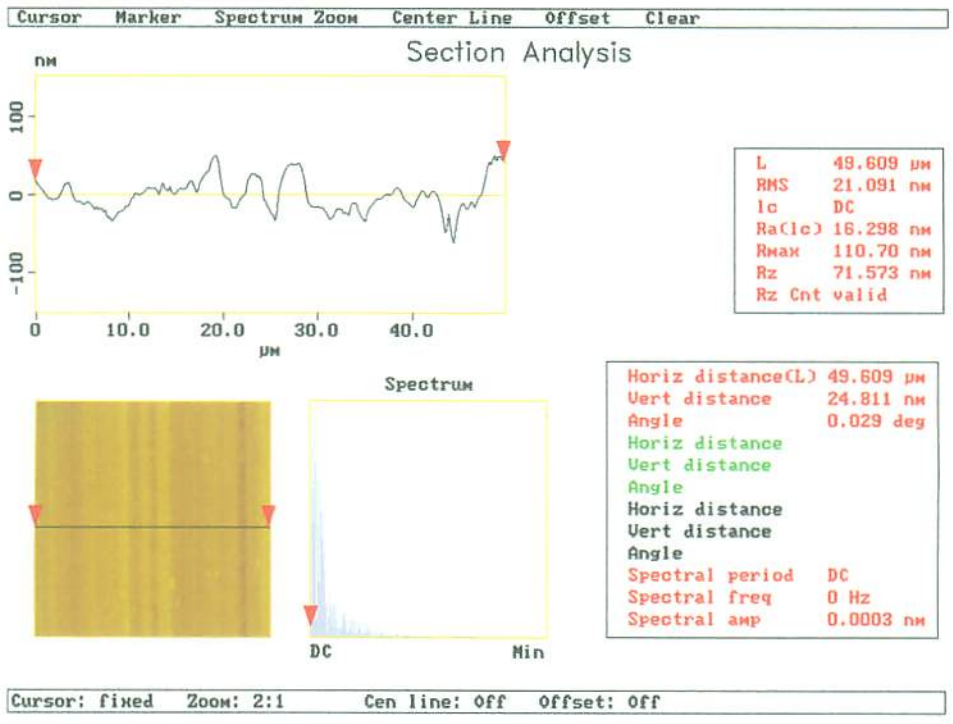


図 2.13 AFM による $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiC}$ の延性モード研削面観察結果
 [SD140Q50M, $V_g=20\text{m/s}$, $v_w=0.05\text{mm/s}$, $t_t=2 \mu\text{m}$, Soluble(1/50)]

2.3.4 粗粒砥石によるファインセラミックスの延性モード研削の可能性

図 2.14(a)は、ホットプレス炭化けい素 (HPSC) の実験結果について、テーブル送り速度と仕上面粗さの関係を示したものである。仕上面粗さは、研削方向に平行な粗さ $(Rz)_p$ と、研削方向に直角な粗さ $(Rz)_n$ で示している。各点の測定値は 9 ヶ所を測定した平均値である。図からわかるように、テーブル速度を小さくすることによって、 $(Rz)_p$ $(Rz)_n$ とともに小さくなっていき、特に、 $vw=0.05\text{mm/s}$ での $(Rz)_p$ は 20nm 程度になっており、高平滑な延性モード研削が実現できていることを示している。

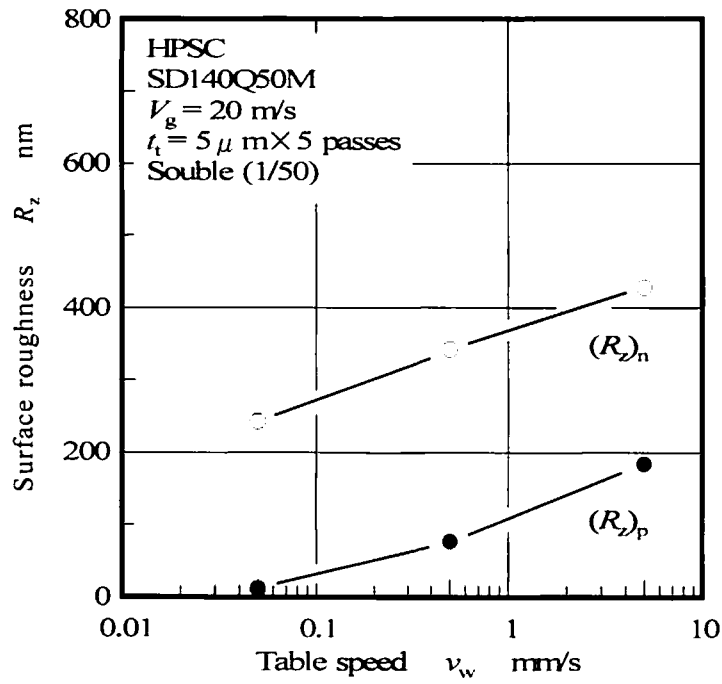
$(Rz)_n$ の大きさは、各実験の WYKO 測定結果でも示したように、砥粒による盛上がり研削条痕によるものであり、仕上面粗さ全体を良くするには、この条痕を取り除く方策が必要なことを示している。これについては、次の 2.4 節で述べる。

他の 2 つのファインセラミックスでも、図 2.14(b)および図 2.14(c) に示すように、テーブル送り速度と仕上面粗さの関係について同様の結果が得られている。したがって、基本的にはテーブル送り速度をある程度遅くして、砥粒切込み量を小さくしてやることによって、延性モード研削が可能なが確認できた。

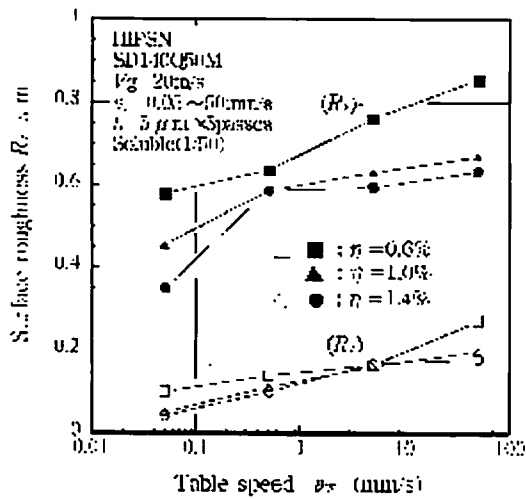
図 2.15 は、炭化けい素 (HPSC) を、粒度 #800 の砥石を用いて、同様な条件で研削したときの仕上面観察結果である。テーブル送り速度 $vw=0.05\text{mm/s}$ の場合を見てもわかるように、図 2.7 に示した #140 の砥石を用いた結果の方が、はるかに良好な延性モード研削面となっている。砥粒切込み量の点からは、両者は同条件であり、このことは延性モード研削の実現が単なる切込み量の問題だけでなく、より微小な砥粒切れ刃状態や砥石作業面状態に影響されることを示す。

図 2.16 は、上記の実験で試用した粒度 #140 および #320 の砥石の砥粒切れ刃状態を顕微鏡写真で示したものである。図からわかるように、#140 の砥粒では、砥粒の先端部が全面にわたって工作物に接触しており、いわゆる切れ刃逃げ面が大きく成長していることがわかる。これに対して、#800 の砥石では、こうした平坦な逃げ面の成長が見られない。

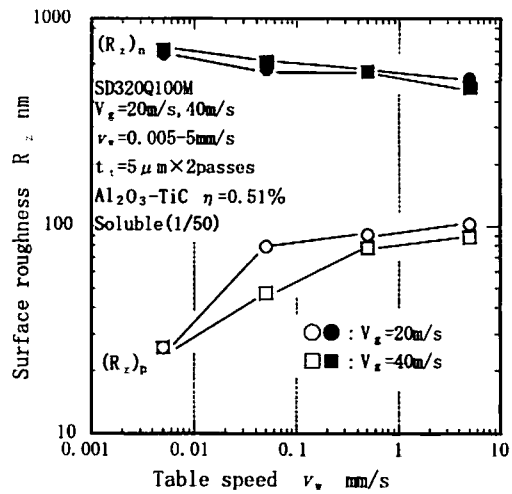
延性モード研削が工作物の軟化を伴いながら行われるとすれば、こうした切れ刃先端部の平坦な逃げ面の形成が、その実現に関与していることが推定される。粒度 #140 の砥石を使った各ファインセラミックスの研削結果が、全般的に良好だったことには、こうした大きな切れ刃逃げ面の影響が大きいと考えられる。



(a) HPSC の場合



(b) HIPSN の場合



(c) $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiC}$ の場合

図 2.14 仕上面粗さに及ぼすテーブル送り速度の影響

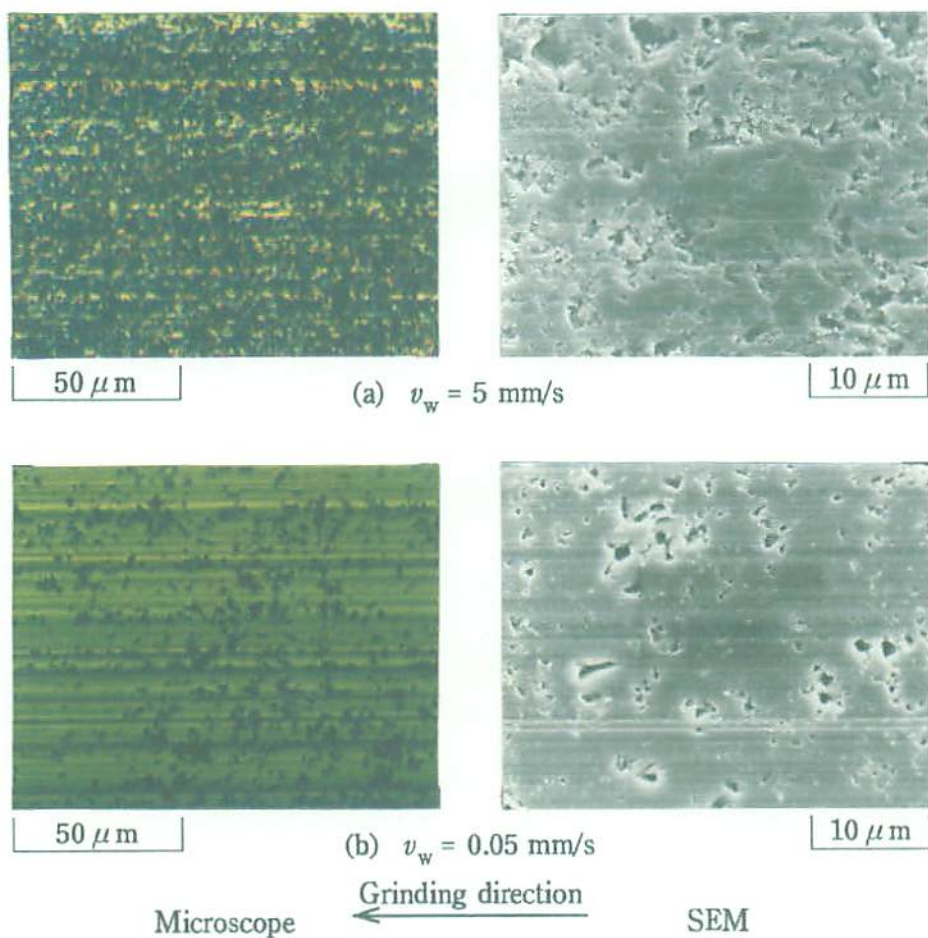


図 2.15 微分干渉顕微鏡と SEM による仕上面観察結果 (HPSC)
 [SD800Q50M, $V_g=20\text{m/s}$, $v_w=5\sim 0.05\text{mm/s}$ $t_t=2\ \mu\text{m}$, Soluble(1/50)]

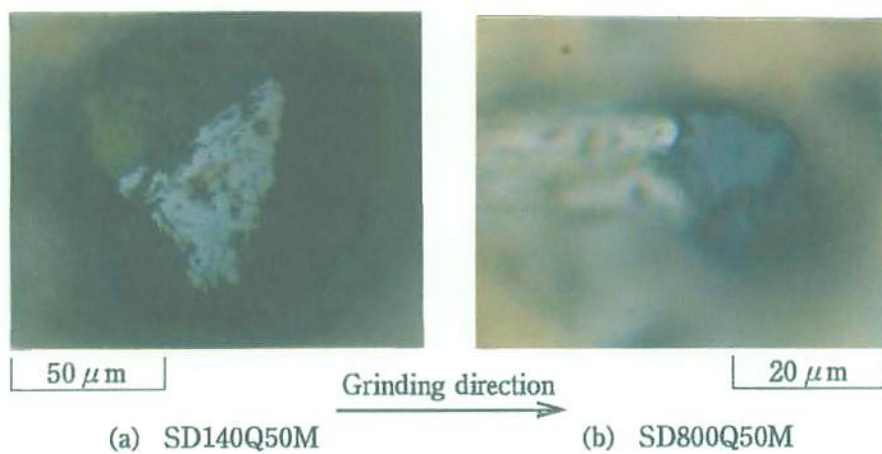


図 2.16 砥粒切れ刃の顕微鏡写真 (#140 と #320 の比較)

2.4 ファインセラミックスの超平滑研削

ここでは、前節の粗粒砥石を用いたファインセラミックスの延性モード研削に関する実験に引き続き、このプランジ研削で発生する盛り上がり条痕を消去するために考案された「超平滑研削法」を用いて、炭化けい素 (HPSC) およびアルチック ($\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiC}$) について実験した結果について述べる。

2.4.1 実験装置および実験方法

ファインセラミックスの延性モード研削で生じた盛り上がり研削条痕を消去するため、ここでは「超平滑研削」と呼ぶ研削法を用いている。図 2.17 は、この超平滑研削法を模式的に示したものである。この研削法では、工作物を通常の研削方向の送りと同時に軸方向へも送ることで、砥石作業面上の砥粒切れ刃が軸方向にスライドするかたちで、より効率的に研削に関与する。この軸方向の送り速度 $(v_w)_n$ と、研削方向のテーブル送り速度 $(v_w)_p$ の二つの速度を設定することで、実際の工作物送り速度は $(v_w)_c = \{(v_w)_n^2 + (v_w)_p^2\}^{1/2}$ の式で求められる値となる。なお、図中 B_{sw} は軸方向の送り幅、 f は研削方向の送り量である。

実験は、図 2.18 に示す NC 研削盤で実施した。この研削盤は、通常の NC 研削盤を全面的に再構成したもので、上記の超平滑研削法の実施にあわせ、主軸およびテーブルについての XYZ 方向の送り精度を $1\mu\text{m}$ に高めている。

また、図 2.19 には、この実験で用いた粒度 #140 および #320 の砥石作業面の顕微鏡画像を示す。写真中で明るく光っているのが砥粒切れ刃であり、前述した延性モード研削と同様に、超平滑研削法においても、こうした砥石作業面の状態を確認しながら研削を実施した。なお、工作物仕上面については、延性モード研削と同様に、微分干渉顕微鏡、WYKO TOPO-3D および AFM Nano-Scope を用いて測定した。

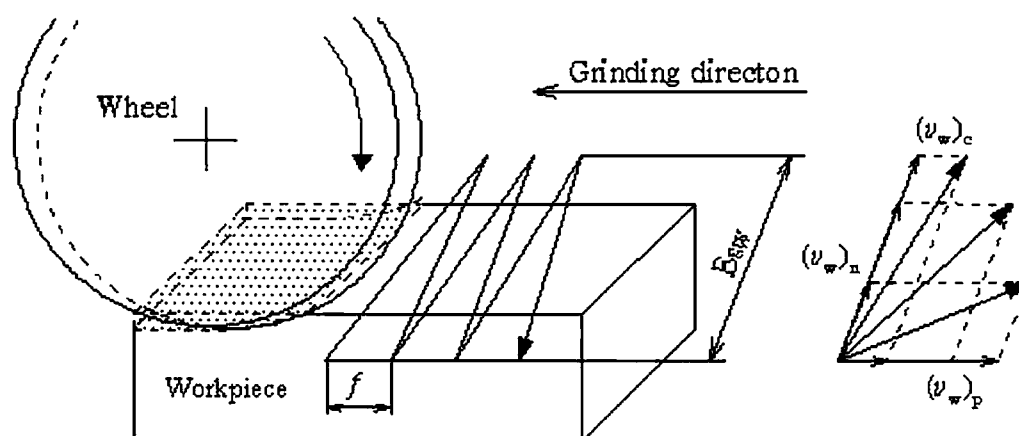


図 2.17 超平滑研削法

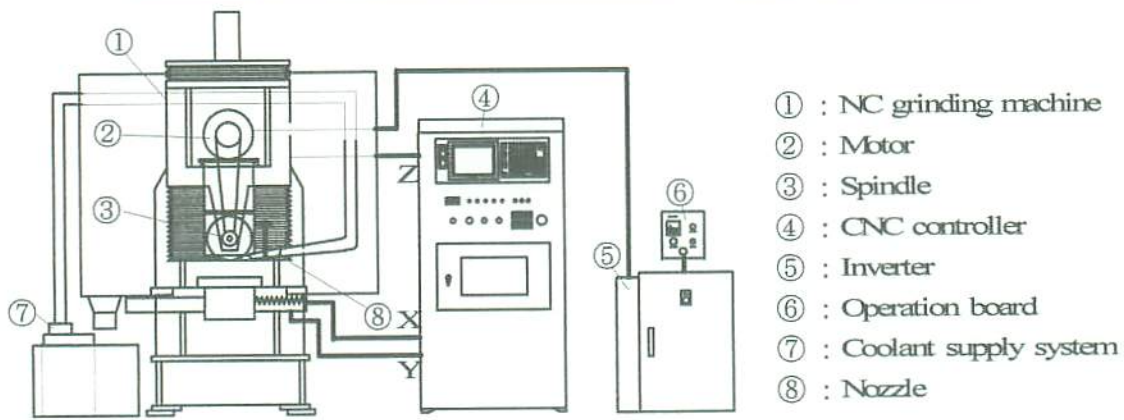
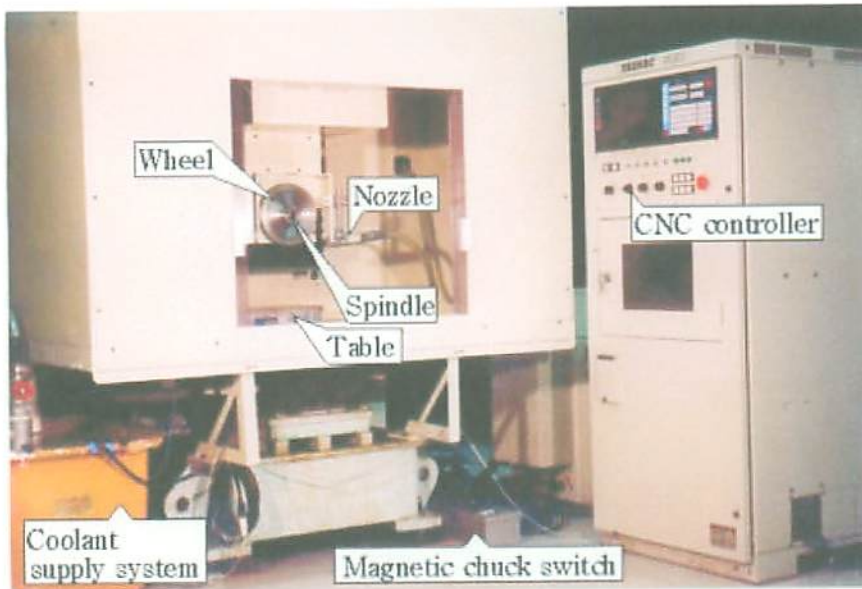


図 2.18 NC 研削盤の外観および構成



(a) SD140Q50M

(b) SD320Q50M

図 2.19 粗粒ダイヤモンド砥石作業面の顕微鏡画像

2.4.2 超平滑研削実験 (1) (HPSC の場合)

まず、ホットプレス法により焼結した炭化けい素 (HPSC) について、上記の超平滑研削法による研削実験を行った。実験条件は、表 2.8 に示すとおりである。砥石は、粒度#140 および 320, 集中度 50 または 100 のメタルボンドダイヤモンド砥石である。また、砥石周速度は 20m/s, 工作物切込み量は $2\ \mu\text{m/pass}$ で、上述の超平滑研削法で、テーブル送り速度(v_w)_p を 0.01mm/s から 0.0001mm/s まで、変化させながら実験を行い、工作物仕上面を測定した。

図 2.20 は 粒度#320 の砥石で、テーブル送り速度を (v_w)_p = 0.008mm/s, 0.004 mm/s, 0.001 mm/s と変化させながら超平滑研削したときの HPSC 仕上面の顕微鏡写真を示す。各研削とも合成送り速度は (v_w)_c = 3.6 mm/s で同じになるが、写真からわかるように、テーブル送り速度が遅くなるに連れ発生するクラックが少なくなっている。そして、(v_w)_p = 0.001mm/s では、画面上でわかるようなクラックがほとんどなくなる。この図から、テーブル送り速度(v_w)_p = 0.001mm/s での超平滑研削では、ほぼ完全な延性モード研削が実現できていると考えられる。

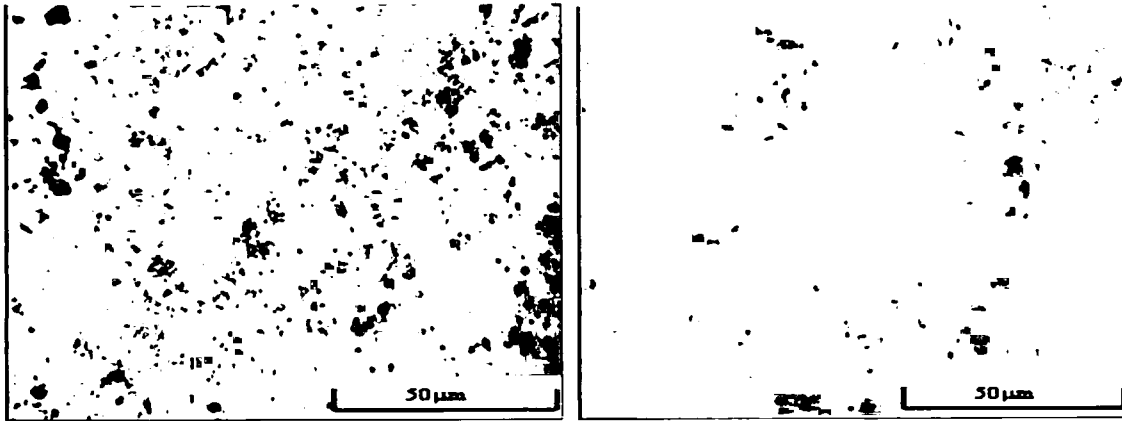
図 2.21 は上記の送り速度(v_w)_p = 0.008 mm/s と 0.001 mm/s で研削したときの仕上げ面を WYKO で測定した結果を示している。図からわかるように、工作物表面にはプランジ研削時に見られるような砥粒部のプロフィールを転写したような大きな研削条痕は見られず、平滑化が実現できている。送り速度 (v_w)_p = 0.008 mm/s の図 2.21(a)では、測定範囲での表面粗さは、87 nm(P-V), 12.7 nm(RMS)で、プランジ研削時の測定値 200 nm(P-V)よりかなり改善されている。これは、砥粒切れ刃による大きな盛り上がり条痕が消えたことによると考えられる。さらに、図 2.21(b)の送り速度 (v_w)_p = 0.001 mm/s の場合では、やや規則的な条痕が表面に現れ、表面粗さも 54 nm(P-V), 7.3 nm(RMS)と、さらに平滑化している。

図 2.22 は、粒度#140 の砥石を用い、送り速度(v_w)_p = 0.001 mm/s で研削したときの仕上面写真を示している。図からわかるように、工作物表面には完全に破壊痕が見られず、極めて平滑な仕上面になっている。また、図 2.23 はこの WYKO 画像である。測定範囲での表面粗さは、26 nm(P-V), 3.66 nm(RMS)で、測定値からも極めて高平滑な面になっていることがわかる。

図 2.24 は、図 2.23 と同じ仕上面を AFM で測定した結果である。3次元画像から、表面には $1\ \mu\text{m}$ 以下の極めて微小なクラックが存在しているものの、測定範囲全体でも、ほぼ±10nm 内の高平滑化が実現できていることがわかる。また2次元プロフィールから、こうした微細なマイクロホールを含んでも、研削方向と直角方向の表面粗さでも、約 6.4 nm(P-V), 1.5 nm(RMS) と極めて高平滑な仕上面が実現できていることがわかる。

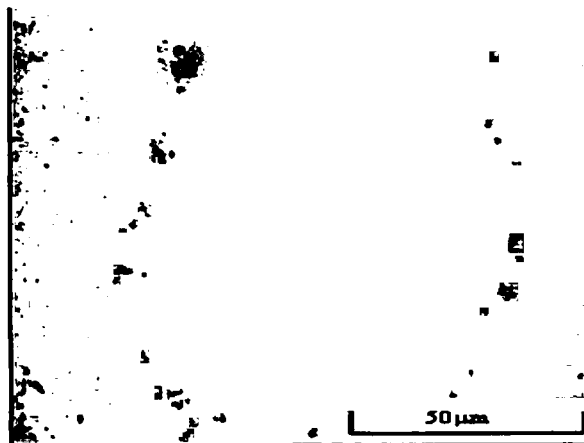
表 2.8 実験条件

研削盤	NC 研削盤
工作物	HPSC □10mm×10mm
砥石	SD140Q50M, SD320Q100M
砥石周速度	$V_g = 20 \text{ m/s}$
研削方法	超平滑研削法
送り速度	$(v_w)_p = 0.0001 - 0.01 \text{ mm/s}$
送り量	$f = 20 \mu\text{m}$ ($B_{sw} = 18 \text{ mm}$)
切込み量	$t_t = 2 \mu\text{m} \times 2 \text{ pass}$
研削液	Soluble(ss7 1/50), Flow rate: 12 l/min



(a) $(v_w)_p = 0.008 \text{ mm/s}$

(b) $(v_w)_p = 0.004 \text{ mm/s}$

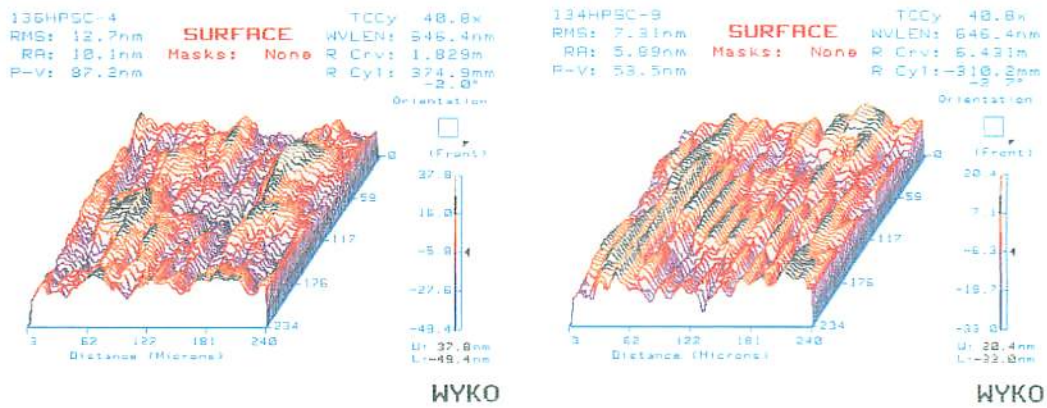


(c) $(v_w)_p = 0.001 \text{ mm/s}$

図 2.20 超平滑研削した HPSC の顕微鏡写真 (1)

(テーブル送り速度 $(v_w)_p = 0.008, 0.004, 0.001 \text{ mm/s}$)

[SD320Q100M, $V_g=20 \text{ m/s}$, $t_t=2 \mu\text{m}$, Soluble(1/50)]



(a) $(v_w)_p = 0.008 \text{ mm/s}$ (b) $(v_w)_p = 0.001 \text{ mm/s}$

図 2.21 超平滑研削した HPSC の WYKO 画像 (1)

[SD320Q100M, $V_g=20\text{m/s}$, $t_t=2 \mu\text{m}$, Soluble(1/50)]



Cutting direction | 50 μm

図 2.22 超平滑研削した HPSC の顕微鏡写真 (2)

[SD140Q50M, $V_g=20\text{m/s}$, $(v_w)_p = 0.001\text{mm/s}$, $t_t=2 \mu\text{m}$, Soluble(1/50)]

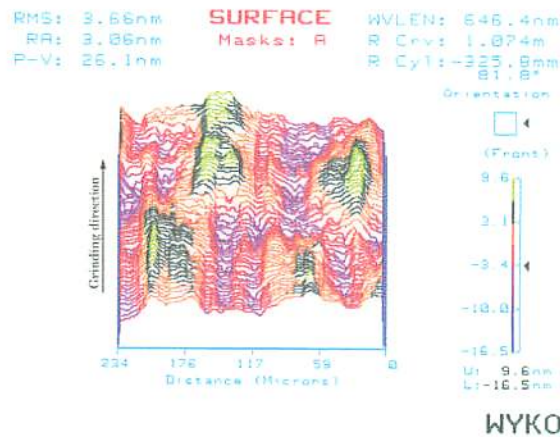


図 2.23 超平滑研削した HPSC の WYKO 画像 (2)

[SD140Q100M, $V_g=20\text{m/s}$, $t_t=2 \mu\text{m}$, Soluble(1/50)]

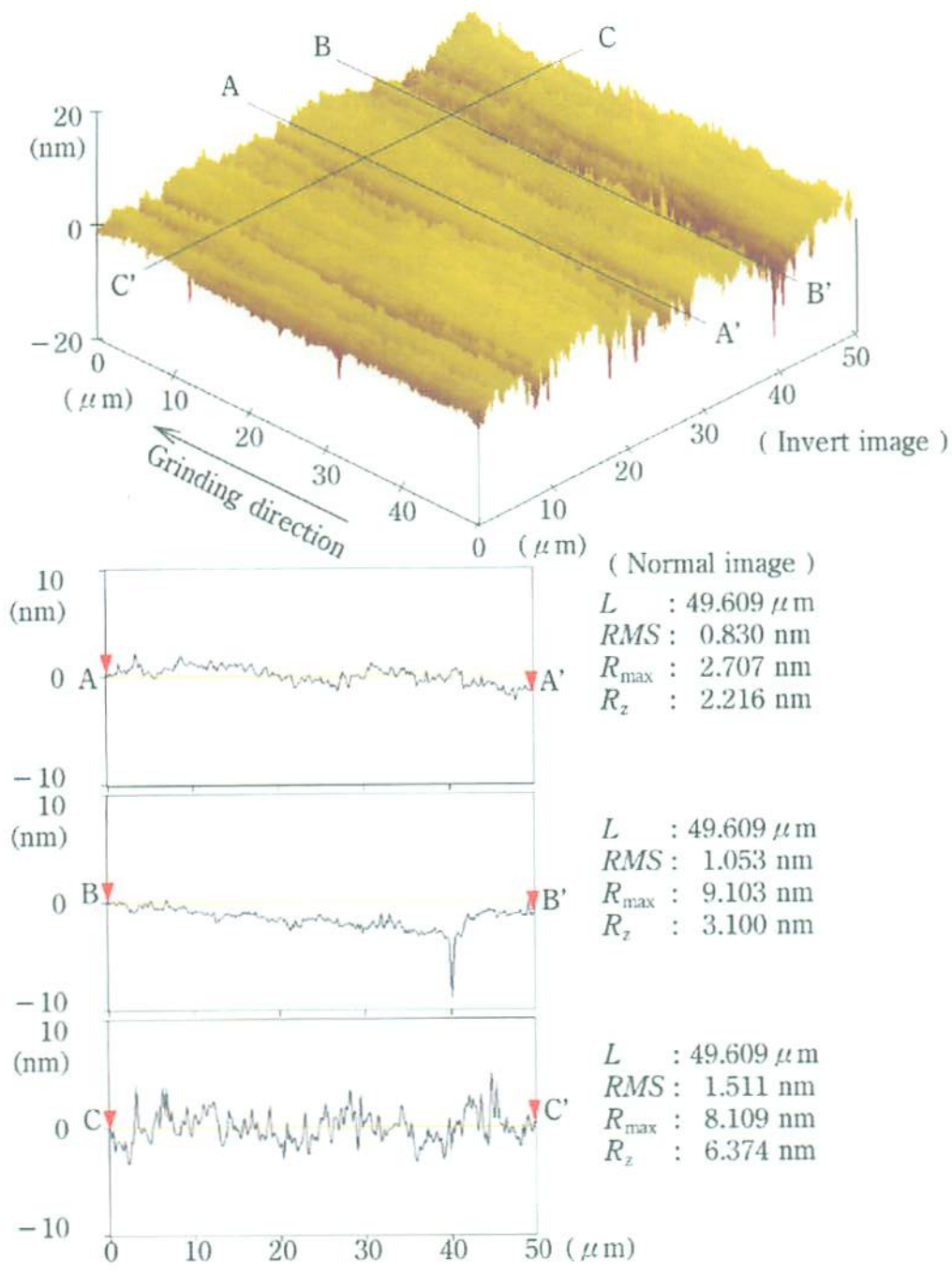


図 2.24 超平滑研削したファインセラミックス (HPSC) の AFM 画像

(テーブル速度 (v_w)_p = 0.001mm/s)

[SD140Q50M, $V_g=20\text{m/s}$, $t_t=2\ \mu\text{m}$, Soluble(1/50)]

2.4.3 超平滑研削実験 (2) ($\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiC}$ の場合)

次に、アルチック ($\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiC}$) について、同じく超平滑研削法による研削実験を行った結果について示す。実験条件は表 2.9 に示すとおりで、ほぼ HPSC の場合と同じである。

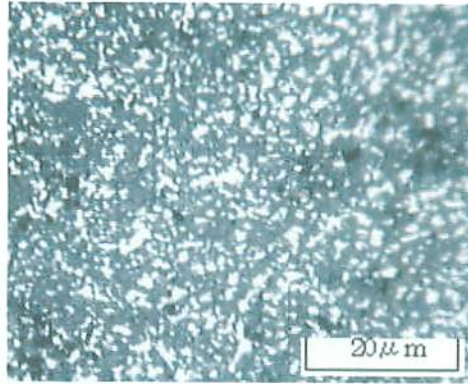
図 2.25 は、粒度#140 および#320 の砥石で、テーブル送り速度 $(v_w)_p = 0.001 \text{ mm/s}$ で超平滑研削したときの仕上面の顕微鏡写真である。双方とも実験条件は同じであり、写真からわかるようにいくつかの脆性破壊痕が見られ、HPSC ほどではないが、ほぼ延性モード研削面となっていると考えられる。

図 2.26 は、上記と同じ#140 および#320 の砥石による仕上面を WYKO で測定した結果である。HPSC の場合と同様に、プランジ研削時に見られる大きな研削条痕は見られず、高平滑な仕上面が得られている。#140 の使った図 2.26(a)では、測定範囲での表面粗さは、 40 nm(P-V) 、 6.8 nm(RMS) で、部分的には極めて高平滑な仕上面となっていることがわかる。また、#320 を使った図 2.26(b)の場合では、やや規則的な条痕が表面に現れ、仕上面粗さも 58 nm(P-V) 、 8.8 nm(RMS) と、やや大きくなっている。

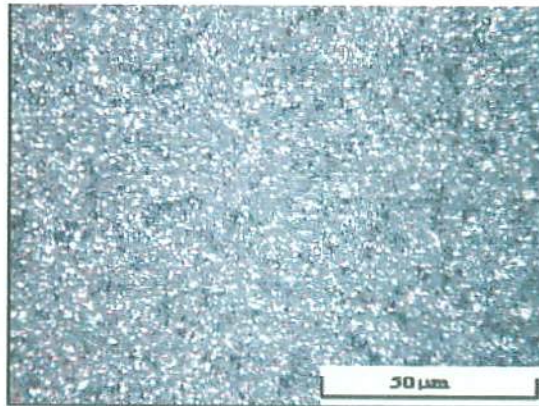
図 2.27 は、図 2.26(a)と同じ、#140 による仕上面を AFM で測定したものである。3次元画像から、プランジ研削の結果と同様に、表面には $1 \mu\text{m}$ 以下の極めて微小な凹凸が多数存在している。しかし、その深さはそれほどではなく、測定範囲全体でも、ほぼ $\pm 20 \text{ nm}$ 内の高平滑化が実現できている。2次元プロフィールの測定では、こうしたアルチック特有の微細な凹凸が影響して、研削方向と直角方向の表面粗さで、約 20 nm(P-V) 、 6.4 nm(RMS) と、HPSC ほどの高平滑な仕上面は実現できていないことがわかる。

表 2.9 実験条件

研削盤	NC 研削盤
工作物	$\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiC}$ □10mm×10mm
砥石	SD140Q50M, SD320Q100M
砥石周速度	$V_g = 20 \text{ m/s}$
研削方法	超平滑研削法
送り速度	$(v_w)_p = 0.0001 - 0.01 \text{ mm/s}$
送り量	$f = 20 \mu\text{m}$ ($B_{sw} = 18 \text{ mm}$)
切込み量	$t_l = 2 \mu\text{m} \times 2 \text{ pass}$
研削液	Soluble(ss7 1/50), Flow rate: 12 //min



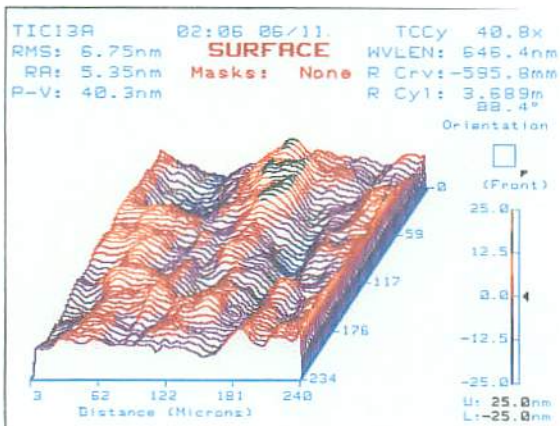
(a) #140 の場合



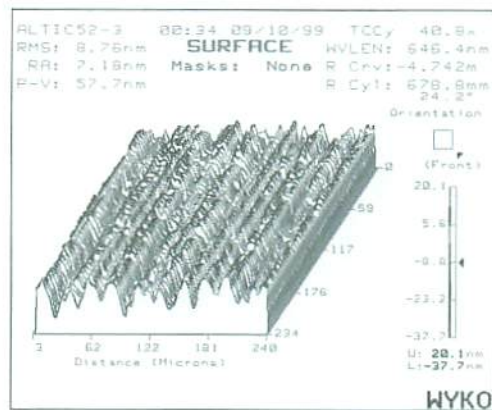
(b) #320 の場合

図 2.25 超平滑研削した $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiC}$ の顕微鏡写真

[SD140Q50M, $V_g=20\text{m/s}$, $(v_w)_p = 0.001\text{mm/s}$, $t_t=2 \mu\text{m}$, Soluble(1/50)]



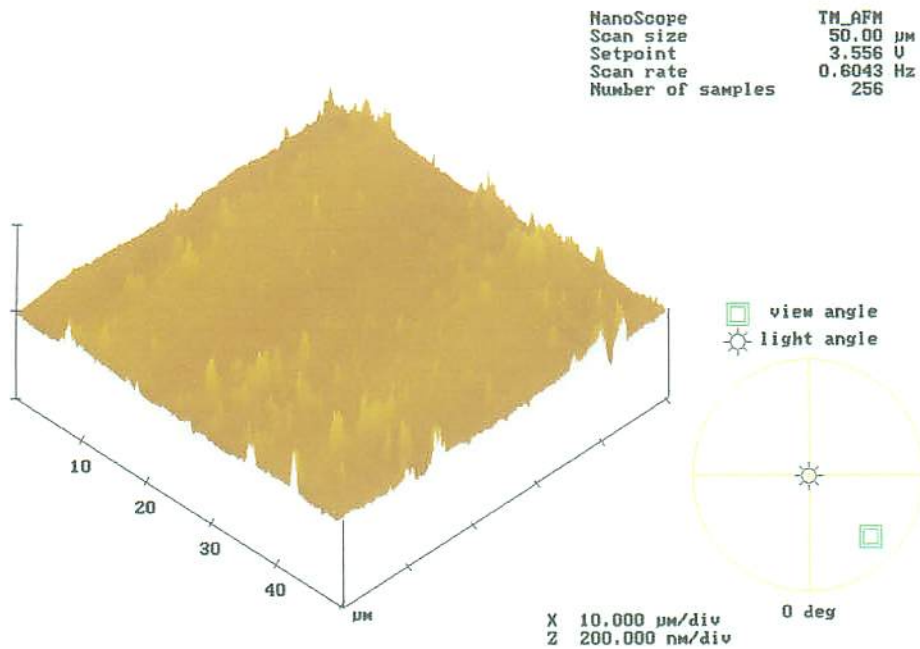
(a) #140 の場合



(b) #320 の場合

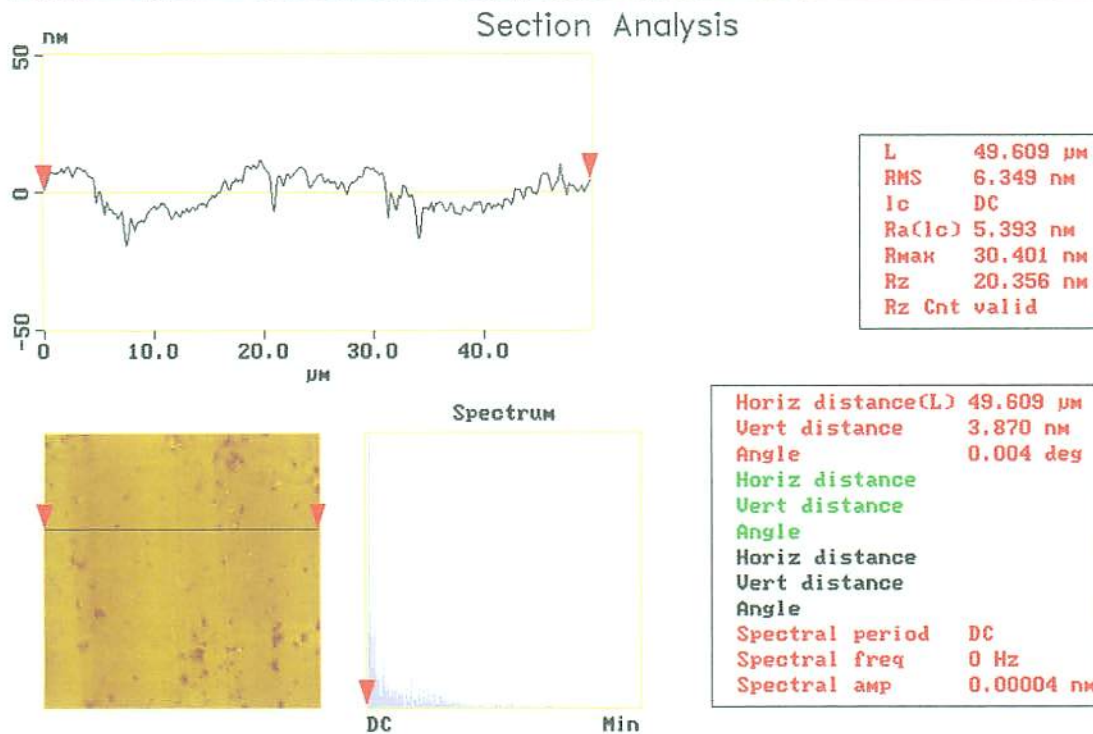
図 2.26 超平滑研削した $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiC}$ の WYKO 画像

[SD140Q100M, $V_g=20\text{m/s}$, $(v_w)_p = 0.001\text{mm/s}$, $t_t=2 \mu\text{m}$, Soluble(1/50)]



at_tai.000

Cursor Marker Spectrum Zoom Center Line Offset Clear



Cursor: fixed Zoom: 2:1 Cen line: Off Offset: Off

図 2.27 超平滑研削した $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiC}$ の AFM 画像

[SD140Q100M, $V_g=20\text{m/s}$, $(v_g)_p = 0.001\text{mm/s}$, $t_t=2 \mu\text{m}$, Soluble(1/50)]

2.4.4 粗粒砥石によるファインセラミックスの高平滑研削の可能性

2.4.2 および 2.4.3 の結果から、砥石を軸方向に送る超平滑研削法を用いることで、ブランチ研削で発生した盛り上がり条痕を消して、極めて高平滑な研削仕上面を得ることが確認できた。

図 2.28 は、ホットプレス炭化けい素 (HPSC) の超平滑研削における、テーブル送り速度 $(v_w)_p$ と工作物仕上面粗さの関係を示したものである。図からわかるように、超平滑研削法においても、テーブル速度の減少にともなって仕上面粗さが徐々に小さくなっていき、さらに一定の速度以下ではあまり変化しなくなることがわかる。この場合、臨界的なテーブル送り速度は、 $(v_w)_p = 0.008$ mm/s 程度と考えられ、この速度以下では、仕上面粗さはほとんど影響を受けなくなり、このときの仕上面粗さが、この研削条件での臨界粗さと考えることもできる。

図 2.29 は、アルチック (Al_2O_3-TiC) の超平滑研削における、テーブル送り速度 $(v_w)_p$ と工作物仕上面粗さの関係を示したものである。この場合にも、若干のばらつきはあるものの、テーブル速度の減少にともなって仕上面粗さが徐々に小さくなっていき、一定の速度以下ではあまり変化しなくなる現象が見られる。また、この場合にも、臨界的なテーブル送り速度は $(v_w)_p = 0.008$ mm/s 程度と考えられ、臨界粗さも同様にともめることができる。

以上のように、超平滑研削法では極めて高平滑な研削を実現できることが確認できたが、ほぼ同一の研削条件でも、細かな砥石作業面状態の違いで良好な研削仕上面が得られたり得られなかったりする不確定な現象も発生した。上記のアルチックにおけるテーブル速度を遅くしていく実験結果や、同じ粗粒砥石である粒度#320での実験結果が#140の結果を上回れないことなども、その一例である。このように、超平滑研削においては、ブランチ研削以上に、微妙な砥石作業面状態の違いが研削結果に大きく反映することがわかった。

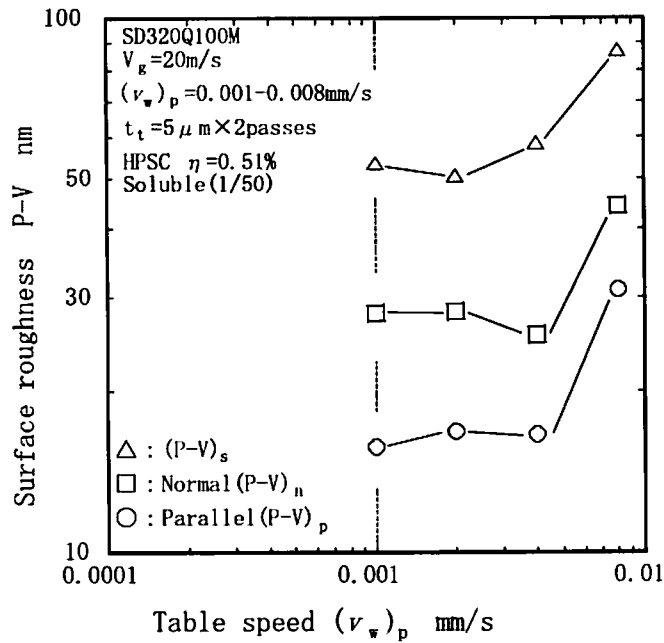


図 2.28 超平滑研削における工作物仕上面粗さに与えるテーブル送り速度の影響(1)
 [HPSC, SD320Q100M, $V_g=20\text{m/s}$, $t_t=2\mu\text{m}$, Soluble(1/50)]

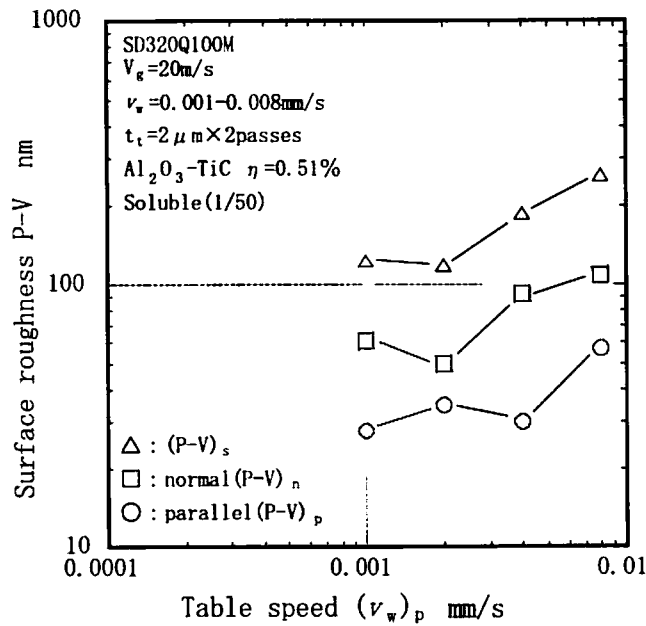


図 2.29 超平滑研削における工作物仕上面粗さに及ぼすテーブル送り速度の影響(2)
 [$\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiC}$, SD320Q100M, $V_g=20\text{m/s}$, $t_t=2\mu\text{m}$, Soluble(1/50)]

2.5 結 言

本章では、粗粒砥石を用いたファインセラミックスの高平滑研削の可能性について述べた。2.3では、テーブル送り速度を極めて遅くすることにより、砥粒切込み量を少なくして、工作物表面の軟化を伴う延性モード研削が実現できることを示し、クラックの無い極めて良好な仕上面が得られることを示した。また、2.4では、さらに高平滑な仕上面を得るために、砥石を軸方向に送る「超平滑研削法」を用いて、ナノオーダーの極めて平滑な仕上面が得られることを示した。

本章で得られた結果をまとめると、以下ようになる。

まず、通常のスランジカットによる延性モード研削については、

- 1) 炭化けい素 (HPSC) では、工作物テーブル送り速度 $v_w=0.05\text{mm/s}$ とすることで、ほぼ完全な延性モード研削面が得られた。このとき、仕上面荒さは約 $200\ \mu\text{m}$ (P-V) であるが、これは、砥粒幅の研削条痕が残るためである。
- 2) 窒化けい素 (HIPSN) では、工作物テーブル送り速度 $v_w=0.05\text{mm/s}$ とすることで、ほぼ全面に広がる延性モード研削面を得ることができたが、わずかながら脆性破壊痕が残った。仕上面荒さも約 $300\ \mu\text{m}$ (P-V) と HPSC より低下した。
- 3) アルチック ($\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiC}$) でも、工作物テーブル送り速度 $v_w=0.05\text{mm/s}$ とすることで、ほぼ全面に広がる延性モード研削面を得られ、脆性破壊痕は HIPSN より少なかった。仕上面荒さも約 $250\ \mu\text{m}$ (P-V) と HPSC より若干低下する程度であった。

また、超平滑研削については、

- 4) 炭化けい素 (HPSC) では、工作物テーブル送り速度を $v_w=0.01\text{mm/s}$ 以下に下げ、 $v_w=0.001\text{mm/s}$ としたときに極めて完全な延性モード研削面が得られた。このとき、仕上面荒さも $\pm 20\text{nm}$ (P-V) と極めて高平滑な面が実現できた。
- 5) アルチック ($\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiC}$) でも、工作物テーブル送り速度 $v_w=0.01\text{mm/s}$ 以下にすることで、高平滑な仕上面が得られた。しかし、アルチックの場合には、素材の特性もあり、脆性破壊痕が生じやすいこともわかった。

そして、これらの双方の場合ともに、

- 6) 高平滑研削の実現に関して、砥石の砥粒先端の切れ刃状態が、極めて研削仕上面の良否に影響を与えやすいことがわかった。

参 考 文 献

- 1) 宮下政和：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.
- 2) 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に関する研究（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, 08 (1991) 1406.
- 3) 餅田正秋，鈴木英明，島宗 勉：ファインセラミックスの研削仕上面状態に及ぼす加工条件の影響（第1報）－SiC, Si₃N₄ および Al₂O₃ の仕上面生成機構－，精密工学会誌，57, 02 (1991) 304.
- 4) 市田良夫，貴志浩三，蓮田裕一：ファインセラミックスのワンパス鏡面研削法に関する研究（第1報），精密工学会誌，58, 03 (1992) 463.
- 5) 大森 整，飯野敏明，山田秀雄：超精密 ELID 研削面の表面解析と除去機構の考察，1995 年度砥粒加工学会学術講演会講演文集，(1995) 1.
- 6) 山倉英雄，田村利夫：加工精度に及ぼす研削砥石結合材の影響－メタルボンド砥石を用いた脆性材料の鏡面研削加工（第2報），1993 年度精密加工学会秋季大会学術講演論文集，(1993) 1007.
- 7) 安井平司，有野芳弘，松永邦夫：ファインセラミックの高平滑研削に関する研究－仕上面粗さに及ぼすセラミックス製造法の影響－，1995 年度精密加工学会秋季大会学術講演論文集，(1995) 759.
- 8) 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.
- 9) 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），精密工学会誌，63, 9 (1997) 1270.

第3章 延性モード研削に及ぼす砥粒切れ刃状態の影響

3.1 結 言

第2章では、ファインセラミックスの高平滑研削を目的として、粒度#140, 集中度 50 などの粗粒メタルボンドダイヤモンド砥石を用い、砥石作業面状態をできるだけ均質にした状態で、延性モード研削を実現する加工実験を行った結果について示した¹⁾。対象とした工作物は、従来から延性モード研削を検討していた構造用ファインセラミックスであるホットプレス法を用いて焼結した炭化けい素 (HPSC) および熱間静水圧法で焼結した窒化けい素 (HIPSN)、そして、電子磁性材料として重要なアルチック (Al_2O_3 -TiC) であり、結果として粗粒砥石を用いた延性モード研削および超平滑研削が十分実現可能なことを確認できた。

これらの実験では、砥石作業面状態を顕微鏡で観察するなど、切れ刃状態と工作物仕上面状態の関連性を探るための予備的な検討を行っている。その中で、一般的な研削の条件とは異なり、砥石作業面上の砥粒先端の切れ刃が平坦な逃げ面を持つ状態になることが、延性モード研削面を得るための条件のひとつとなることがわかってきた。

こうした延性モード研削の可能性については、すでになんらかの報告があり、その中にも上記のような砥粒切れ刃の状態に着目して、砥石作業面の調整を指摘するものもある²⁾³⁾。しかし、延性モード研削面の生成事体がまだ完全には解明されていないこともあって、この切れ刃の状態と工作物仕上面の関係について正面から検討を加えたものはほとんど見当たらない。したがって、定量的な関係はもとより、定性的な関係についても基本的な検討がなされていないのが現状のようである。

そこで、本章ではさらに、上述した切れ刃先端部の平坦な逃げ面の大きさを表わす指標として、一般的な評価パラメータとして用いられている、切れ刃面積率に焦点を当てた検討を行うことにした。実験では、炭化けい素 (HPSC) と窒化けい素 (HIPSN) を工作物として、粒度 #140 のメタルボンドダイヤモンド砥石を用いて、砥石作業面状態を示す評価パラメータである切れ刃面積率を形直し等によって変化させながら、延性モード研削を行い、その仕上面を測定した。ここでは、その実験結果について示し、延性モード研削に及ぼす切れ刃面積率の影響について検討した結果について述べる。

3.2 超砥粒砥石の構成と分類

3.2.1 超砥粒砥石の構成

研削砥石は、一般砥石と超砥粒砥石（ダイヤモンド砥石およびCBN砥石）に大別できる。本節では、本研究で使用している超砥粒砥石についてその概要を簡単にまとめる⁴⁾⁵⁾。

研削砥石は、無数に近い切れ刃となる砥粒、それを保持する結合剤、および切りくずの一時的な逃げ場所や研削液を研削点に運ぶキャリアとして働く気孔の3要素から構成されている。研削加工には、その工作物や目的に応じて多種多様な砥石が存在する。図3.1に無気孔型超砥粒砥石の構造を示す。

図に示すように超砥粒砥石は台金(ホイール)と超砥粒層により構成されている。台金は一般にアルミニウム合金などの高剛性金属で作られることが多く、その外周に暑さ数mmの超砥粒層を接着する。超砥粒層が数mmですむのは超砥粒が損耗しにくいことで、このことがまた高剛性の台金の使用を可能にしている。したがって、砥石全体が砥粒で構成される一般砥石と比べ、砥石の結合度のむら等によるアンバランスが少なく、また回転遠心破壊強度も高く、従来不可能とされていた高速研削が可能となる。また、このことが砥石の小径化・高精度化および砥石軸の大径化による高剛性化など、研削盤の小型化を含めた研削全般にわたる多様な加工技術の改良を可能としている。

図3.2に超砥石の砥粒層断面を顕微鏡撮影したものを示す。図からもわかるように、超砥粒層は研削に参与する超砥粒とそれを保持するための結合剤から構成される。

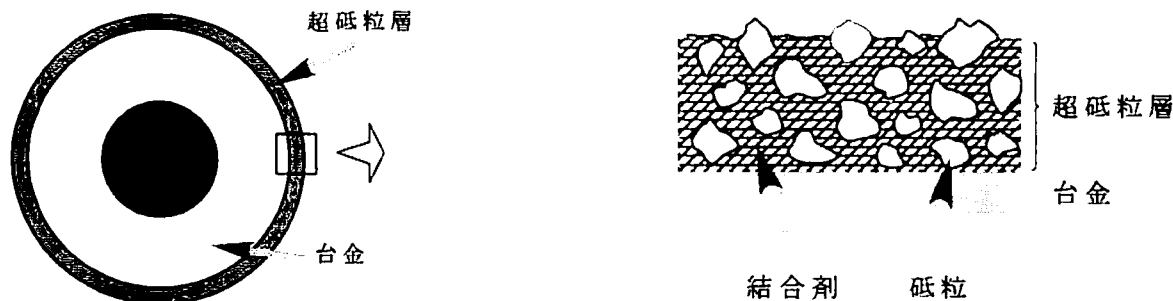


図 3.1 超砥粒砥石の構造

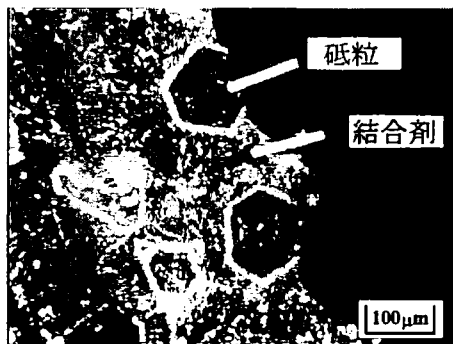


図 3.2 超砥粒砥石断面の顕微鏡写真（CBN砥石）

3.2.2 超砥粒砥石の分類

超砥粒砥石は、通常、砥石を構成する超砥粒の種類、粒度およびその集中度、そして結合剤の種類と結合度により、その研削性能が決定される。図 3.3 には、超砥粒砥石の構成内容の表示法を示す。

SD 砥粒の種類	140 粒 度	N 結合度	50 コンセントレーション	M 結 合 剤
D:ダイヤモンド SD:合成ダイヤモンド SDC:金属被覆した合成 ダイヤモンド CBN:立方晶窒化ほう素 CBNC:金属被覆した立方晶 窒化ほう素	16メッシュ ~ 3,000メッシュ	H J(軟) L N(中) P R(硬) T	ct/cm ³ 50=2.2 75=3.3 100=4.4 125=5.5 150=6.6	B:レジン M:メタル V:ビトリ ファイド P:電着

図 3.3 超砥粒砥石の表示法

a) 砥 粒 : 砥粒は切れ刃として加工物に食い込み塑性変形させ、せん断を起こさせて最終的に切りくずを生成しそれを排出させる働きをするものである。砥粒は研削砥石の性能を基本的に支配する。現在、砥粒は大きく分類して (1) 酸化アルミニウム砥粒 (A 系砥粒)、(2) 炭化ケイ素砥粒 (C 系砥粒)、(3) ダイヤモンド砥粒、(4) 立方晶窒化ほう素砥粒 (CBN 砥粒) の 4 種類が用いられている。ここでは、本研究で用いたダイヤモンド砥粒について述べる。

ダイヤモンド砥粒は、物質中最高の硬さ (ヌープ硬さ 7000 以上) をもつ物質であり、あらゆる材料に対して食い込む能力をもつ。主として超合金や硬脆材料の研削に適しており、石英、ガラス、フェライト、シリコン、セラミックス等の研削研磨にも十分な性能を発揮する。しかし、ダイヤモンドの化学成分が炭素であることから、高温では酸化されやすく熱に弱い欠点があり、研削加工時に高い発生熱を生じる一般的な鋼類の研削には適していないとされている。

ダイヤモンド砥粒の種類は数多くあるが、大別すると天然ダイヤモンド、合成ダイヤモンド、金属被覆をした合成ダイヤモンドの 3 種に分けられる。JIS 規格 (B4131) では、天然ダイヤモンド砥粒を D、人造ダイヤモンド砥粒を SD、金属被覆された人造ダイヤモンド砥粒を SDC の記号で表している。しかし、現在、天然ダイヤモンドは比較的大型のものが電着砥石などの限られた用途に用いられるだけで、研削砥石に使用されているほとんどのダイヤモンド砥粒は、合成ダイヤモンドである。合成ダイヤモンドは、合成条件を制御することにより、形状や特性の異なる各種のダイヤモンドを合成することができる。

人造ダイヤモンド砥粒(SD)は、ダイヤモンド結晶が生まれる高温高压条件を人為的に作り出すことによって製造されたもので、製造条件を変化させることにより結晶構造や破砕性を改善した多くの品質のものが作られている。また人造ダイヤモンドに金属被覆を施した砥粒(SD)は、主に砥粒表面の凹凸を拡大し、結合剤との結合を改善したものである。金属被覆には主にニッケル(Ni)コーティング性が用いられ、その量は55%が一般的で、その他に33%のものがあり、用途別によって種々のものが製品化されている。

b) 粒度：砥粒の大きさは、粒度で示される。粒度は切れ刃の大きさを決定すると同時に、切れ刃の個数を決める要因となる。粒度が細くなれば、一定の体積中に含まれる切れ刃数は指数関数的に増加し、砥石作業面には切れ刃が数多く形成されることになるが、一般に粒度が細くなると切れ刃がより小さくなり、砥粒1粒当たりの保持力も低くなる。したがって、細粒の砥石は、仕上面はよいが、高能率研削のような高負荷研削には適さない。

超砥粒砥石の粒度の種類を、表3.1に示す。一般に粒度は、初めの数字だけが表示されており、例えば、325/400の砥石は325のみが記されている。

粒度325/400までは一般的にメッシュサイズと呼ばれ、JIS規定で制定されてい

るが、さらに細かい粒度についてJIS規定はまだ制定されていない。各メーカーから独自にミクロンサイズとして市販されており、粒度呼称や粒度表示がまちまちであるが、ミクロンサイズ砥粒の例を表3.2に示す。表中の粒度呼称が、粒径の上限と下限値をミクロン表示したものであり、この方法が一般化している。

メッシュサイズの粒度分布は、粒度数に対応したふるい方法を含め、表3.3のように規定されている。例えば、粒度16/18~30/40は術ふるいによる粒度分布、また粒度40/50~325/400はエレクトロフォームふるいによる粒度分布となっている。一般的な平均粒径は、表中の2段目と3段目の、ふるいととどまる粒径の平均値が目安である。例えば、本実験で用いた粒度#140(／170)の砥石では、90 μ mと116 μ mの平均値103 μ mが砥粒の平均粒径の目安となる。

表 3.1 粒度の種類

16/18	18/20	20/30	30/40
40/50	50/60	60/80	80/100
100/120	120/140	140/170	170/200
200/230	230/270	270/325	325/400

表 3.2 ミクロンサイズパウダ

粒度呼称	概略の粒度表示
0-1/2	60000
0-1	28000
1-3	12000
2-4	8000
3-6	5000
4-8	3000
5-10	2200
6-12	1800
10-15	1400
15-20	1000
20-30	800
30-40	600
40-60	400/500

表 3.3 エレクトロフォームによる粒度分布

粒度	1段目のふるい	2段目のふるい		3段目のふるい			4段目のふるい
	99.9%通過しなければならぬ (μm)	一定量以上とどまっていけないふるいとその量 (μm)	(%)	一定量以上とどまっていけないふるいとその量 (μm)	(%)	通過してもよい最大の量 (%)	2%以上通過してはならないふるい (μm)
40/50	600(3)	455	8	302	90	8	213
50/60	455	322	8	255	90	8	181
60/80	384	271	8	181	90	8	127
80/100	271	197	10	151	87	10	107
100/120	227	165	10	127	87	10	90
120/140	197	139	10	107	87	10	75
140/170	165	116	11	90	85	11	65
170/200	139	97	11	75	85	11	57
200/230	116	85	11	65	85	11	49
230/270	97	75	11	57	85	11	41
270/325	85	65	15	49	80	15	—
325/400	75	57	15	41	80	15	—

c) 集中度 : 研削砥石の単位体積あたりの砥粒数によって決まる粗密の程度を組織という。JIS においては、ビトリフアイド砥石およびレジノイド砥石について最も密なものを 0, 最も粗いものを 14 として、15 段階に分け、組織区分砥粒率(研削砥石中に占める砥粒の容積比)で行うことを規定としている。超砥粒砥石では、

組織に対応する数値が集中度で、ダイヤモンド砥石では 1cm^3 に砥粒が 4.4ct (カラット : 1ct = 0.2g) 存在するとき、集中度 100 と定義されている。またこのとき体積分率は約 25% である。JIS 規格(B4131)では、表 3.4 のように 5 段階の集中度の例が示されている。本実験で用いた集中度 50 のダイヤモンド砥石では、体積率 12.5% 程度ということになる。

表 3.4 集中度

集中度	砥粒の含有率 mg/cm^3 (ct/ cm^3)	砥粒の体積 (%)
150	1320 (6.6)	37.5
125	1100 (5.5)	31.3
100	880 (4.4)	25
75	660 (3.3)	18.8
50	440 (2.2)	12.5

d) 結合剤および結合度 : 結合剤 (ボンド剤) は、研削抵抗および回転応力に耐え、砥粒を保持するのが役目であり、結合剤の種類も研削の結果を左右する要因となる。一般に、砥粒は結合剤によって弾性的に保持されていて、基盤となる結合剤によって砥石の弾性が異なってくる。このわずかな弾性の違いによって、加工物への切れ刃の食込み深さや実際の研削に関与する切れ刃数などが変化して、形状寸法や仕上面粗さなどの加工精度に大きな影響を与える。また結合剤によって熱に対する耐久力が異なり、これによって砥粒保持力の低下が発生して、加工精度に悪影響を及ぼすことにもなる。表 3.5 に、超砥粒砥石の代表的な結合剤の種類とその特徴について示す。

表 3.5 各結合剤の種類と性質

結合剤	レジノイド	メタル	ビトリファイド	電着
材質	熱硬化性樹脂	金属粉末	ガラス粉末	ニッケル
製法	200℃以下で熟成	700℃～1000℃高温焼結	1000℃以下で高温焼成	めっき法
砥石の構造	ボンドマトリックス中に砥粒埋込み無気孔	ボンドマトリックス中に砥粒埋込み無気孔	ボンドブリッジにより砥粒を保持有気孔	砥粒一層
砥粒保持力	小	大	大	大
耐熱性	小	中	大	大
硬さ	低	中	高	中
抗折強度	小	大	小	大
弾性率	小	大	大	大
熱膨張率	大	中	小	中

結合度は、砥粒が砥粒層中に保持される保持力の大小関係を示すもので、図 3.5 に示すように、JIS では軟質の H, J, L, 中間の N, 硬質の P, R, T のように 3 種のグレードが規格されている。一般に、保持力が小さい場合には、砥粒が脱落する目こぼれが生じやすく、保持力が大きい場合には、砥粒先端の磨滅磨耗が進行する目つぶれが生じやすくなる。本実験で用いたダイヤモンド砥石は Q 表記となっており、中間よりやや固めの結合度となっている。

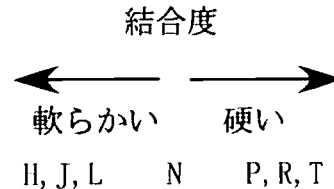


図 3.5 結合度の表示

本研究では、粗粒のメタルボンドダイヤモンド砥石：SD140Q50M, SD320Q50M および SD320Q100M を用いて実験を行った。上記の解説にそって、これらの砥石の内容をまとめると、以下ようになる。

SD140Q50M : 粒度は #140 メッシュサイズで、粒径が 90～116 μm, 平均粒径が 103 μm. 結合剤はメタルで、結合度は Q とやや硬く、集中度は 50 で、砥粒体積率は 12.5%と比較的低い。これによって、切り屑の除去等が効率的に行われ、ファインセラミックスなどの難削材の研削においても、目つぶれ等を起こしにくい。

SD320Q50M : 粒度は #320 メッシュサイズで粒径が 40～57 μm, 平均粒径が 48 μm となり、上の砥石の 1/2 である。粒度を小さくすることで、砥粒の突出し量が小さくなり、研削条根が低くなると考えた。他の条件は、上と同じである。

SD320Q100M : 粒度等は上と同じ。集中度が 100 で、砥粒の体積率が 25%となり、砥粒密度が 2 倍になり、砥粒先端の切れ刃面積率を大きくすることが期待できる。

3.3 実験装置および実験方法

3.3.1 実験装置の構成

本研究では、砥石作業面状態を正確に評価するために、同一の砥石作業面および砥粒を追跡観察することが極めて重要なこととなる。しかし、砥石外周上の多数の砥粒の中から、同一の砥粒を探し出す作業は極めて困難であり、従来、かなりの時間を要していた。そこで、図 3.6 に示すようなエンコーダを用いた砥石位置検出システムを製作した。これによって、砥石作業面の観察は、砥石主軸に取り付けたエンコーダ出力を使って、つねに同一の砥石作業面画像が得られるようにすることができる。撮影は、研削盤上に取り付けた光学顕微鏡とカメラあるいは CCD カメラを用いて行い、この画像を利用して砥石作業面状態を評価した。

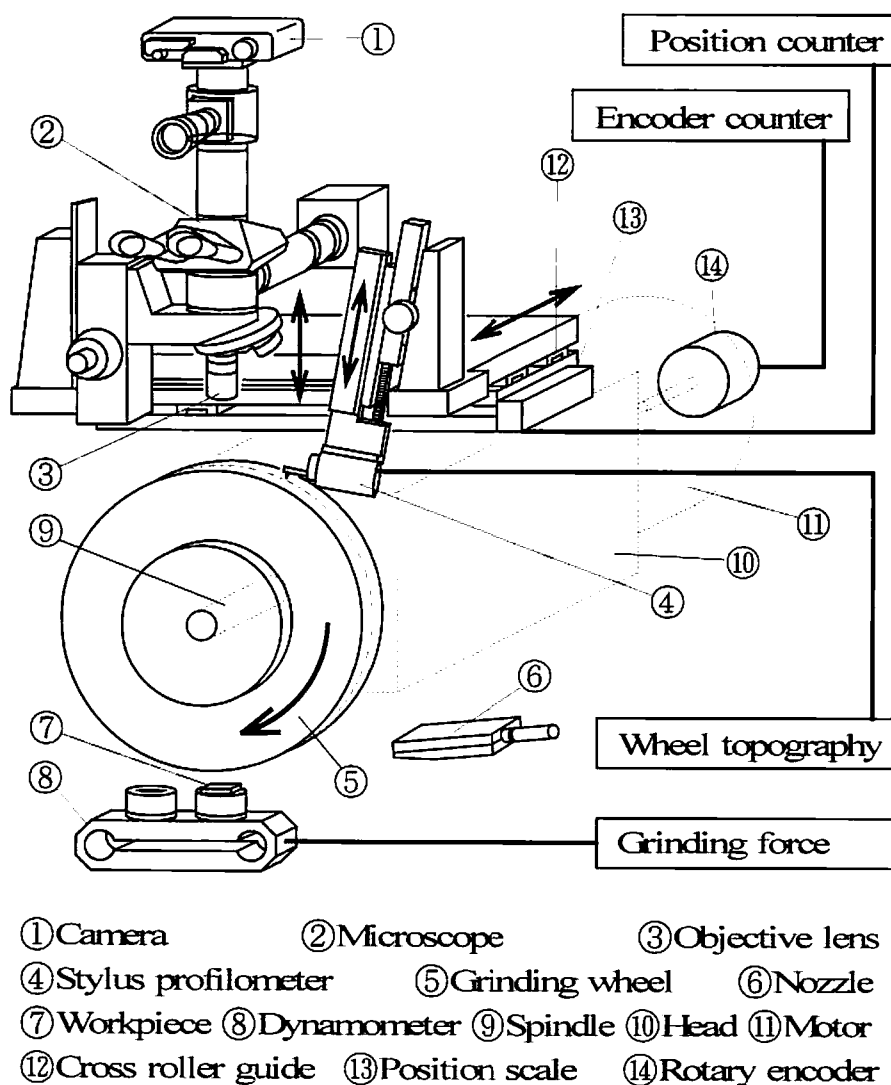


図 3.6 実験システムの構成

実験は、2章でも示した平面研削盤（岡本工作機械製作所 PSG-63DX）を用い、プランジカット湿式研削で行った。使用した砥石は、粒度#140、集中度 50 の、高剛性のメタルボンドダイヤモンド砥石で、直径が約 300mm、砥石幅は約 10mm である。

湿式研削後の仕上面は光学式の微分干渉顕微鏡で観察した。また、仕上面粗さの測定は、2章と同様に、小坂式触針式表面粗さ計（触針先端半径 $5\mu\text{m}$ ）および光干渉式高精度微小表面粗さ測定器（WYKO TOPO-3D：測定法は $1\mu\text{m}$ 毎の平面位置での表面凹凸のデジタル測定）で行った。なお、触針式による仕上面粗さの測定は正確に研削方向と平行方向、およびそれと直角方向に測定するため、CCD カメラを用いて触針の走査方向を確認して行った。

3.3.2 砥石作業面の観察と測定

本実験装置では砥石作業面をカメラで撮影しながら、砥粒の変化を観察し、砥石作業面の切れ刃面積率等の測定を行う。測定部には、高精度のテーブルユニット（クロスローラーガイド）を X, Y 方向にそれぞれ 2 個ずつ用いることで、顕微鏡を前後左右にスムーズに動かせ、軸方向にも任意の位置で砥石作業面撮影を行うことができる。

このようにして撮影した砥石作業面画像と切れ刃評価の概念図を、図 3.7 に示す。一般に砥石作業面画像では、図のように、砥粒が結合剤の中に点在するかたちで表れ、その先端に実際の研削に関与する切れ刃（切れ刃逃げ面）が光沢をもつ部分として表れる。今回の実験では、特に、この切れ刃の状態が研削結果に影響を与えると考えた。

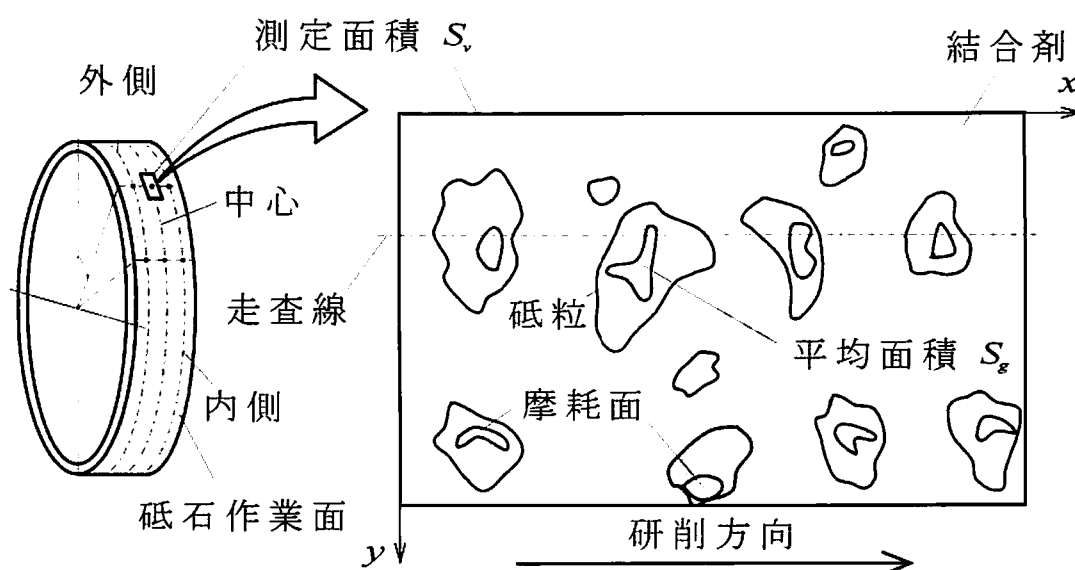


図 3.7 砥石作業面画像観察と切れ刃面積率の算出

研削性能を左右する砥石作業面性状,すなわち砥粒切れ刃の形状や分布状態で定まる微細な幾何学的形状(Micro-geometry)を一般に砥石作業面(表面)トポグラフィと言う。形直しや目直しは、この砥石作業面トポグラフィを最適な状態に調整する作業であり、この良否によって砥石の性能すなわち研削特性が大きく変化する。また、研削時の砥粒切れ刃と工作物の干渉状態も、砥石作業面トポグラフィによって変化するため、研削機構の解明のためには、この測定と定量化が必要不可欠な作業となる。

砥石作業面トポグラフィを表す評価パラメータとして、以下のようなものが提案されている。これらの評価パラメータの多くは測定方法によって規定されているものがほとんどで、研削機構上の明確な意味合いから定義されたものではないが、一般的な砥石の作業面状態を示す尺度として利用されている。

砥粒切れ刃の形状や大きさを示すパラメータとして、

① 切れ刃 (摩耗) 面積 (Wear-flat area): $S \mu\text{m}^2$

砥粒先端の切れ刃 (逃げ面) 部分の大きさを表わし、延性モード研削の実現において、注目される要素となった。面積で表わす。

② 切れ刃面積率 (Cutting-edge ratio): $\eta \%$

上記の切れ刃面積を測定面積で割ったもの。砥石作業面に対する、切れ刃部分の比率を表わす。上記と同様に、延性モード研削において、その評価基準として用いられる。また、砥粒切れ刃の分布を表すパラメータとして、

③ 切れ刃間隔 (Cutting-edge spacing): w, mm

各切れ刃の間隔を測って、その平均値を求めたもの。一般には、研削方向距離を測ることが多い。

④ 切れ刃密度 (Number of cutting points per unit area): C, mm^{-2}

単位面積当たりの切れ刃の個数を示したもの。砥粒の個数を示す砥粒密度 (Number of grains per unit area): G, mm^{-2} も使われることが多い。

⑤ 切れ刃間隔 (Successive cutting-edge spacing): a, mm

研削方向に引いた一定幅のライン上に存在する切れ刃の平均間隔を求めたもの。上記の切れ刃間隔よりさらに同一外周上にある砥粒切れ刃の状態を評価するもの。

⑥ 累積切れ刃個数 (Cumulative number of cutting points per unit length): n_z, mm^{-1}

同じく、研削方向に引いたライン上に存在する切れ刃の数をカウントしたもの。

これ以外にも、砥粒の突き出し量などを表すものとして、

⑦ 砥粒突き出し量 (Protrusion height of abrasive grain): $h_f, \mu\text{m}$.

⑧ チップポケット平均深さ (Average depth of chip pocket): $h_p, \mu\text{m}$.

などのパラメータがある。ここでは、延性モード研削の実現と最も関係があると考えられる、切れ刃面積率 η を用いて、砥石作業面の評価を行うことにした。

3.3.3 実験方法および条件

実験は、工作物として、ホットプレス法で焼結された炭化けい素 (HPSC) および熱間静水圧法で製造された窒化けい素 (HIPSN) を用い、砥石周速度、テーブル速度、砥石切込みを一定にして、切れ刃面積率を $\eta=0.47\sim 1.39\%$ と変化させ、その変化による仕上面の変化を観察して、切れ刃面積率が仕上面に及ぼす影響を検討した。その実験条件を表 3.6 に示す。

切れ刃面積率は実験ごとの砥石の切れ刃面積率を研削盤上に取り付けた砥石作業面観察・測定システムを用いて観察・測定を行い算出した。砥石は、前節と同じく粒度 #140、集中度 50 と粗粒で、比較的砥粒密度の小さいメタルボンドダイヤモンド砥石を使用した。砥石周速度は $V_g=20\text{m/s}$ である。切れ刃面積率は、各実験後にダイヤモンドブロックツルアを用いて形直しすることによって次第に大きくしていった。形成した砥石作業面の切れ刃面積率は、 $\eta=0.47\sim 1.39\%$ (幅約 $860\mu\text{m}$ 、長さ約 $1100\mu\text{m}$ の範囲の砥石作業面の 40 ヶ所の観察結果) で、その間の連続切れ刃間隔は $a=1.0080\text{mm}\sim 1.0145\text{mm}$ と、切れ刃面積率を変化させても、ほとんど変化しなかった。

湿式研削後の仕上面は、前節と同様に微分干渉顕微鏡と走査型電子顕微鏡 (SEM) で観察した。また、粗さ測定も同様に小坂式触針式表面粗さ計 (触針先端半径 $5\mu\text{m}$)、光干渉式超高精度微小表面測定器 (WYKO TOPO-3D) で行った。

表 3.6 実験条件

Workpiece	HPSC (Hot pressed SiC) HIPSN (Hot isostatic pressed Si ₃ N ₄)
Wheel	SD140Q50M
Wheel speed	$V_g = 20 \text{ m/s}$
Table speed	$v_w = 0.05 - 5 \text{ mm/s}$
Depth of cut	$t_t = 5 \mu\text{m} \times 5 \text{ passes}$
Coolant	Soluble (1/50), Flow rate : 12 l/min

3.4 切れ刃面積率を変えた延性モード研削実験(1) (HPSC の場合)

3.4.1 研削仕上面の観察結果

図 3.8 に、切れ刃面積率を $\eta=0.47$ と 0.68% にした砥石作業面状態で、さらに、テーブル速度を $v_w=50\text{mm/s}$ から 0.05mm/s まで変化させながら、炭化けい素 (HPSC) を研削した場合の仕上面写真を示している。同じテーブル速度では、切れ刃面積率の小さな $\eta=0.47\%$ より切れ刃面積率の大きな $\eta=0.68\%$ の方が、脆性破壊的なクラックの発生が減少する傾向にあることがわかる。切れ刃面積率が $\eta=0.47\%$ の場合、 $v_w=0.05\text{mm/s}$ でクラックが消え、ほぼ延性モード研削となるが、 $\eta=0.68\%$ の場合には、 $v_w=0.5\text{mm/s}$ で、かなり延性モードに近い面となる。さらに、 $v_w=0.05\text{mm/s}$ になると、工作物全面で、ほぼ完全な延性モード研削面となる。

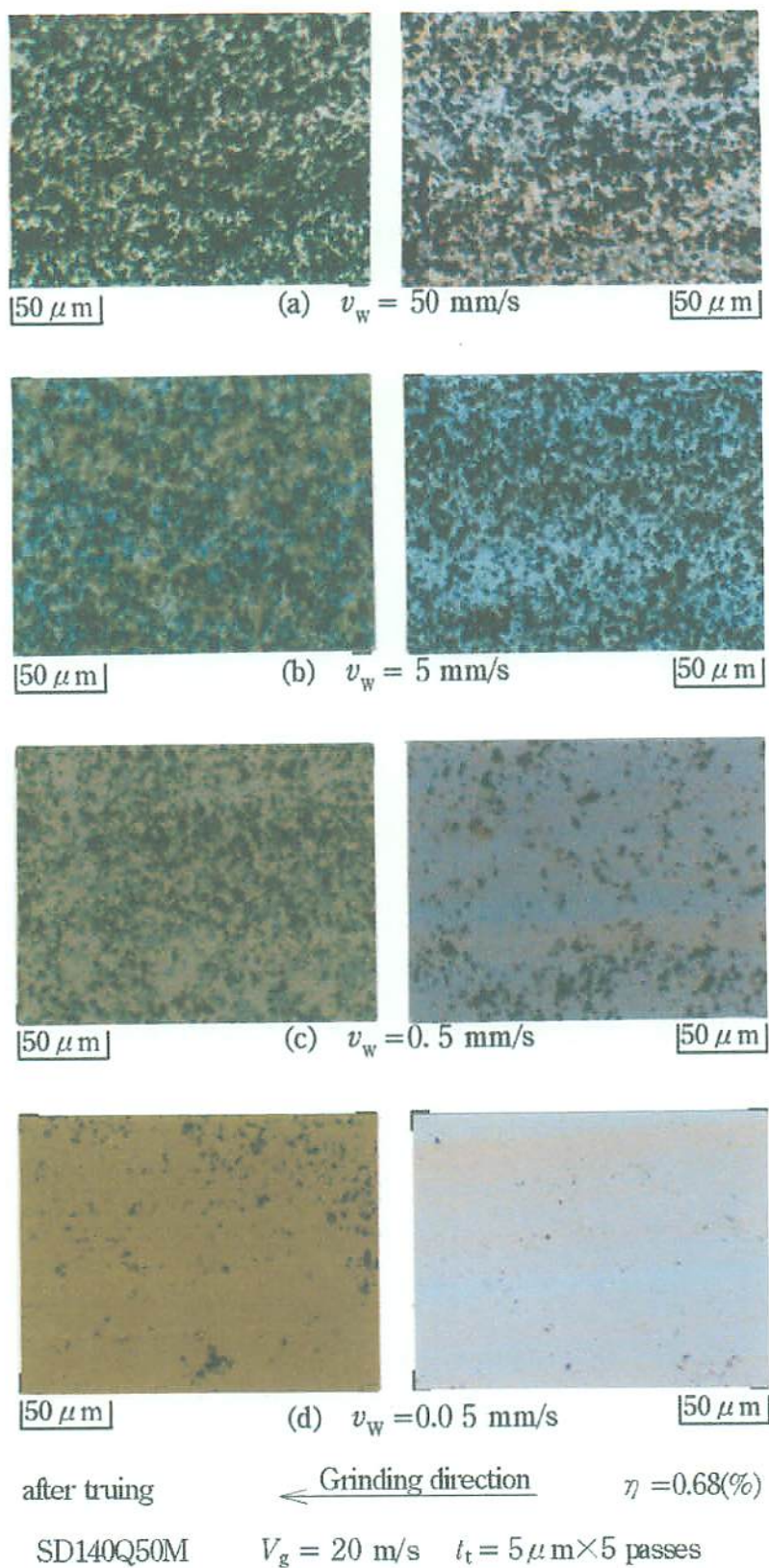


図 3.8 切れ刃面積率 η の違いによる工作物仕上面の変化 (1)
 [HPSC, SD140Q50M, $V_g=20\text{m/s}$, $v_w=0.05\text{--}50\text{mm/s}$, $t_t=5 \mu\text{m} \times 5\text{passes}$, Soluble(1/50)]

3.4.2 工作物仕上面粗さの変化

図 3.9 は、さらに切れ刃面積率を $\eta = 0.68$ と $\eta = 1.39$ の砥石作業面状態にして、テーブル速度も $v_w = 0.05 \text{ mm/s}$ と遅くして延性モード研削を行ったときの、仕上げ面状態を比較したものである。切れ刃面積率を上げることで、さらにクラックが減少し、仕上げ面状態が改善されていることがわかる。

図 3.10 は、それぞれの仕上面 (□約 $240 \mu\text{m}$) を WYKO により測定した結果を示す。この像から、プランジカット研削のために生じる研削方向にそった大きな研削条痕が生じているのがわかる。高さは $80 \sim 240 \text{ nm}$ 程度で、条痕幅は大きいもので $100 \mu\text{m}$ 程度ある。3次元の仕上面粗さ (P - V , □約 $240 \mu\text{m}^2$) は、それぞれ $\eta = 0.47\%$ では P - $V = 240 \text{ nm}$, $\eta = 0.68\%$ では

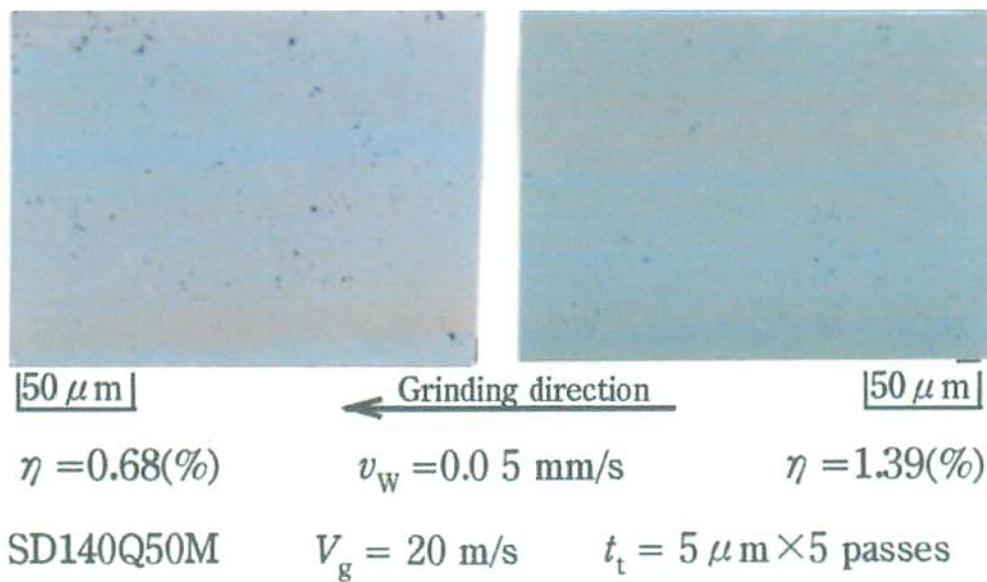
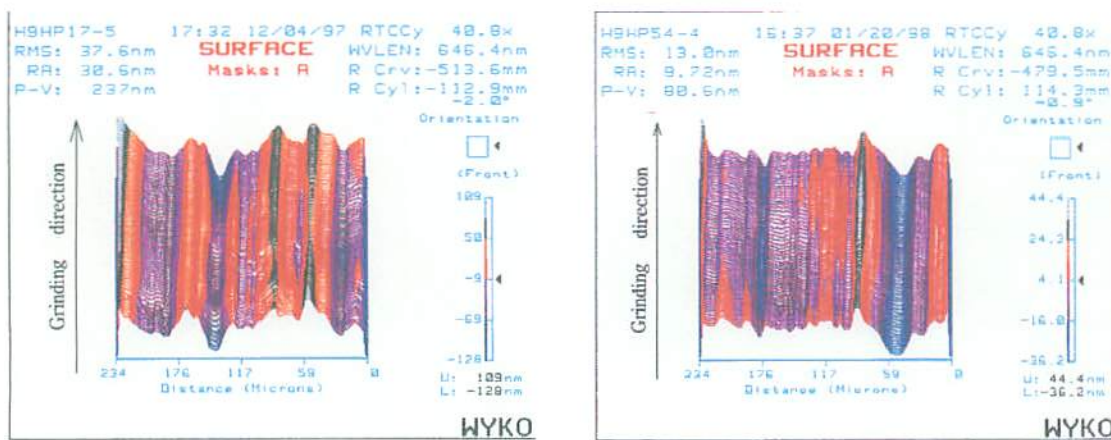


図 3.9 切れ刃面積率の違いによる工作物仕上面の変化 (2)



(a) $\eta = 0.47\%$ の場合

(b) $\eta = 1.39\%$ の場合

図 3.10 切れ刃面積率の違いによる工作物仕上面の変化 (3) (WYKO 画像)

$P-V=170\text{nm}$, $\eta=1.39\%$ では $P-V=85.6\text{nm}$ 程度となった。切れ刃面積率を増大させていくと盛り上がり条根の高さが小さくなっており、これは、プランジ研削で、砥石作業面の凹凸がそのまま転写された結果だと考えられる。

3.4.3 切れ刃面積率と仕上げ面粗さの関係（HPSCの場合）

図 3.11 は、切れ刃面積率を $\eta=0.47\% \sim 1.39\%$ 、テーブル送り速度を $v_w=0.05 \sim 50\text{mm/s}$ まで変化させながら、炭化けい素(HPSC)を湿式研削したときの仕上面粗さ R_z の変化を示している。2章でも示したように、プランジ方向の粗さ $(R_z)_p$ 、軸方向の粗さ $(R_z)_n$ を問わず、テーブル速度が小さくなるにつれて減少しているが、特に $(R_z)_n$ については大きな変化となっている。

切れ刃面積率の影響も、テーブル速度が小さくなるにつれ顕著となり、 $(R_z)_p$ 、 $(R_z)_n$ の双方とも、 η が大きいほうが小さくなる傾向にある。しかし、テーブル速度 $v_w=0.05\text{mm/s}$ の場合でみると、 $\eta=0.47$ と $\eta=0.82$ では、 $(R_z)_p$ 、 $(R_z)_n$ の双方とも値が大きく変化しているが、 $\eta=0.82$ と $\eta=1.39\%$ の場合には大きな変化は生じていない。このことは、テーブル送り速度の場合と同じように、臨界的な切れ刃面積率が存在することが予想される。しかし、今回の実験の結果からは、その明確な値を割り出すまでにはいたらなかった。

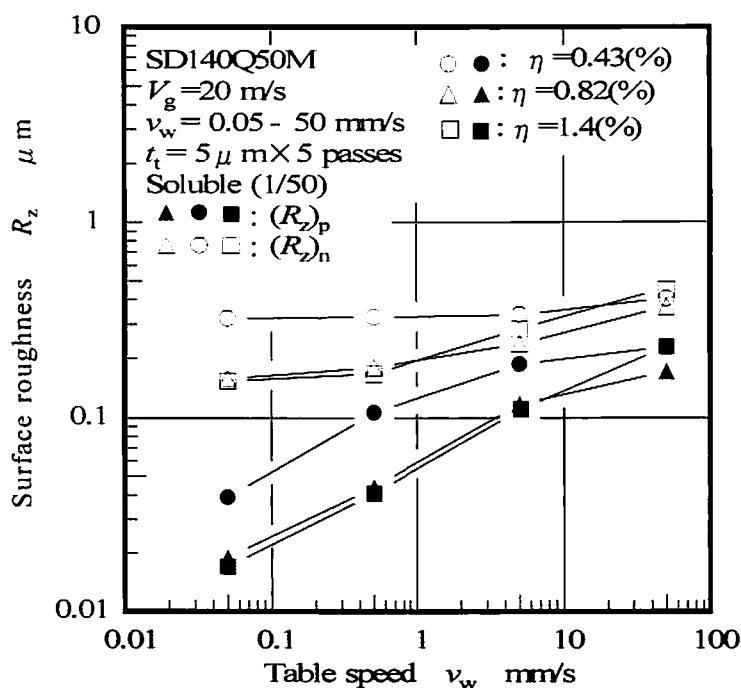


図 3.11 テーブル速度と仕上面粗さの関係

3.5 切れ刃面積率を変えた延性モード研削実験(2) (HIPSNの場合)

さらに、ファインセラミックスの延性モード研削と切れ刃面積率の関係を調べるため、ほぼ同条件で、熱間静水圧法で焼結された窒化けい素(HIPSN)のプランジ研削を行い、その影響について検討した。

3.5.1 研削仕上面の観察結果

図 3.12 に、砥石周速度 $V_g=20\text{m/s}$ の条件で、切れ刃面積率を $\eta=0.6$ および 1.4% に変化した砥石を用いて、テーブル速度を $v_w=50\sim 0.05\text{mm/s}$ と遅くしながら、窒化けい素(HIPSN)を湿式研削した際の工作物仕上面の顕微鏡写真を示す。図からわかるように、どちらの切れ刃面積率の場合も、第2章で示した結果と同様にテーブル送り速度を小さくしていくことで、仕上面は延性モード研削に近づいていく。そして、最もテーブル速度が遅い $v_w=0.05\text{mm/s}$ になると、かなり延性モード面が増加する。ただ、HPSCの場合と比べると、全体的に脆性破壊による痕が数多く残り、HISPNでの延性モード研削実現の難しさを示している。しかし、切れ刃面積率 $\eta=1.4\%$ 、テーブル速度 $v_w=0.05\text{mm/s}$ の場合には、ほぼ全面的な延性モード研削面が得られており、このことは、切れ刃面積率など砥石作業面状態を調整することで、HIPSNの場合でも、より高平滑な延性モード研削が実現できる条件が存在することを示している。

そこで、砥石周速度を $V_g=50\text{m/s}$ と高速化して、砥粒あたりの実切込み量を抑える条件で、延性モード研削の可能性を探ってみた。図 3.13 は、その工作物仕上面状態である。砥石周速度 $V_g=20\text{m/s}$ の場合と比較すると、全般的に仕上げ面がやや改善されていることがわかる。切れ刃面積率 $\eta=0.6\%$ の場合でも、 $V_g=20\text{m/s}$ の場合には見られなかった延性面が得られており、テーブル速度 $v_w=0.05\text{mm/s}$ での結果は、ほぼ良好な延性モード研削面となっている。

しかし一方で、砥石周速度を $V_g=50\text{m/s}$ に上げることで、 $v_w=5, 50\text{mm/s}$ など、テーブル速度が大きい場合には、焼き付いたような脆性破壊痕が全面的に広がり、かえって仕上面が悪化する現象も見られた。砥石周速度を上げると、砥石のバランス調整などが難しくなり、最適な延性モード研削条件を保つことの困難さをうかがわせるが、同時に、研削抵抗や熱的な環境の測定を含め、より詳細な検討が必要なことを示している。

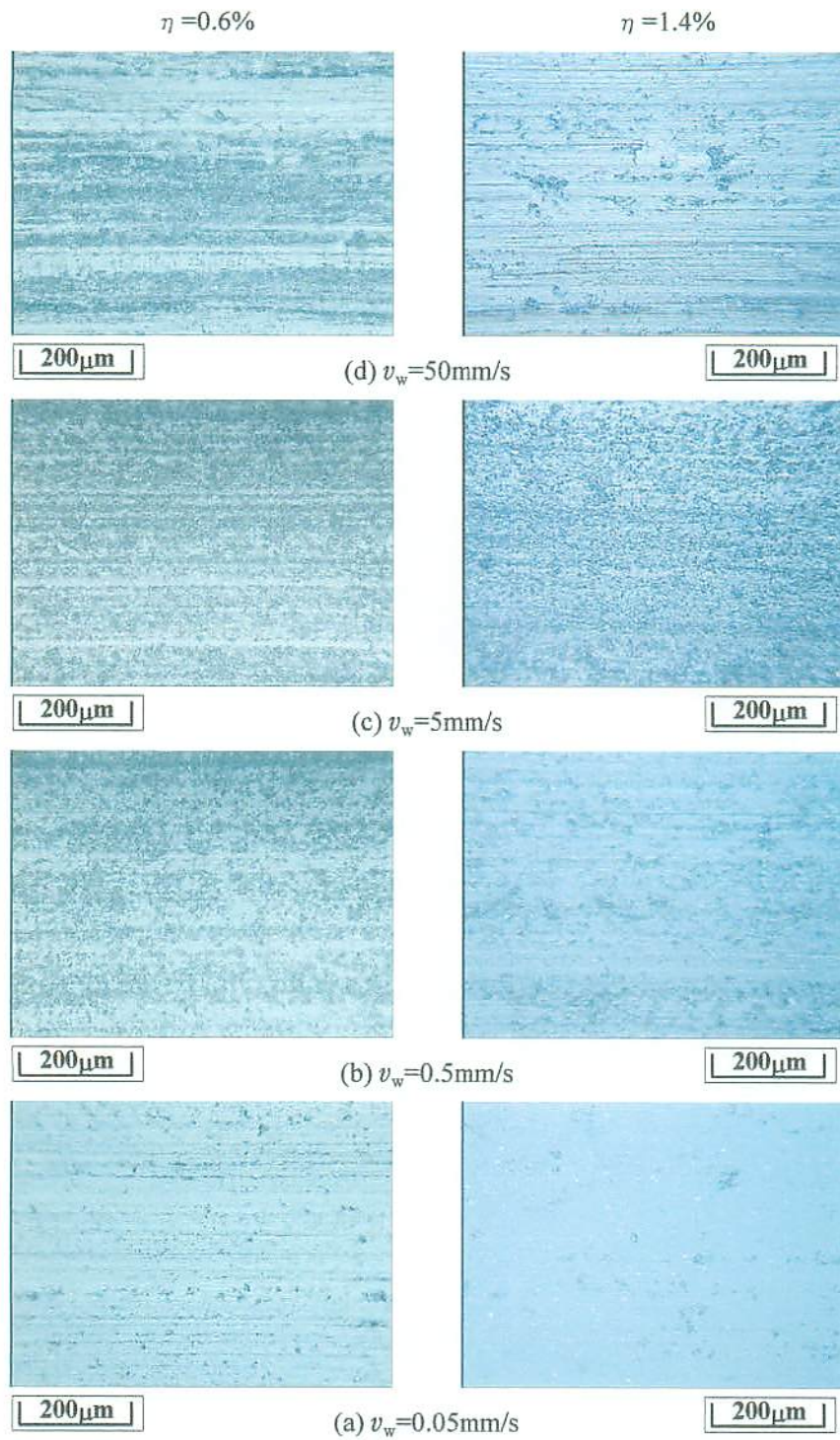


図 3.12 切れ刃面積率 η の違いによる工作物仕上面の変化 (2)
 [HIPSN, SD140Q50M, $V_g=20\text{m/s}$, $v_w=0.05\text{--}50\text{mm/s}$, $t_t=5\ \mu\text{m} \times 5\text{passes}$, Soluble(1/50)]

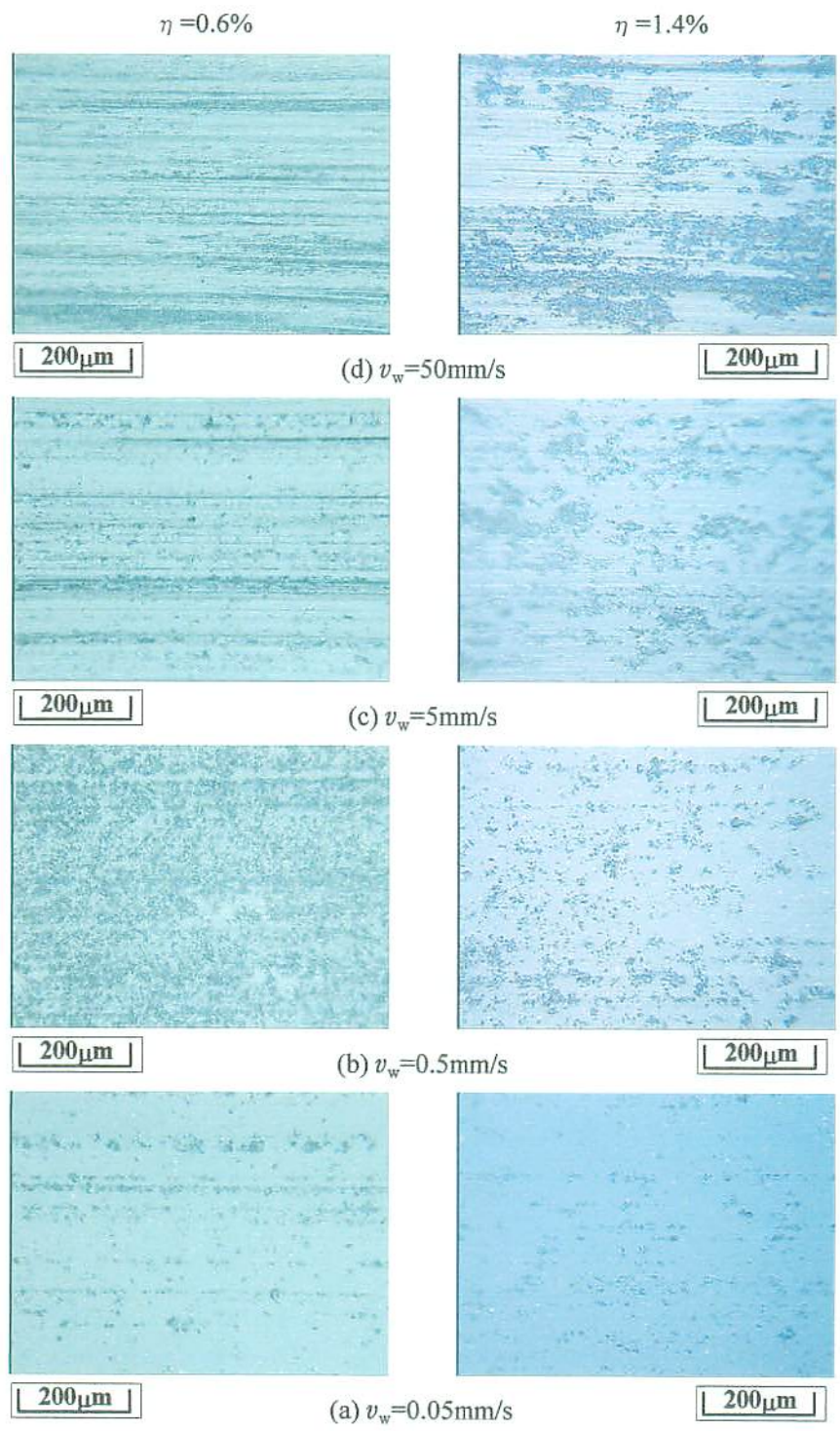


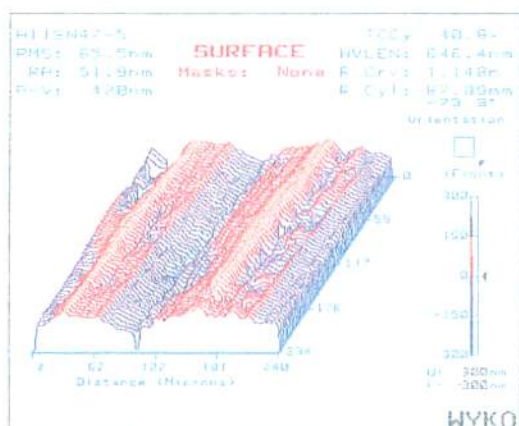
図 3.13 切れ刃面積率 η の違いによる工作物仕上面の変化 (3)
 [HIPS, SD140Q50M, $V_g=50\text{m/s}$, $v_w=0.05\text{--}50\text{mm/s}$, $t_t=5\ \mu\text{m} \times 5\text{passes}$, Soluble(1/50)]

3.5.2 工作物仕上面粗さの変化

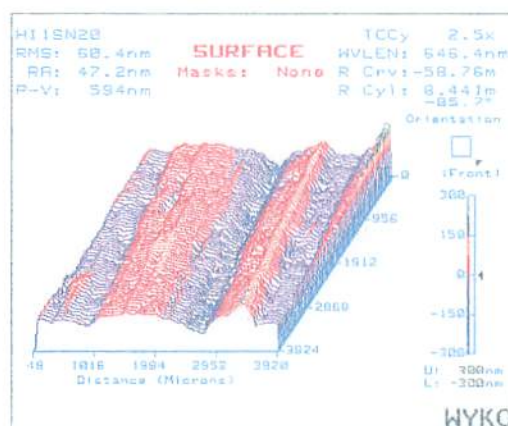
図 3.14 に、切れ刃面積率 η が 1.0%, 1.4% の 2 つの状態、テーブル送り速度を最も遅い $v_w=0.05\text{mm/s}$ にして、窒化けい素(HIPSN)を研削したときの WYKO の仕上面測定結果を示す。図(a),(b)が砥石周速度 $V_g=20\text{m/s}$ 、図(c),(d)が $V_g=50\text{m/s}$ の結果である。

砥石周速度 $V_g=20\text{m/s}$ では、 $\eta=1.4\%$ では仕上面粗さ約 60nm(RMS)、 $\eta=1.0\%$ では 65.5nm (RMS) と、 η による若干の向上が見られるが、双方ともまだ脆性破壊痕と見られる凹凸があり、HPSC ほどの完全な延性モード研削面にはなっていない。

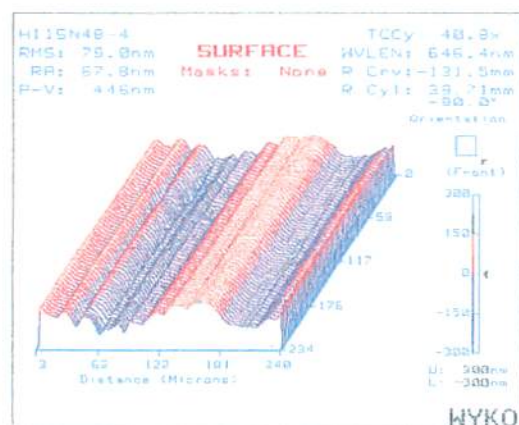
砥石周速度 V_g を 50m/s に上げると、 $\eta=1.4$ で仕上面粗さが 40nm (RMS) となり、 $V_g=20\text{m/s}$ の場合より仕上面の平滑度が上がり、大きなクラックの発等も少なく、表面状態は良好になる。このように、HIPSN の場合、HPSC と比べて延性モード研削面が得にくいのが、切れ刃面積率を上げてやることで、その可能性が上がるのがわかる。



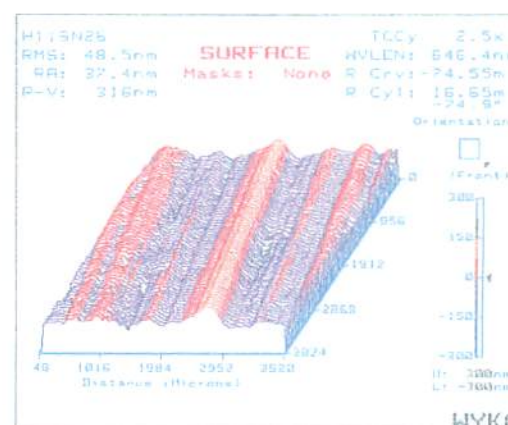
(a) $V_g=20\text{m/s}$, $v_w=0.05\text{mm/s}$, $\eta=1.0\%$



(b) $V_g=20\text{m/s}$, $v_w=0.05\text{mm/s}$, $\eta=1.4\%$



(c) $V_g=50\text{m/s}$, $v_w=0.05\text{mm/s}$, $\eta=1.0\%$



(d) $V_g=50\text{m/s}$, $v_w=0.05\text{mm/s}$, $\eta=1.4\%$

図 3.14 WYKO による研削仕上面観察

3.5.3 切れ刃面積率と仕上げ面粗さの関係（HIPSN の場合）

図 3.15 に、切れ刃面積率を $\eta=0.6\sim 1.4\%$ まで変化させ、砥石周速度 $V_g=20\text{m/s}$, $V_g=50\text{m/s}$, テーブル速度 $v_w=0.05\sim 50\text{mm/s}$ で窒化けい素(HIPSN)を湿式研削した場合のテーブル速度と仕上げ面粗さの関係を示す。 $(R_z)_n$ は研削方向と垂直方向の仕上げ面粗さをあらわし、 $(R_z)_p$ は研削方向と平行方向の仕上げ面粗さである。

$(R_z)_p$, $(R_z)_n$ のどちらにおいても、テーブル速度が小さくなるにつれて仕上げ面粗さは次第に減少していきどの切れ刃面積率においてもテーブル速度が最も遅い $v_w=0.05\text{mm/s}$ の時が最も小さくなっている。 η を増大させると $(R_z)_p$, $(R_z)_n$ は、それに伴って減少していき $\eta=1.4\%$ は最も小さくなっている。 $\eta=0.6\%$ のときが最も悪くなっているのは逃げ面の面積が小さいため切削に関し切れ刃のオーバーラップが少なくなることと、前に述べた切れ刃の脱落が原因と思われる。また $\eta=0.6\%\sim 1.0\%$ 間と比べて、 $\eta=1.0\%\sim 1.4\%$ 間にそれほど粗さの向上が見られない。 $\eta=0.6\%$, 1.0% , 1.4% のそれぞれのチップポケット平均深さ Chip.av は $44\mu\text{m}$, $34\mu\text{m}$, $30\mu\text{m}$ 前後である。この結果から考えて研削に粒度#140 の砥石の場合、最適なチップポケット平均深さは $30\sim 35\mu\text{m}$ 付近だと思われる。また、 $(R_z)_p$ は $(R_z)_n$ と比較するとかなり小さい値になる。これはプランジカット研削を行う際に研削方向に盛り上がり条痕が生ずるためである。

まとめとして、切れ刃面積率を $0.6\sim 1.4\%$ と変化させた場合、テーブル速度が微小送りの場合 $\eta=1.4\%$ のとき仕上面に生ずる脆性破壊痕は最も少なくなった。また、テーブル速度が速い条件においても、仕上げ面粗さは $\eta=1.4\%$ のとき最も良い結果が得られた。

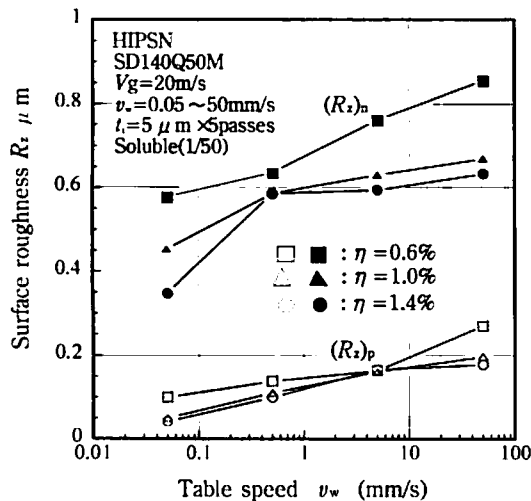


図 3.15 テーブル速度と仕上げ面粗さの関係 ($V_g=20\text{m/s}$)

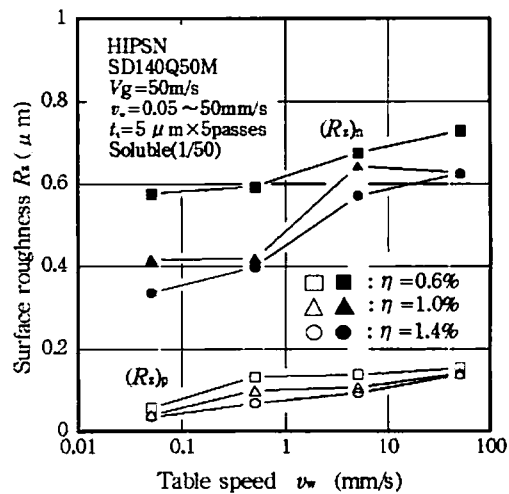


図 3.16 テーブル速度と仕上げ面粗さの関係 ($V_g=50\text{m/s}$)

3.5 結 言

本章では、砥石作業面状態と、延性モード研削（高平滑研削）における工作物仕上面状態の関係を調べる目的で、砥石先端部の切れ刃の平坦さ、そろい方を示す評価パラメータとして、切れ刃面積率に着目して検討を行った。実験では、この切れ刃面積率を形直し等によって人為的に変化させながら、延性モード研削を行う、その変化を調べた。工作物は、炭化けい素（HPSC）および窒化けい素（HIPSIN）を用い、テーブル速度を0.05mm/s程度まで低速に設定してプランジ研削を行い、延性モード研削面を得た。得られた仕上面は、光学顕微鏡やWYKOなどで測定して、切れ刃面積率との関係について、調べた。

結果として、HPSCについては、

- 1) 切れ刃面積率を $\eta=0.47\%$ から1.39%まで変化させながら、延性モード研削を実施した結果、切れ刃面積率が大きくなるにしたがって、脆性破壊痕が減少し、仕上面の表面状態、粗さの双方ともに改善が見られることがわかった。
- 2) ただ、切れ刃面積率の変化に対して、 η の大きさが1.0以上では、仕上面粗さの差は小さくなり、脆性破壊痕のない延性モード研削面の実現と仕上面の表面粗さは、必ずしも同一の対応とはならないことが認められた。

また、HIPSINについては、

- 3) 同様に切れ刃面積率を $\eta=0.6\%$ から1.4%程度まで変化させながら、延性モード研削を実施した結果、切れ刃面積率が大きくなるにしたがって、HPSCと同じく、脆性破壊痕が減少し、仕上面の表面状態、粗さが全般的に改善されていくことがわかった。
- 4) しかし、同条件の下では、HPSCのような破壊痕の全くない完全な延性モード研削面を得るには至らず、HIPSINについては、延性モード仕上面を得るための条件がさらに厳しいことが想定された。

結果として、

- 5) 延性モード研削を実現するための砥石作業面状態を評価するのに、従来のような切れ刃面積率だけのおおまかな評価では、的確な判定が難しいことがわかった。砥石の作業面状態が工作物仕上面に与える影響を正確に判定するためには、さらに精密な砥石作業面の測定と評価が必要だと考えられる。

参 考 文 献

- 1) 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ス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.
- 2) 宮下政和: 脆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, 05(1990)782.
- 3) 市田良夫, 貴志浩三, 蓮田祐一, アクバリ・ジャワド: ファインセラミックスの鏡面研削に関する研究(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, 08(1991)1406.
- 4) 超精密加工技術: 日本機学会 編(1998)
- 5) 生産加工の原理: 日本機学会 編(1998)

第4章 粗粒ダイヤモンド砥石の形直し・目直し過程における切れ刃挙動

4.1 緒言

ファインセラミックス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¹⁾。それらを実現させるために、従来は、微粒・細粒のダイヤモンド砥石の使用が検討されてきた²⁾。しかし、微粒・細粒の砥石は、研削過程において砥粒が脱落しやすく、安定した研削面を得ることが難しい。また、チップポケットが小さく目詰まりなどを生じやすいため、加工能率を大きく向上させることが難しい。

このような中、前章までに、粒度#140の粗粒砥石を用いても、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、高平滑研削が実現できることを示した³⁾。特に、その特徴的な条件として、砥粒先端の切れ刃逃げ面を大きくすることで、高平滑な延性モード研削が実現可能であることを示した⁴⁾。

このような研削法では、砥石作業面を形成する形直し・目直し作業が、よりよい仕上面を得るための手法として重要となる。しかし、砥粒切れ刃形状の形成作業である形直し・目直し過程における砥石作業面性状の変化形態等については、同じ超砥粒砥石であるCBN砥石等については、いくつかの検討があるものの^{5) 6)}、ダイヤモンド砥石については未だ明らかになっていないのが現状のようである。

ここでは、粗粒ダイヤモンド砥石の最適な砥石作業面形成法の確立を目的として、まず、多石ダイヤモンドブロックツルアを用いた粗粒ダイヤモンド砥石の形直しについて検討した結果に付いて報告する。また、形直し過程における砥石形状および砥石作業面性状の変化を調べると同時に、仕上げ面粗さに及ぼす影響についても検討した。さらに、形直し後のダイヤモンド砥石を、WAスティックを用いて目直し作業を行った際の砥石作業面の変化についても報告する。

4.2 形直し過程における切れ刃挙動の追跡

4.2.1 実験方法および条件

本実験は、精密平面研削盤（(株)岡本工作機械 PSG-52DX）を用いて行った。図 4.1 に実験装置の外観写真を示す。また、表 4.1、表 4.2 に、形直し条件および研削条件を示す。砥石は、粒度 #140 の、粗粒で集中度も 50 と砥粒密度の低い、メタルボン ドダイヤモンド砥石を使用した。形直し作業は、多石ダイヤモンドブロックツルア（S D 1 0 0 P）を用い、図 4.2 (a) に示す方法で予備的に形直しを行い、実験では図 4.2 (b) の方法を用いた。

表 4.1 形直し条件

研削盤	岡本工作製 PSG-52DX
砥石	S D 140 Q 50 M
ブロックツルア	S D 100 P □30×30mm
砥石周速度	V_t : 20 m/s
テーブル送り速度	v_{tc} : 100 μ m/rev
設定ツルア切込み	t_{st} : 5 μ m/pass
研削液	Soluble 1/50

表 4.2 研削条件

工作物	HPSC (Hot Pressed SiC)
砥石周速度	V_g : 20 m/s
テーブル速度	v_w : 0.15 mm/s
砥石切込み	t_t : 5 μ m × 5 passes
研削液	Soluble 1/50

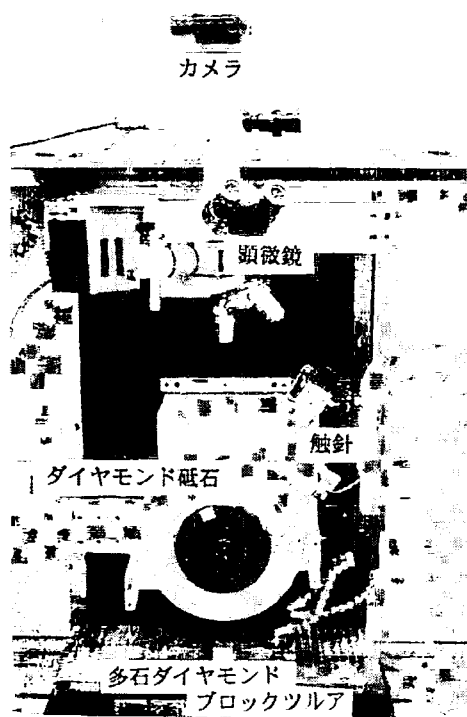


図 4.1 実験装置の外観

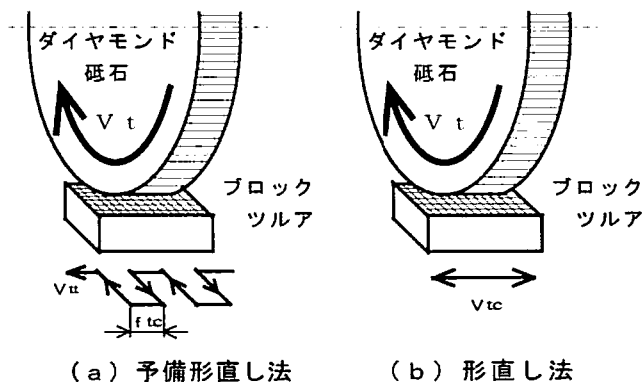


図 4.2 実験で用いた形直し方法

形直し条件は、砥石周速度は研削実験条件と同じ $V_t=20\text{m/s}$ で、テーブル速度は縦送りのみで $V_{tc}=100\mu\text{m/rev}$ 、設定切り込み量は $t_{st}=5\mu\text{m/pass}$ 、研削液はソリュブルタイプの希釈液(1/50)を用いた。なお、形直し実験前のチップポケット平均深さ⁷⁾は、WAスティック(WA120H7V)法により、予め $25\mu\text{m}$ 程度に形成している。研削実験では、工作物としてホットプレス法で製造された炭化けい素(HPSC)を用いた。

砥石作業面性状の観察・測定は砥石軸ヘッド部に取り付けた顕微鏡で行い、断面プロフィールは粗さ計の触針を用いて測定した⁷⁾。なお、本実験過程において多数の同一砥粒の変化形態を追跡し観察・測定する必要があるため、図4.3に示すような精密砥粒追跡システムを、回転形およびリニア形のエンコーダを用いて製作した。

このシステムの砥石最外周面における追跡精度は、砥石軸方向 $1\mu\text{m}$ 、回転方向は $360^\circ/4096$ の精度で、予め砥粒の位置を認識しておけば砥石最外周面の任意の砥粒でも短時間でかつ容易に追跡することができる。研削後の工作物の仕上げ面粗さの測定・観察は、小坂式接触式表面粗さ計(触針先端径 $5\mu\text{m}$)、光干渉式高精度微小表面粗さ計測器(WYKO TOPO-3D:測定法は $1\mu\text{m}$ ごとの平面位置での表面凹凸のデジタル測定)および微分干渉顕微鏡で行った。なお、接触式表面粗さ計での測定は、研削方向と平行方向およびそれと直角な砥石軸方向について行った。

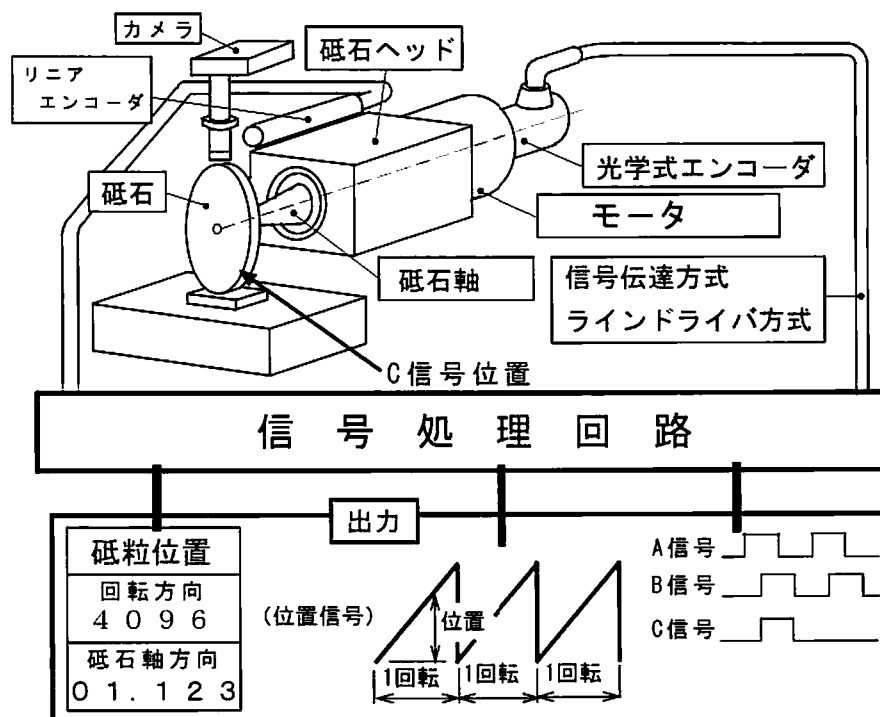


図 4.3 砥粒位置精密追跡システム

図 4.4 に実形直し量の測定法を示す⁵⁾。実形直し量は、形直し過程で変化しない断面プロフィールのデータ部分（チップポケット底部）を基準にして、そこから最外周面までの距離を測定し、その変化量をその過程における実形直し量とした。なお、測定は全周 50 カ所で行い、その平均値を実形直し量としている。砥石形状の表示は、砥石を 72 等分し、その等分された部分において最も外周にあるデータを最外周面として、それらを結ぶことにより砥石形状とし表示した。

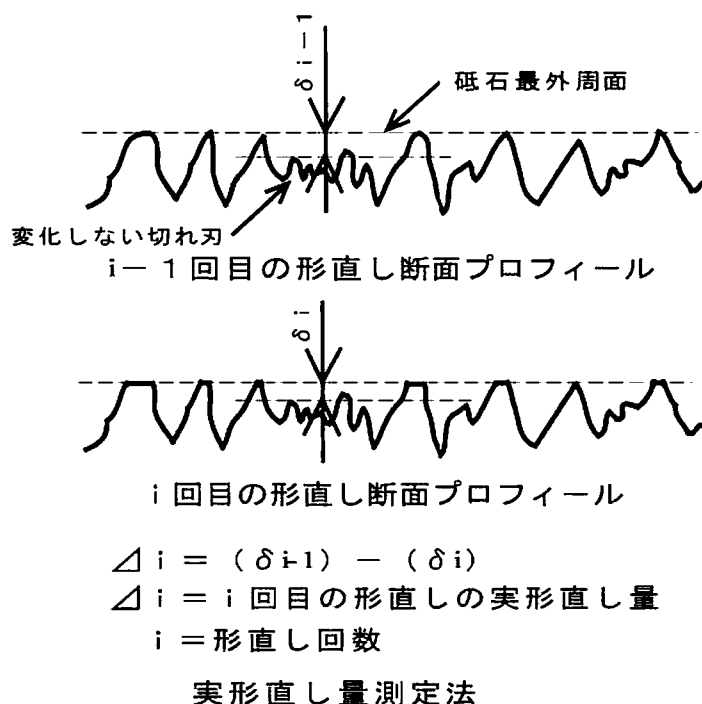


図 4.4 実形直し量の測定方法

4.2.2 形直し過程における砥石作業面性状の変化

図 4.5 に総設定形直し量 T_{st} と総実形直し量 T_{at} の関係を示す。なお、図中には別報⁶⁾で報告した結合材が同じメタルボンドを用いた CBN 砥石の場合も示す。図のように、 T_{st} が $90 \mu\text{m}$ ($5 \mu\text{m} \times 18$ 回：以後、総形直し量で記す) までは T_{at} は $5 \mu\text{m}$ 程度で、 T_{st} に対して T_{at} は 5% 程度である。しかし、 T_{st} が $90 \mu\text{m}$ を越え $120 \mu\text{m}$ までの間では、 T_{at} の変化量が約 $7 \mu\text{m}$ とその変化形態に大きな変化があることがわかる。これに対して、CBN 砥石の場合、 T_{st} に対して T_{at} が 80% 程度になっている。これからも、ダイヤモンド砥石の場合は、 T_{st} に対して T_{at} が僅かで、形直し作業が困難であることがわかる。

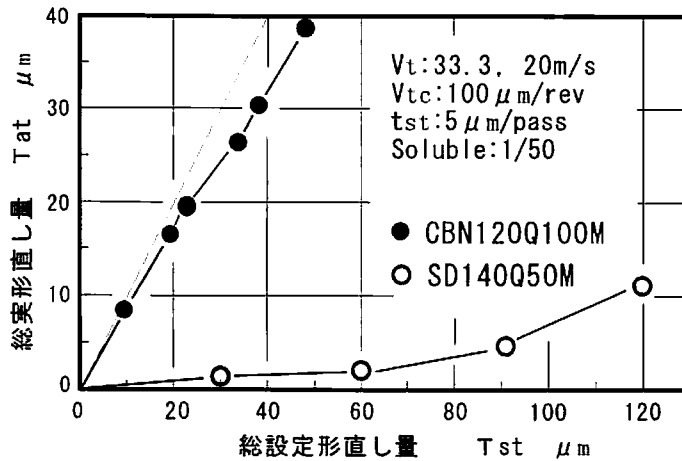


図 4.5 総実形直し量 T_{at} と総設定形直し量 T_{st} の関係

図 4.6 に形直し過程前後における多石ダイヤモンドブロックツルアの断面プロフィールの変化形態を示す。図のように、総設定形直し量 T_{st} が $120\mu\text{m}$ まで進むと、ツルア先端表面から約 $100\mu\text{m}$ 程度摩耗していることがわかる。このように、 T_{st} に対して T_{at} が小さくなる主な理由は、砥石側の砥粒の摩耗・破壊以外に砥石の弾性変形とダイヤモンドブロックツルア側の摩耗が考えられる。

図 4.7 に、砥石最外周面に予備形直しの状態で逃げ面形状が比較的平坦な砥粒を形直し過程において追跡した結果を示す。これは、図 4.5 と同時に行ったものである。図よりわかるように、形直しを進めていくと、総設定形直し量 T_{st} が $90\mu\text{m}$ 付近までは、初期の形直し過程で($T_{st}=30\mu\text{m}$ まで)逃げ面の端面部分(砥粒の上左部)などの脆弱な部分に小さな破壊が起こるが、総体的には単に逃げ面が増加している。

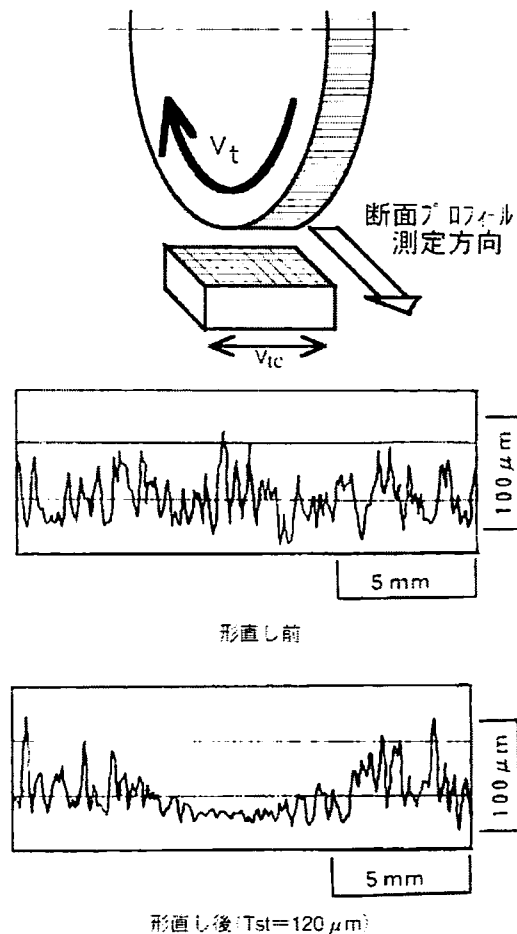


図 4.6 形直し過程前後における多石ダイヤモンドブロックツルアの変化

これに対して、 T_{st} が $120\ \mu\text{m}$ になると逃げ面に大きな破壊が起こっていることがわかる。このような破壊は、追跡した約 50 個の砥粒において約 80% 程度の割合で T_{st} が $90\ \mu\text{m}$ を越えるころからみられた。これは、図 4.5 における実形直し量の変化形態に変化がみられる付近とほぼ一致する。この破壊がみられるのは、 T_{at} としては約 $5\ \mu\text{m}$ の段階である。

この理由を概括的に検討するために、切れ刃の周辺を含めて再検討したところ、その破壊は、ほとんどの場合、砥粒のなかでもボンドテール側で起こっている場合が多かった。このことから、砥粒の破壊には、砥粒逃げ面での発生熱の増加に加えて、発生熱のすくい面側とボンドテール側への伝熱速度の違いが影響するのではないかと推測している。

以上のことから、形直し過程における砥粒の挙動は、図 4.8 の模式図に示すように、単に逃げ面が摩耗し増加する形態を示す段階とボンドテール側の逃げ面に大きな破壊が起こる破壊形態の 2 つの段階に分けることができる。

なお、本実験過程において、約 50 個の砥粒を追跡したところ、砥粒の脱落は全くみられなかった。これは、脱落を起こすような、比較的少ない結合材でしか支えられていなかった砥粒は、形直し作業以前の目直し段階で、早期に脱落してしまっているためだと考えられる。言い換えれば、本実験で用いた形直し方法では、通常の状態では、砥粒の脱落など大きな欠損は、ほとんど生じないことが考えられる。

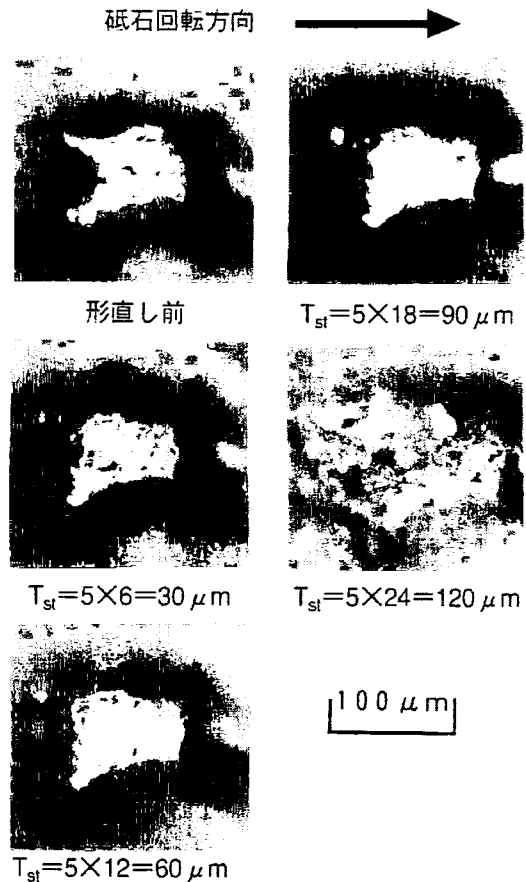


図 4.7 形直し過程における砥粒の変化

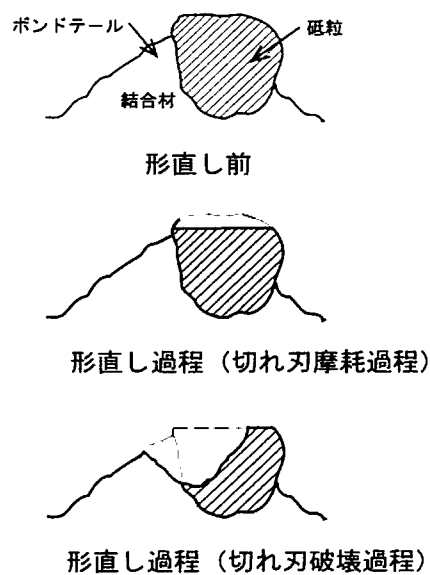


図 4.8 形直し過程における砥粒の変化 (模式図)

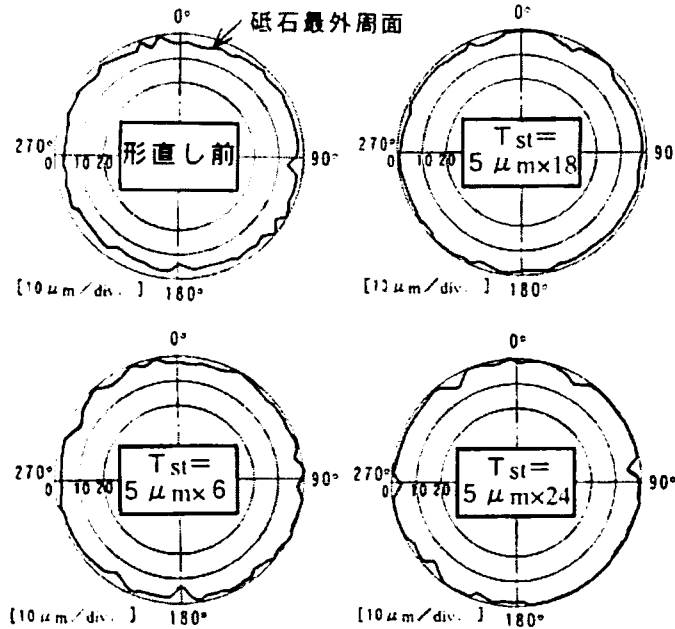


図 4.9 形直し過程における砥石形状の変化

図 4.9 に形直し過程における砥石形状の変化形態を示す。図のように、総設定形直し量 $T_{st}=90 \mu\text{m}$ までは砥粒逃げ面が摩耗しながら最外周面に新出するために砥石形状が真円に近づいていることがわかる。しかし、 T_{st} が $90 \mu\text{m}$ を越えると砥粒逃げ面に破壊が起こるので、最外周面の切れ刃形状は変化し、砥粒の一部は最外周面から後退するので、形直しを進めても、砥粒が揃えられ完全な真円にするのは困難であることがわかる。

したがって、前述した 2 段階の前段階では、砥粒逃げ面が摩耗して増加し、切れ刃が最外周面に揃ってくる。後の段階では、砥粒逃げ面に大きな破壊が起こるので、砥石最外周面に砥粒切れ刃を揃えたり、砥石形状を真円にするのは困難になる。

4.2.3 研削特性に及ぼす形直しの影響

図 4.10 に形直し過程における研削仕上げ面粗さの変化を示す。なお、図中で、 $(Rz)_p$ は研削方向と平行な仕上げ面粗さで、 $(Rz)_n$ はそれと直角な研削軸方向の粗さである。粗さは、10ヶ所の測定値の平均である。また、測定長は、研削条痕を考慮して $(Rz)_p$ は 2.5mm 、 $(Rz)_n$ は 0.8mm である³⁾。図より、総設定形直し量 $T_{st}=90 \mu\text{m}$ までは仕上げ面粗さが向上するが、逃げ面に大きな破壊がみられる $T_{st}=90 \mu\text{m}$ 以上になると仕上げ面粗さは向上しなくなる。

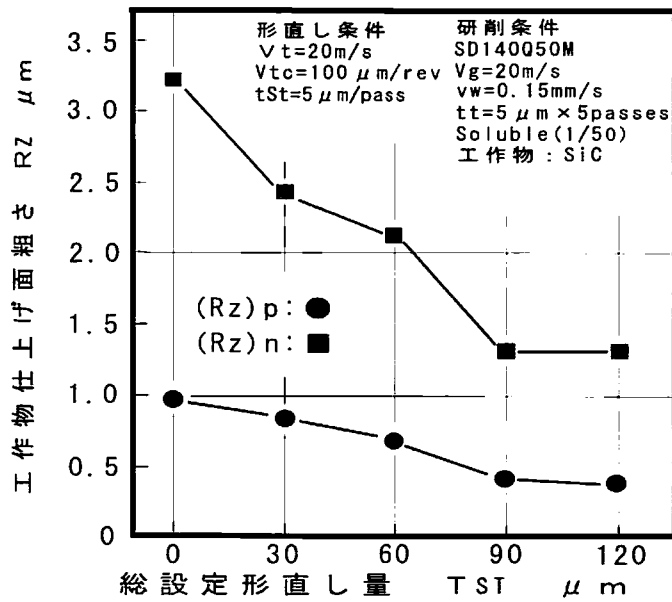


図 4.10 工作物仕上げ面粗さに及ぼす形直し量の影響

図 4.11 に工作物仕上げ面を、微分干渉顕微鏡で観察した結果を示す。図のように延性モードの研削形態を示す割合は、仕上げ面粗さの向上と同様に $T_{st}=90 \mu m$ まで増加していることがわかる。 $T_{st}=120 \mu m$ では、図には示していないが $T_{st}=90 \mu m$ の割合と、ほとんど変わらなかった。

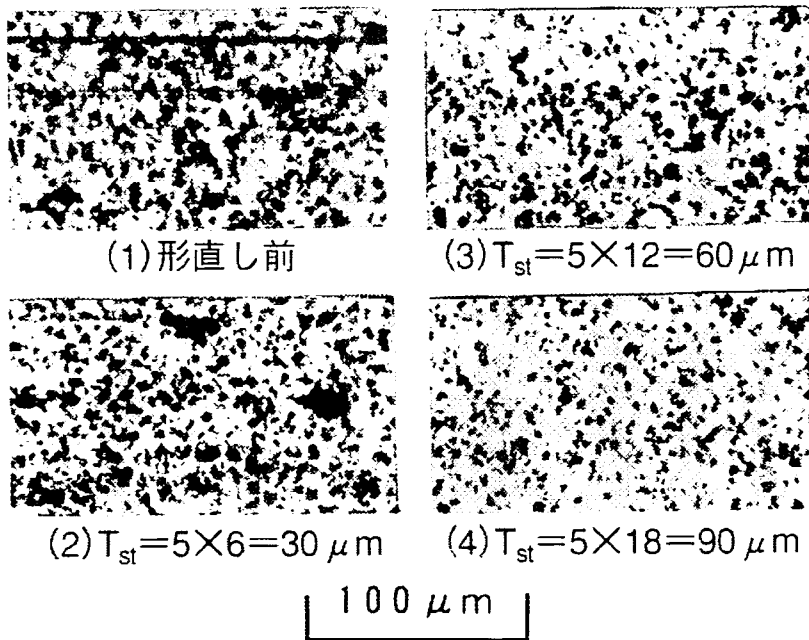


図 4.11 工作物仕上げ面に及ぼす形直し量の影響(微分干渉顕微鏡)

図 4.12 は各形直し過程における工作物仕上げ面で延性モード研削形態になっている部分をWYKOで測定した結果を示す。図より、仕上げ面粗さは、図 4.10 で示した脆性破壊部を含む仕上げ面粗さよりも格段によいのがわかる。また、 $T_{st}=30\mu\text{m}$ で、約 460nm (P-V)であったものが、 $T_{st}=90\mu\text{m}$ まで形直しを進めると約 260nm に向上するのがわかる。しかし、さらに形直しを進めて $T_{st}=120\mu\text{m}$ になると仕上げ面粗さは、約 400nm (P-V)と逆に悪化する。これには、前述した、砥粒の破壊による切れ刃逃げ面の減少と切れ刃の粗分布化によって生じる深い研削条痕が関係していることが考えられる。したがって、別報³⁾で報告しているような工作物全面の延性モード高平滑研削を行なおうとする場合には、砥粒の破壊が生じないように形直しを行う必要がある。

このようなことから、前段階である、砥粒逃げ面が増加し最外周面に切れ刃が揃うようになる過程では、仕上げ面粗さに良い影響をおよぼす。しかし、砥粒に大きな破壊が生じる後段階では、仕上げ面粗さが向上しなくなる。このことから、砥石最外周面に逃げ面の大きな砥粒を揃え切れ刃を密にすることが、良好な仕上げ面粗さを確保するためには肝要であると考えられる。したがって、本形直し法の場合、砥粒の破壊が起こる前段階で形直しを終了させることが肝要と言える。しかし、その段階は、総実形直し量 T_{at} では $5\mu\text{m}$ と僅かであることから、本形直し法以外の方策も検討する必要があると考えている。

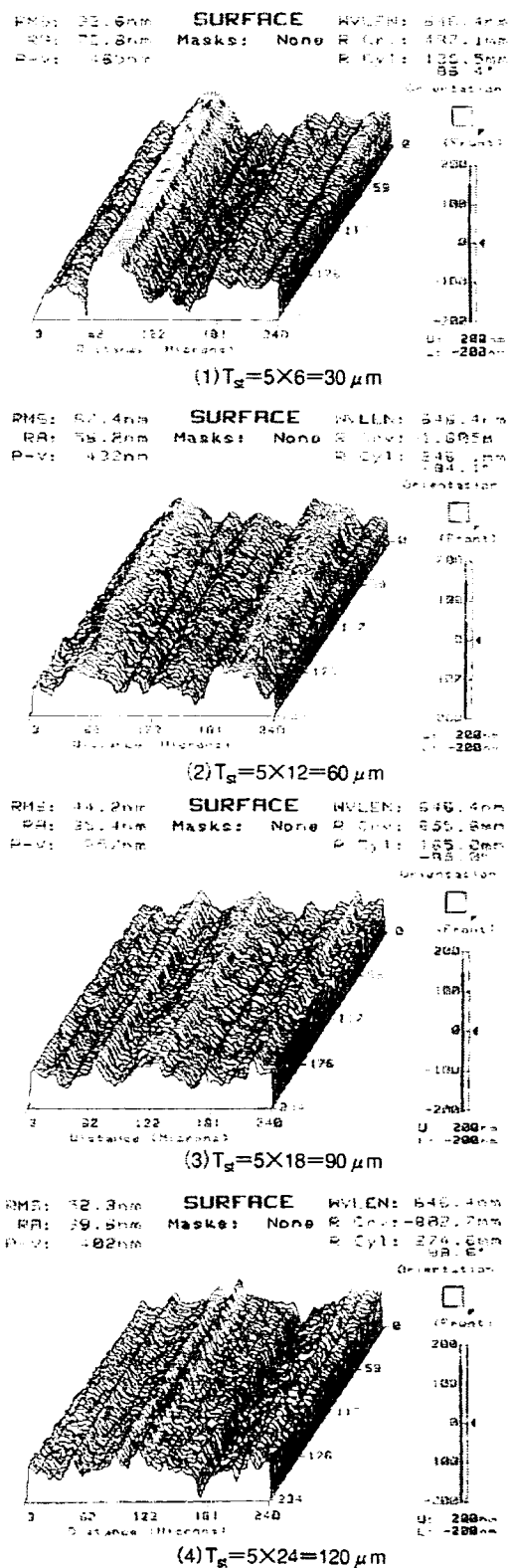


図 4.12 形直し過程における工作物仕上げ面粗さの変化

4.3 目直し過程における切れ刃挙動の追跡

4.3.1 実験方法および条件

図 4.13, 4.14 に実験で用いた自動目直しシステムの外観およびその基本構成を示す。本システムでは、パーソナルコンピュータからサーボコントローラへ指令を送り、サーボモータによってボールネジを回転させることによって、スティック状のドレッサを連続送りして、砥石作業面の目直しを行う。サーボモータは、安川電機(株)製の 30W、定格回転数 3000rpm で、10 ビットのエンコーダを備えており、任意の位置および速度制御が可能である。

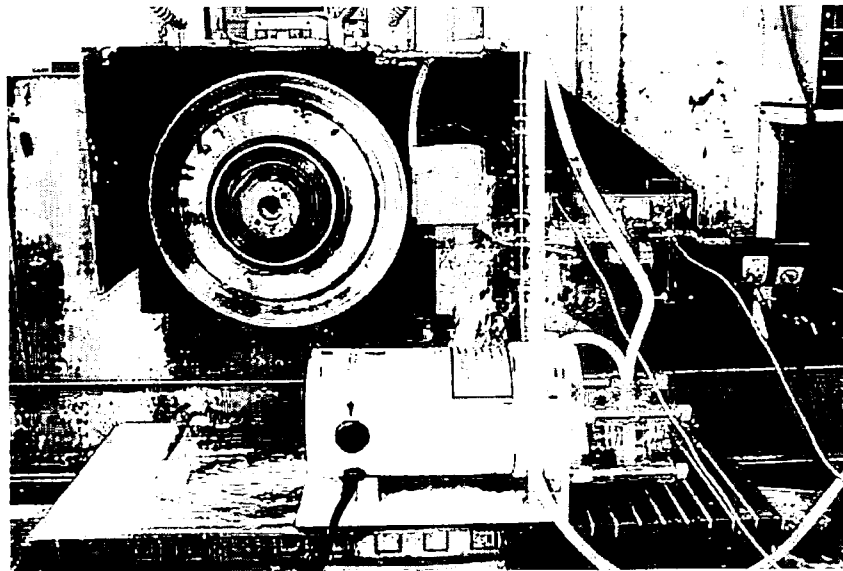


図 4.13 自動目直し装置の外観

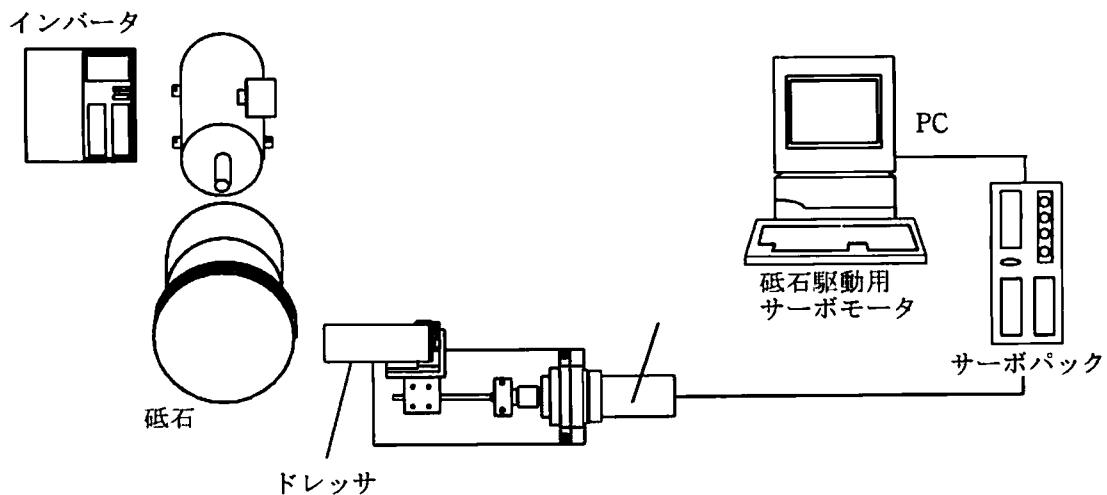


図 4.14 自動目直しシステムの構成

目直しは、WA スティックを利用した目直し法 (White Alandum Stick Dressing) WASD 法で行った。WASD 法では、目直しの際に WA スティックから破壊・脱落した WA 砥粒が、WA スティックと超砥粒砥石との間の接触領域内で滑り、または転動することによって結合材が除去される。除去される量は転動長さ、つまり砥石とスティックの接触長さが長くなると多くなる。特に WA スティックでは気孔部で脱落砥粒が一時保持されるため、接触弧の長さが結合材の除去効果に影響するものと考えられる。したがって、スティックの送り速度や砥石の回転速度によって、目直し状態はかなり大きく変化すると考えられる。表 4.3 に目直し条件を示す。

表 4.3 目直し条件

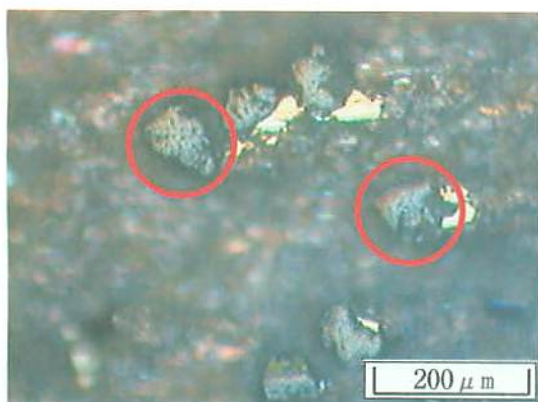
研削盤	PSG-52BN (岡本工作機械(株))
砥石	SD140N50M6-3
砥石周速度	$V_g=20\text{m/s}$
ドレッサ送り速度	1.5mm/min~3.0mm/min
ドレッサ	WA180G
研削液	Soluble S47(1/5)

4.3.2 目直し過程における砥石作業面性状の変化

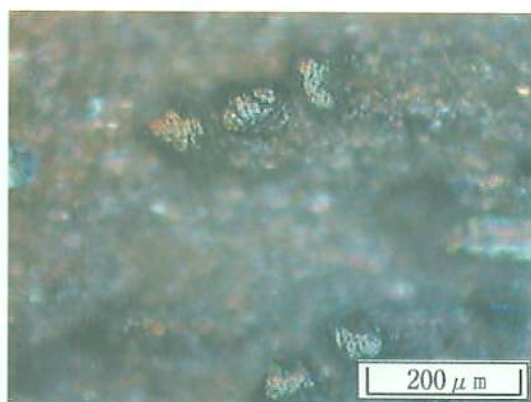
実験では WA スティックを全体で 20mm 送り、砥石作業面の観察を、スティックの送り量 5mm ごとに行った。図 4.15、図 4.16 に、こうして測定した目直し時における砥石作業面の変化の例である。丸で囲んで示したところが、切れ刃が脱落したと思われるところであり、形直しと比べて、目直し作業では、数多くの砥粒の脱落が見られることがわかった。

今回の実験では、目直しを行う前の砥石作業面のチップポケット深さが $23\mu\text{m}$ 前後と比較的浅く、図でわかるように、切れ刃の後方部には結合剤が接触した部分(ボンドテール)が数多くみられる。これを目直しすると、スティックを 5mm 送った段階で、すでにこれらのボンドテールはほとんど目立たなくなった。さらにドレッサを 10mm 送ると丸で囲んで示しているように、切れ刃の脱落が始まった。その後も、目直し作業の進行にそって砥粒の脱落は増加し、個々の切れ刃も小さくなった。

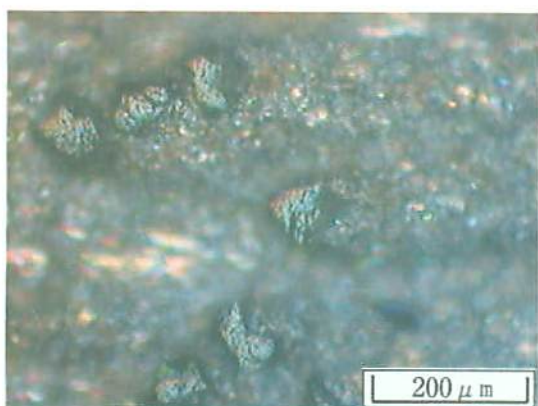
このように、目直しでは、形直し実験と比較して、砥粒の脱落が多く見られ、砥石作業面状態が大きく変化することがわかった。また個々の砥粒切れ刃においても、切れ刃逃げ面が減少するなど、細かな変化がおきていることもわかった。



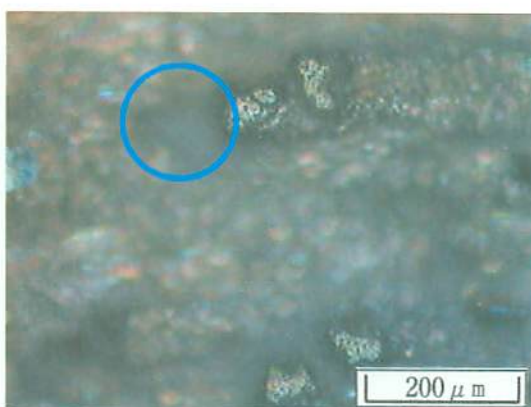
目直し前



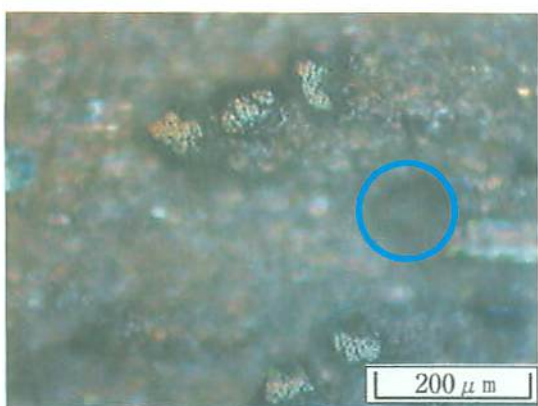
目直し3回目(ドレッサ送り量 15mm)



目直し1回目(ドレッサ送り量 5mm)

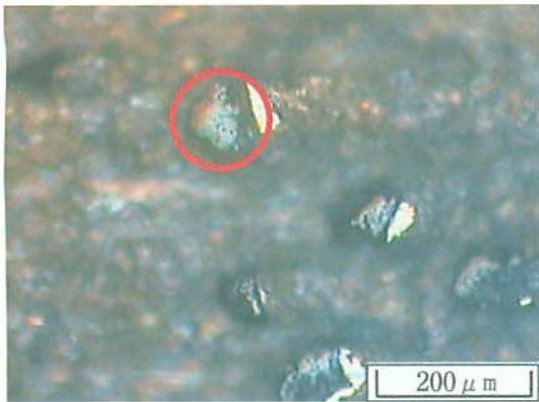


目直し4回目(ドレッサ送り量 20mm)

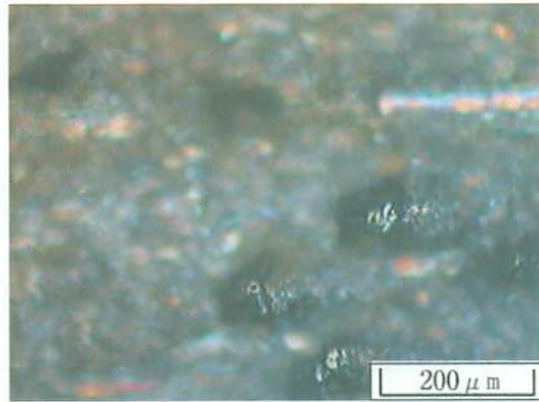


目直し2回目(ドレッサ送り量 10mm)

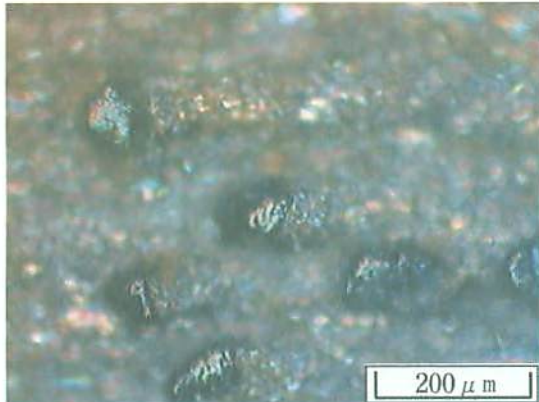
図 4.16 目直し過程における砥石作業面の変化例(1)



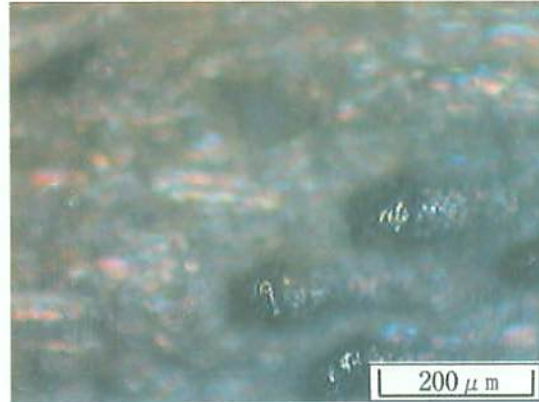
目直し前



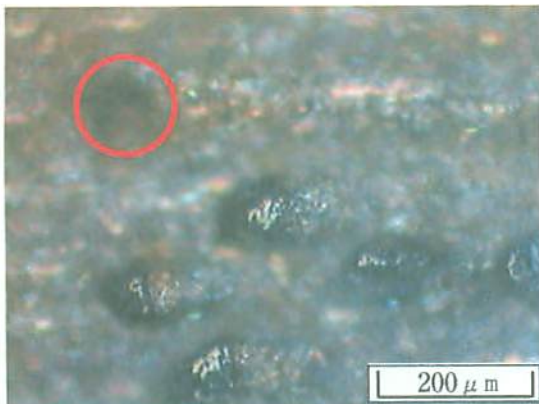
目直し3回目(ドレッサ送り量 15mm)



目直し1回目(ドレッサ送り量 5mm)



目直し4回目(ドレッサ送り量 20mm)



目直し2回目(ドレッサ送り量 10mm)

図 4.17 目直し過程における砥石作業面の変化例(2)

目直し過程において変化する砥石作業面状態を評価パラメータを用いて検討した。求めたパラメータは、切れ刃密度 n_p (個/mm²)、切れ刃面積率 η (%)、連続切れ刃間隔 a (mm)である。

図 4.18 には、今回の目直し実験におけるドレッサ送り量と各評価パラメータとの関係を示す。目直し前の η の平均値は 0.53% で、ドレッサを 5mm 送った時の η の平均値は 0.51% であった。この段階で η があまり変化していないのは、ボンドテールが砥粒を囲むように保持していて、まだ砥粒の脱落が生じていないためと考えられる。しかし、ドレッサの送り量を 10mm まで進めると、 η 、 n_p ともに大きく減少し、逆に連続切れ刃間隔 a は大きくなる。この結果は、この過程で切れ刃が多く脱落していることを示すと考えられる。しかし、ドレッサ送りを 15mm まで進めると、各評価パラメータの変化は小さくなり、切れ刃の脱落等の変化が少なくなっていると考えられる。

この時の深さ方向の砥石形状を知るために、触針を使ってチップポケット深さ等を測定した。図 4.19 にドレッサ送り量とチップポケット深さの関係を示す。チップポケット深さは、32 μ m までは切込み量に比例して増加が見られるが、それ以上は目直しを行っても変化していない。これは最外周の切れ刃からボンド部までの深さが、一定の値を保つことを示している。つまり、再外周の脱落する砥粒と、新しくボンド中から現れる砥粒の数量がある程度つりあい、一定のチップポケット深さを維持すると考えられる。この状態では、各評価パラメータのそれぞれの数値も、変化が小さくなる傾向が見える。

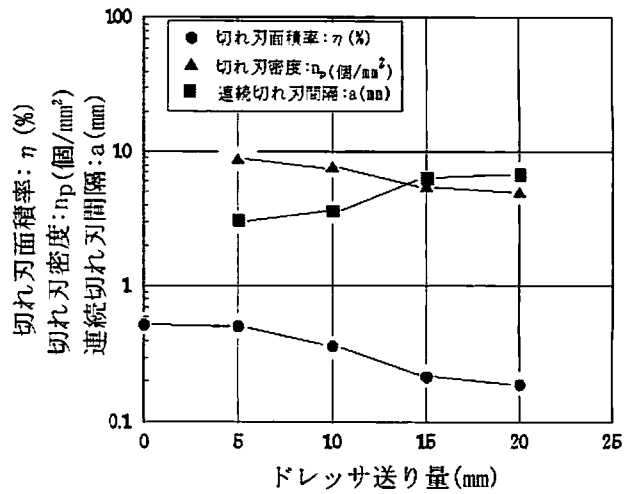


図 4.18 ドレッサ送り量と評価パラメータの関係

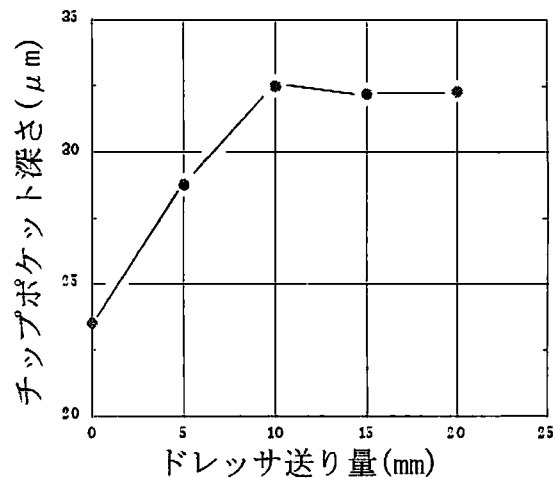


図 4.19 レッサ送り量とチップポケット深さの関係

4.4 結 言

粗粒ダイヤモンド砥石の最適形直し方法の確立を目的として、多石ダイヤモンドブロックツルアを用いて、形直し過程における砥粒の挙動を調べるとともに、その仕上げ面粗さへの影響を検討したところ、以下のような結果を得た。

- 1) ブロックツルアによる粗粒ダイヤモンド砥石の形直し過程における切れ刃の挙動は、ある形直し量で変化し、2段階に分類される。
- 2) 前段階では、形直しにより砥粒逃げ面が摩耗し増大する。そして、砥石最外周面砥粒切れ刃密度は密になる。このため、研削実験においてもこの段階では、形直しにより仕上げ面粗さが向上する。
- 3) 後の段階では、砥粒の破壊が生じ、結果的に、前段階まで増加した砥粒逃げ面が減少する。このため研削実験においても、仕上げ面粗さが向上しなくなる。
- 4) 前段階での設定形直し量に対して、実際の砥石作業面上の砥粒表面の変化は小さく、実形直し量は5%程度であった。また、後段階では、その割合が前段階よりやや増加する。
- 5) 本実験のような1パス当り1 μ m程度の小さな切込みによる形直し作業においては、砥粒の脱落はほとんど観察されず、その変化は小さい。

また、同様な粗粒ダイヤモンド砥石を用いて、WA スティックを用いた目直し実験を行い、同様に砥石作業面の変化を追跡した。そして以下のような結果を得た。

- 6) WA スティックによる目直しでは、形直し過程にくらべて、多数の砥粒の脱落が見られた。
- 7) 目直し過程において、スティックの送り量がある程度増えると、砥粒の脱落が起ころいはじめ、一定量をすぎるとやや落ち着く現象が見られた。
- 8) 形直しにくらべ、目直しでは、砥石作業面状態を大きく変化させる可能性があり、研削加工においては、より慎重な作業が必要となると考えられる。

参 考 文 献

- 1) 宮下政和：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.
- 2) 例えば，市田良夫，貴志浩三，蓮田裕一，アハハリ・ジャウト：ファインセラミックスの鏡面研削に関する研究（第1報），精密工学会誌，57, 8（1991）1406.
- 3) 安井平司，有野芳弘，松永邦夫：粗粒ダイヤモンド砥粒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）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，坂田正登，開 豊，坂本重彦，川下智幸：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研削ー砥粒粒度の影響ー,1999年度精密工学会沖縄地方講演会,63.
- 5) 安井平司，川下智幸，大崎真壽：レジンボンドCBN砥石の形直し特性の一検討，精密工学会誌，58,8(1992)1351.
- 6) 安井平司，川下智幸，中園 汎：メタルボンドCBN砥石の性能に及ぼす形直しの影響，精密工学会誌，59,9(1993) 1495.
- 7) 中園 汎，安井平司，久留須誠，細川晃：レジンボンドCBN砥石の目直しに関する研究

第5章 自動砥石作業面画像処理システムの開発

5.1 結 言

前章までに示してきたように、砥石作業面上の砥粒切れ刃の形状や分布(以下、砥石作業面性状)は、工作物仕上面粗さや精度および研削焼けの発生など、研削現象に大きな影響を与える¹⁾。このことは、これらの研削現象を解明するためには、砥石作業面性状を容易に把握する手法の確立が、極めて重要となることを意味する。これまでも多くの研究者によって数多くの測定法が提案されている²⁾が、装置が複雑となったり、測定に時間がかかるなど、実際の研削現象研究に適用するには不十分で、研削現象等の解明に十分な実用的手法が確立されていないのが現状である。

こうした背景の下、安井らは、研削盤の砥石上方に光学顕微鏡と CCD カメラを設置して砥石作業面画像を撮影し、これをパーソナルコンピュータで画像処理して砥石作業面性状を評価する方法を提案している²⁾³⁾。それらでは、主としてレジンボンド系砥石を対象にポストプロセスで砥石作業面評価を行っているが、補助光源を必要とする砥石作業面の撮影法や、ビデオ入力を前提としたノイズ除去処理、あるいは色相を使った切れ刃認識ソフトウェアなど、DOS 搭載コンピュータの処理能力の問題もあって、測定や処理に時間がかかり、実際の研削実験への適用に関しては、やはり課題を残すものであった。

そこで、本研究では、上記の光学顕微鏡と CCD カメラ等を利用した砥石作業面のデジタル画像計測の簡便性を引き継ぎながら、システムをマルチタスク対応の Windows-OS 搭載コンピュータを中心に、より連携的で統合的なかたちに改めることとした。また、砥石回転部の制御プログラムや切れ刃認識ソフトウェア等の全面改良を行い、上記システムに比べて大幅な処理時間の短縮を実現し、大量画像による高精度な砥石作業面評価システムを構築した。ここでは、粗粒メタルボンド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研削への適用を一例として、システムの切れ刃抽出法や評価係数算出等について検討した結果を述べる。

5.2 自動観察・評価システムの構築

5.2.1 砥石作業面評価およびその測定法

研削性能を左右する砥石作業面性状すなわち砥粒切れ刃の形状や分布状態で定まる微細な幾何学的形状 (Microgeometry) を一般に砥石作業面 (表面) トポグラフィと言う。形直しや目直し作業は、この砥石作業面トポグラフィを最適な状態に調整する作業であり、これらの作業の良否により、砥石の性能すなわち研削特性が大きく変化する。また、研削時の砥粒切れ刃と工作物の干渉状態 (Grinding geometry and kinematics) は、この砥石作業面トポグラフィによって変化するため、その測定と定量化は形直し・目直し過程や研削機構の解明のために必要不可欠なものとなる。

前章でも述べたように、これらの砥石作業面トポグラフィを表す評価パラメータには以下のようなものがある。

- ① 切れ刃(逃げ面)摩耗面積 (Wear-flat area): $S \mu\text{m}^2$
- ② 切れ刃面積率 (Cutting-edge ratio): $\eta \%$
- ③ 切れ刃間隔 (Cutting-edge spacing): w, mm
- ④ 切れ刃密度 (Number of cutting points per unit area): C, mm^{-2}
- ⑤ 砥粒密度 (Number of grains per unit area): G, mm^{-2}
- ⑥ 連続切れ刃間隔 (Successive cutting-edge spacing): a, mm
- ⑦ 累積切れ刃個数 (Cumulative number of cutting points): nz, mm^{-1}
- ⑧ 砥粒突出し量 (Protrusion height of abrasive grain): $hf, \mu\text{m}$
- ⑨ チップポケット平均深さ (Average depth of chip pocket): $hp, \mu\text{m}$

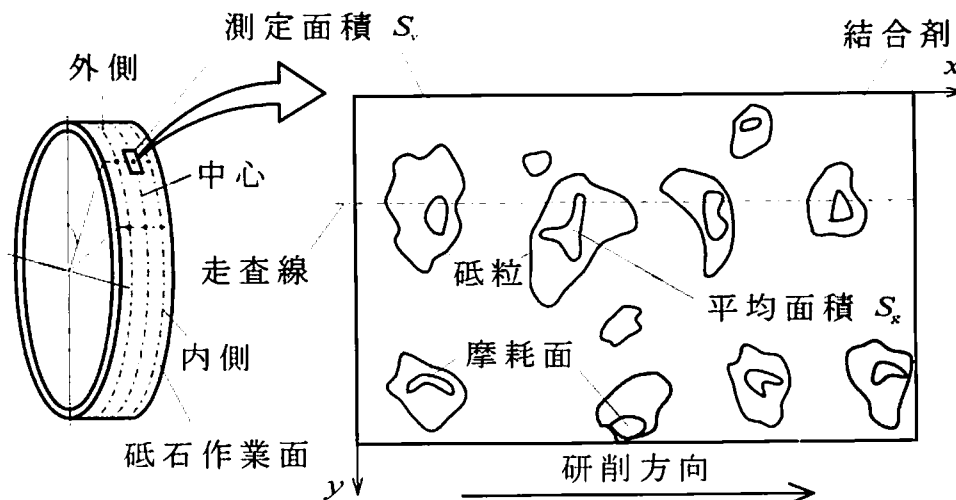


図 5.1 砥石作業面と評価パラメータ

これらの評価パラメータを算出するための測定法として、従来から以下のようなものが提案されており、それぞれの手法の利点と欠点をまとめると次のようになる。

【直接法】

直接的に砥石作業面を測定・観察する方法で、最も単純正確である。ただし、静的な測定であるため、切削に関与しない切れ刃（無効切れ刃）も含んだ砥粒切れ刃全体が測定対象となる。

(1) 顕微鏡観察法 (Microscopy)

金属顕微鏡、工具顕微鏡あるいは走査型電子顕微鏡(SEM)で砥石作業面を直接観察する方法で、透過形位相差顕微鏡や SEM で観測する場合は砥石作業面のレプリカや2段レプリカを用いる手法が用いられる。これらの方法では、従来、評価パラメータを求めるのに、直接的な測定が行えず、間接的に求めるのが一般的であった。例えば、切れ刃逃げ面摩耗面積などの測定では、光学的な正反射法によって写真撮影を行い、現像した印画紙上の逃げ面摩耗部分を切り抜いて重量測定を行ったり、顕微鏡の接眼レンズ内に格子を切ったフィルムを入れ、格子上の切れ刃部分をカウントして切れ刃密度、連続切れ刃間隔、切れ刃面積率などを求めていた。この方法で測定できる評価パラメータは、切れ刃の微視的形狀、切れ刃摩耗面積、連続切れ刃間隔、切れ刃密度などであり、利点としては、視覚的な情報が得られ、少数であれば特定切れ刃の微視的な変化が詳細にわかることがある。しかし、欠点として、上記のような理由から、定量的な測定が難しく、測定に多大な時間と労力が必要となり、系統的な測定が困難であることが上げられる。

(2) 触針法 (Profilometry)

砥石を回転させながら、円錐あるいはナイフエッジ形の触針（検出器）で砥石作業面を走査し、2次元的な断面プロフィールを求める方法である。近年、検出器からの出力をパソコン上のA/D変換によって自動的に取込み、種々のデジタル処理が可能となり、定量的な処理も比較的容易にできるようになった。測定できる評価パラメータは、砥粒切れ刃形状、砥粒突出し量、累積切れ刃個数、連続切れ刃間隔などであり、利点として、砥石の深さ方向のプロフィールが直接測定されるため、砥石最外周から一定の範囲にある切れ刃だけを対象として、研削に関わる切れ刃数や切れ刃間隔などを比較的正確に計算できることがあげられる。また、深さ方向の切れ刃の分布なども求められる。一方、欠点として、円錐形触針が砥粒切れ刃の側面を走査する場合には補足される切れ刃の高さが実際よりも低くなるなど、触針の先端形状によって測定結果が異なる点があげられる。また、深さ情報だけでは砥粒と結合剤の正確な分離が難しい場合もあり、正確な砥粒分布などを求めることは困難である。さらに、測定に関しても、触針の走査速度をある程度以上速くすることが難しいため、一般に測定時間が長くなり、短時間で砥石全体の状態を知ることが難しい。

(3) 銅板転写法, 転写・点算法 (Imprint method, Point counting method)

銅板やすすを付けたガラス板を砥石作業面に押付けて回転させ、砥粒形状を転写したり、あるいは、カーボン紙と上質薄紙を重ねて砥石作用面に置き、丸棒でこすることによって砥石作業面のプリントを得る方法などで、評価パラメータの算出は転写像を顕微鏡などで観察して行う。透明な格子板を写真に乗せ、切れ刃痕と重なる格子の数を数えて砥粒面積比を求める点算法などが、簡便でよく利用されている。測定できる評価パラメータは、砥粒切れ刃形状、切れ刃密度、連続切れ刃間隔、切れ刃面積率などであり、利点として、実機上で手軽に行える点があげられ、比較的少数の測定ではよく用いられている。しかし、欠点として、押付け力などの転写条件によって結果が大きく異なり、個人差が大きくなる点があげられる。また、顕微鏡での観察法と同様に、評価パラメータの定量的な算出も困難であり、そのためには多大な時間と労力が必要となる。

(4) クラスタ砥石測定法 (Cluster wheel measuring method)

予めホイールから取り外し可能なクラスタ状の砥石を、検鏡片として直接測定する方法で、測定は一般の顕微鏡や SEM などで観測することが多い。また、クラスタを3次元粗さ計やステレオ写真法などを使って測定し、等高線図などの3次元情報を得ることも可能である。測定できる評価パラメータは、砥粒切れ刃形状、砥粒突出し量、深さ方向の切れ刃密度などであり、利点は、切れ刃の立体的形状が測定でき、また測定領域が深さ方法の倍率に依存せず広範囲に設定でき、定量的な測定も可能である点である。欠点は、インプロセス/ポストプロセスに関わらず、実機上での測定は不可能であり、実験的な用途に限られることである。また、触針式粗さ計などで測定する場合には、結局、測定面全体を走査する必要があり、やはり多大の時間を要することである。

【間接法】

測定しようとする砥石で適当な工作物を特定の研削条件で研削し、このとき得られる研削抵抗、研削温度、仕上面粗さなどを解析する方法で、実際に工作物と何らかの干渉を生じた有効切れ刃に関する測定を行うことになる。

(5) 引っかき転写法 (Scratch method)

鏡面仕上げを行った黄銅試片を一定圧(深さ)で固定した砥石表面に押し付け、試験片を横方向に移動させて引っかき痕を付け、そのプロフィールを触針式粗さ計で測定する方法である。測定できる評価パラメータは、深さ方向切れ刃分布、砥石表層の切れ刃密度などであり、利点は、実際に工作物と接触する切れ刃の形状が転写されるため、有効切れ刃が直接的に測定できる点である。一方、欠点は、押付け深さや引っかき幅によって、引っかき痕の形状が変化し、測定結果が異なってくる点である。

(6) 転削法 (Cluster grinding method)

盛り上がりの少ない被削性のよい材料（黄銅、軟鋼など）を研削したときの研削条痕プロフィールを粗さ計で測定したり、あるいは、ラップ仕上げした焼入鋼板を砥石軸に対してわずかに傾けて砥石の切込み深さが砥石軸方向に漸減して零となるような状態で1回だけ研削し、切込みが零に近いところで分離される研削条痕の数を数えて深さ方向の切れ刃密度を測定する方法がある。測定できる評価パラメータは、深さ方向の切れ刃密度であり、利点は、実際に研削した面を測定するため、有効切れ刃が測定でき、測定精度も比較的高いことである。一方、欠点は、材料の盛り上がりなど砥石作業面の工作物への転写性が測定精度に影響すること、また、転削で得られた検査面は複数の切れ刃でオーバーラップされているために、研削方向の砥石面上の関連を別途把握する必要がある点である。

(7) 光電走査法 (Photo-electric sensing method)

基本的には砥粒切れ刃の摩耗平坦部からの正反射光を利用する方法であり、用いる光源や光検出方法あるいは測定信号の処理手法によって多くの形態が提案されている。最も基本的な手法は、回転している砥石からの反射光をフォトトランジスタや光電子増倍管などの光電素子で受光し、光電パルス強度、パルス幅、パルス間隔から切れ刃摩耗面積、切れ刃摩耗幅、連続切れ刃間隔などを求める方法である。その他にも、レーザー光の微小スポットを砥石表面に投射し、任意の方向に反射する光を検出することによって砥粒面法線方向とその面積分布を求める方法や、レーザー光を回転している砥石作業面に直接照射して得られるパワースペクトルパターンから砥石全周にわたる砥粒切れ刃の平均逃げ面摩耗幅を求める方法などがある。測定できる評価パラメータは、切れ刃摩耗面積、切れ刃摩耗幅、切れ刃面積率、連続切れ刃間隔などであり、利点としては、比較的高速で回転している砥石作業面からの反射光も測定可能で、インプロセス測定の可能性があり、測定時間も短時間ですむことがあげられる。また、特定位置からの基準パルスを取込むことで測定箇所を同定できる可能性もあり、研削過程における特定の切れ刃の追跡も試みられている。また、条件によっては、湿式研削中でも測定可能であるとされている。しかし、欠点として、砥石作業面の切れ刃の平坦部が少ない状態では測定が難しいなど、測定対象の状態に左右されやすい点が指摘されており、さらに、砥粒以外の箇所からの反射光にも影響を受けることが難点のひとつである。また、一般に光路確保のための光学系を必要とするため、そのセッティングにも時間を要するとされる。

(8) レザーブレード法、圧電パルス法 (Razor blade method, Dynamometry method)

幅の非常に薄い工作物を研削し、その際に発生する個々の砥粒切れ刃の切削力パルスを高速・高感度圧電動力計で測定する方法で、実際に工作物の切削に関与する有効切れ刃を測定できる点に特徴がある。測定できる評価パラメータは、全体有効切れ刃数、

連続切れ刃間隔などであり、利点として、実際に工作物の切削に参与する動的な砥粒切れ刃を測定することが可能であり、また、研削条件によって変化する有効切れ刃数や分布が評価できる点があげられる。しかし、欠点として、固有振動数が高く、高感度の力検出器や非常に幅の薄い工作物など、特別の測定装置を用意する必要があり、実地の研削作業への適用は容易でないことがあげられる。

(9) 熱電対法、熱電インパルス法 (Thermocouple method)

工作物に電氣的に絶縁した熱電対素線（白金、コンスタタン線、クロメル線など）を埋込んで研削し、切れ刃の切削作用によって局部的に形成された熱電対高温接点からの起電力信号を測定する方法であり、この熱起電力のパルス間隔から連続切れ刃間隔などを求めることができる。また、微細導線を工作物中に一定間隔で一直線上に埋め込んだ試験片を作り、これを研削して熱電インパルスを測定し、対応するインパルス信号の有無から切れ刃先端の凹凸を解析する方法も提案されている。測定できる評価パラメータは、基準断面有効切れ刃、連続切れ刃間隔、切れ刃高さの分布などであり、利点として、圧電パルス法と同様に、実際に工作物と干渉する動的な砥粒切れ刃を測定することが可能で、研削条件によって変化する有効切れ刃数・分布が評価できる点があげられる。一方、欠点としては、雲母などの絶縁薄膜を介して微細導線を工作物に埋込むなど特別の操作が必要があり、一般の研削作業へは簡単に適用できない点があげられる。

本研究では、以上のような従来の砥石作業面の測定法を参考にしつつ、光学顕微鏡とCCDカメラを用いた新しい自動画像計測システムの開発に取り組んだ。前述のように、ここで開発したシステムの基本的な部分については、本研究に先立つ安井・細川らのものを引き継いだものとなっており、以下では、まず、その概要について説明する。

5.2.2 砥石作業面画像処理システムの再構築

図 5.2 に、安井・細川らが開発した従来の画像計測システムの構成を示す。このシステムでは、研削盤砥石ヘッドに装着した光学顕微鏡で観測した砥石作業面を CCD カメラで撮影し、カメラからのビデオ出力信号を A/D 変換ボードを介してデジタル化し、一旦、フレームメモリに取込んで、その後パーソナルコンピュータからの指令で種々の画像処理を行う。画像データは、横 640 画素、縦 400 画素、1 画素あたり R, G, B(赤, 緑, 青)それぞれ 8 ビットの階調を持つフルカラー画像を用いている。ここで、カラー画像を用いているのは、砥粒や切れ刃の逃げ面抽出のために、色情報を利用した画像処理を用いているためである。また、砥石軸には砥石駆動用モータとは別にエンコーダ内蔵型サーボモータ(分解能: 0.01°)を直結しており、コンピュータからの指令によって砥石の正確な回転速度制御と位置決め(精度: $2\mu\text{m}$)を可能にしている。これによって、研削過程における同一部分の砥石作業面の変化を調べることができた。

このシステムは、光学顕微鏡と CCD カメラおよびパーソナルコンピュータからなる比較的簡素な構成であり、顕微鏡の対物レンズの倍率を変えることによって広範囲の粒度の砥石に適用できる点など、利便性も高い。砥石カバーをすればこれらの措置を装着したまま、目直し・形直しおよび研削作業が可能であり、ポストプロセスでの処理ながら、実験を継続しながら砥石作業面を観察・評価していくことができる。

ただ、このシステムは、基本的に CCD カメラの映像信号を一旦ビデオレコーダに記録して処理する手順のため、計測と同時に画像処理を実行して、砥石作業面性状をリアルタイムで把握していくことなどは難しかった。DOS 搭載の PC も、サーボ駆動・画像取込み・解析処理などを個別に処理するもので、1 台で全体を統括することができず、このため、画像撮影と位置制御が完全に連動させることが難しく、一連の作業には人間の補助が必要であった。また、強い光を当てて切れ刃の抽出処理を行うため、可動アーム付きの補助光源等も利用しており撮影条件等の制約もあった。

図 5.3 は、今回のシステムの再構築を模式的に示したものである。再構成した本システムでは、マルチタスク処理が可能な Windows-OS 搭載の PC を導入して、a) 砥石の正確な位置決めを行うサーボ駆

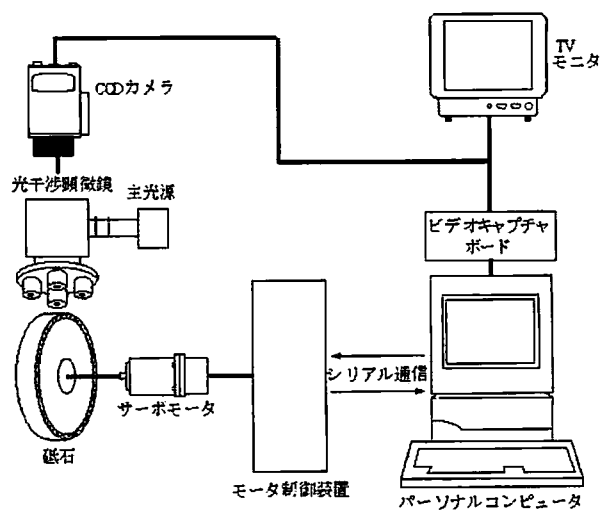


図 5.2 従来の画像処理システム

動部, b) 微分干渉顕微鏡・CCD カメラ・ビデオボードによる砥石作業面撮影部, c) 画像を解析して切れ刃等の自動認識を行う画像処理部の 3 者を連携させ, 統合的に制御する新しいシステムを再構築した. これによって, 砥石作業面の観察から評価までを完全に自動化して, 実用性向上を図った.

砥石駆動部は, PC から RS-232C ポートを介してサーボコントローラを通信制御することで, 研削盤主軸用サーボモータの速度および位置を制御する. サーボモータにより砥石は 0.01° 刻みで位置指定できるので, 本実験で用いた直径 200mm の砥石では砥石作業面上を $19\mu\text{m}$ の精度で位置決めできる.

砥石作業面撮影部は, 顕微鏡と CCD カメラからの画像を, ビデオキャプチャボード (640×480 画素, 24bit フルカラー) を介して, 1 画面当たり 900KB のデジタルデータとし 1/60 秒で PC 内に取り込む. 直接的なメモリ転送を行うため, 従来処理の妨げとなっていたノイズ等の影響も無視できる.

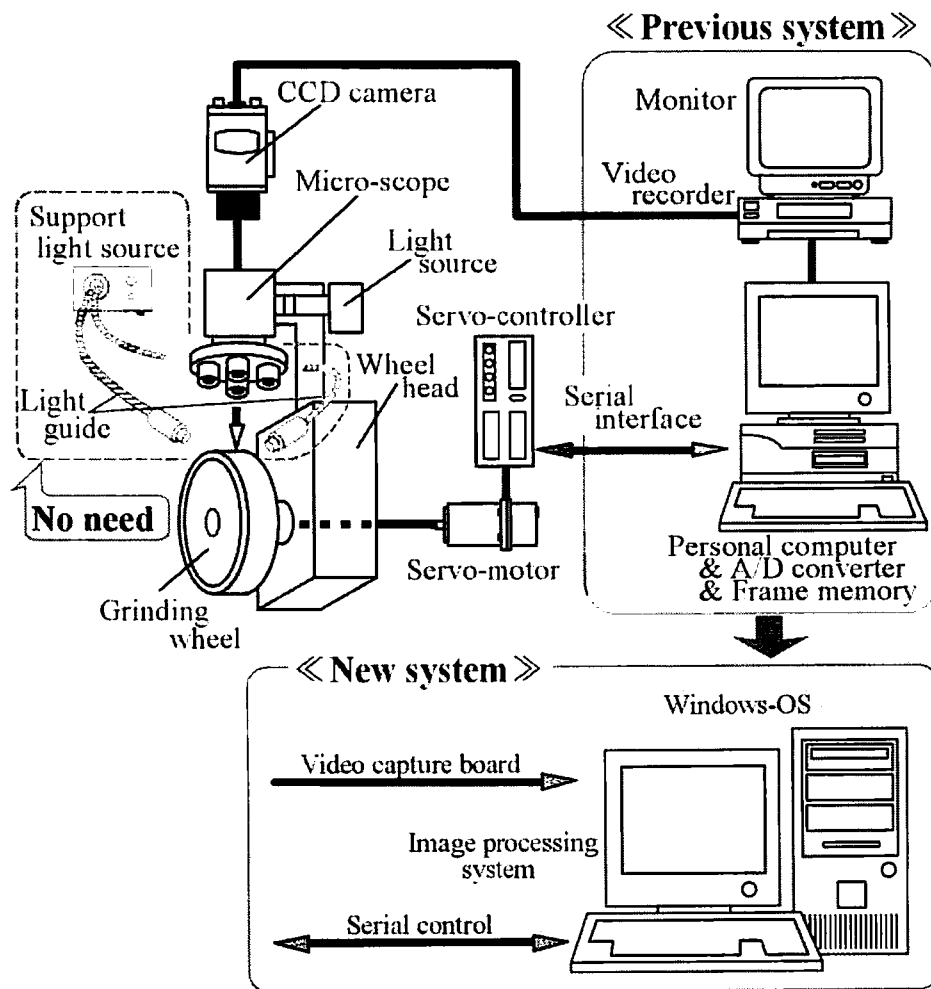


図 5.3 砥石作業面画像処理システムの再構築

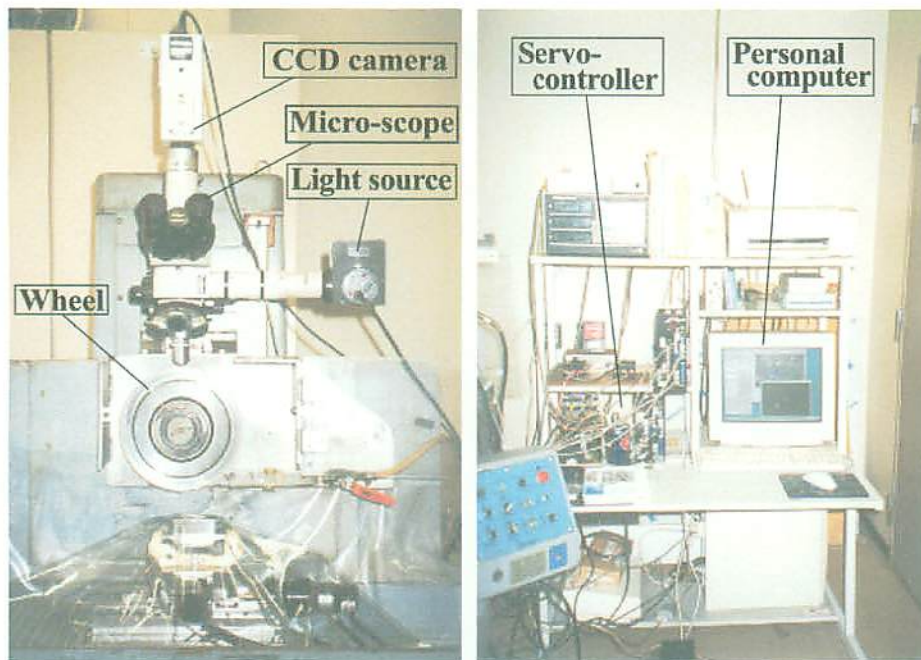
画像処理部は、取り込んだ画像データを、PC 上ですばやく演算処理することで、後述するような砥石作業面上の切れ刃抽出等を自動的かつ連続的に行い、平均切れ刃密度や平均切れ刃面積率などの評価係数を実時間で算出する。

5.2.3 システムの基本構成

本研究で構築したシステムの外観を 図 5.4 に示す。図 5.4(a)の平面研削盤（砥石直径 200mm）は、主軸モータを AC サーボモータ（出力 3.08kW）に交換しており、速度指定することで砥石を 0.01~4000rpm の範囲で任意に制御できる。また前述のように、付属の 16bit 絶対値エンコーダ（パルス分解能 32768/1 回転）によって、0.01°の精度で正確な回転位置制御が可能である。

研削盤の砥石上方には、光源付きの光学式微分干渉顕微鏡（倍率 100~1000 倍）を設置しており、これを使って砥石作業面を直接的に観察する。また、この顕微鏡画像を CCD カメラ（36 万画素）で撮影して、映像信号として取り出し解析する。

システムの中心は、図 5.4(b)に示す Windows-OS 搭載のパーソナルコンピュータ（CPU Pentium 350MHz, メモリ 64MB ; 以下 PC）で、サーボコントローラ（シリアル通信対応型）やビデオボード等を介して、実験装置全体を統括的に制御する。



(a) 平面研削盤と光学顕微鏡
および CCD カメラ

(b) パーソナルコンピュータ
と サーボコントローラ

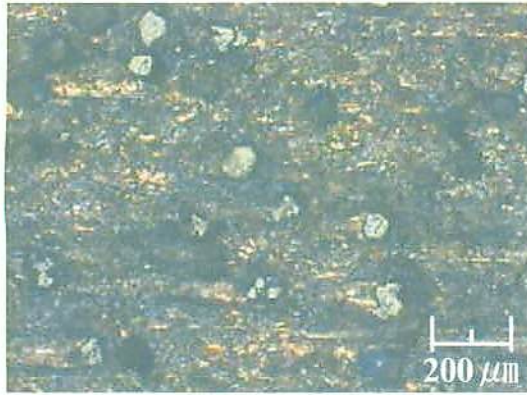
図 5.4 自動砥石作業面画像処理システムの外観

5.2.4 画像による砥石作業面性状の評価

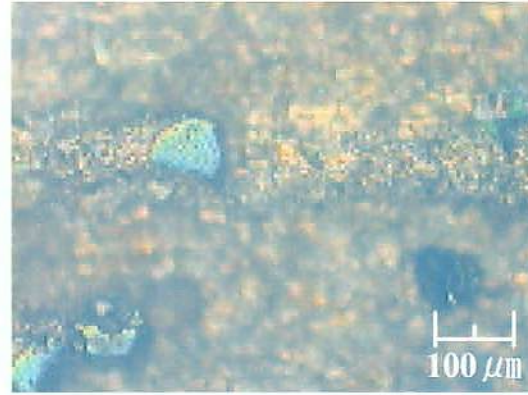
本システムでは、砥石作業面の顕微鏡画像を使って、砥石作業面性状を把握する。すでに前章までに述べてきたように、実際の研削においては、砥粒切れ刃先端のより精密な性状が工作物仕上げ面精度に大きく影響を与えることが知られてきており¹⁾、特に延性モード研削では研削に関与する砥粒先端部に平坦な逃げ面（摩耗面）が形成され、この状態が研削仕上面状態を左右する。したがって、この砥粒切れ刃状態を正確に把握することが極めて重要となる⁴⁾。

図 5.5 には、実験で用いた粒度#140 の粗粒メタルボンドダイヤモンド砥石の作業面画像の一例を示す。図 5.5(a)は 100 倍、図 5.5(b)は 200 倍の拡大画像で、撮影範囲は (a)が 1340×1000 μm 、(b)が 670×500 μm である。従来のシステムでは、一般的な砥石作業面上の砥粒の分布や密度といった比較的マクロな情報を得ることを目的にして、(a)の 100 倍画像を用いていた。しかし、上記のように、延性モード研削の実現を目的とした砥石作業面評価の観点から、さらに詳細な砥石作業面画像が必要となってきた。本システムでは顕微鏡の倍率を 1000 倍まで上げられるが、今回の解析では、まず#140 の砥石粒径（約 100 μm ）との対応を考え、200 倍の画像を使うことにした。

また、従来のシステムでは主としてレジンボンドを対象に画像処理を行ってきた。レジンボンド砥石の場合には、図 5.6(a)にも示すように、赤褐色のレジンの中に黒い砥粒が散在していて、図 5.6(b)に示すような色相ヒストグラムを使って、ボンド部分と砥粒の明確な区分を用いて両者を判別することができた²⁾。しかし、図 5.7(a)に示すメタルボンド砥石の場合には、背景となるメタル部分と抽出対象となる切れ刃部分の色調が近く、図 5.7(b)の色相ヒストグラム上で見ても、レジンボンドの場合と違って明確な区分が見られない。本システムでは、こうした明確な色相差のないメタルボンド系砥石に対応するため、切れ刃の認識アルゴリズムを見直して、新しい砥石作業面画像処理プログラムを開発した。

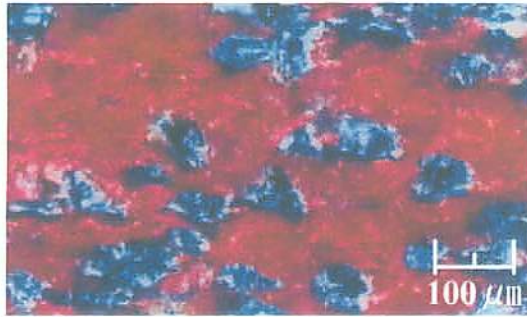


(a) ×100

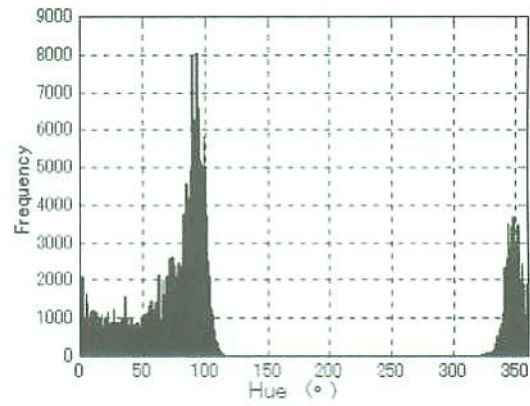


(b) ×200

図 5.5 砥石作業面の顕微鏡画像（倍率 100 倍と 200 倍）

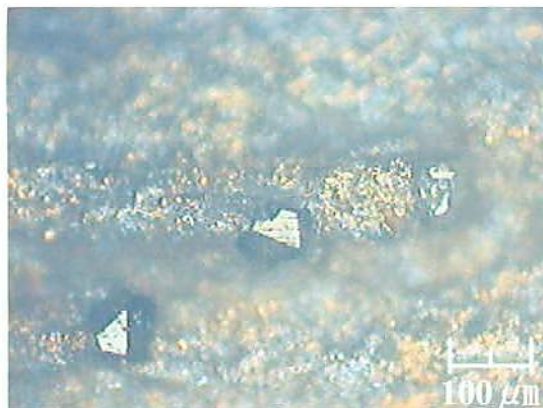


a) 砥石作業面画像

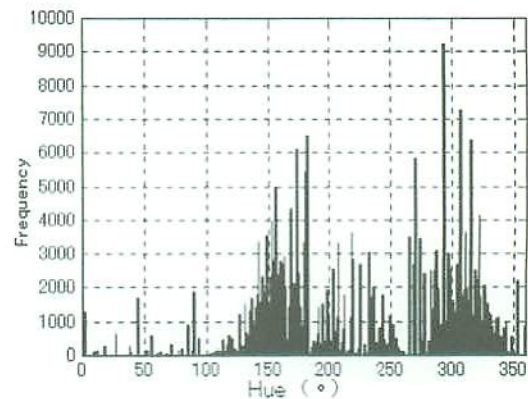


(b) Hue ヒストグラム

図 5.6 レジンボンド砥石の作業面画像と色調ヒストグラム



(a) 砥石作業面画像



(b) Hue ヒストグラム

図 5.7 メタルボンド砥石の作業面画像と色調ヒストグラム

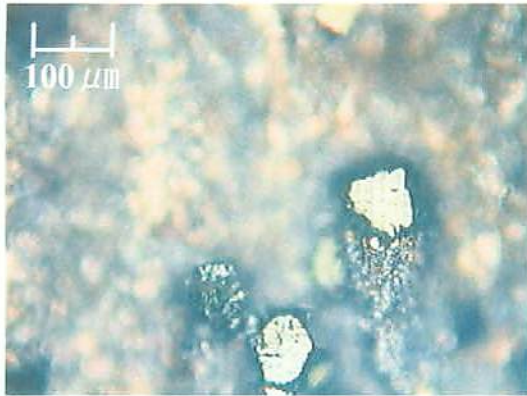
5.2.5 輝度と輪郭処理を合せた切れ刃抽出法

ビデオキャプチャーボードを介して PC 内に取り込んだデジタル画像は、赤 (R)、緑 (G)、青 (B) の 3 原色の濃淡値 (各 8bit, 256 階調) の組合せで構成されている。図 5.8(a)に示すようなメタルボンドダイヤモンド砥石の作業面画像について、RGB 輝度のヒストグラムを求めると、図 5.8(b)のように、各色ともばらつき具合がほぼ同じような正規分布状のかたちとなる。前述のように、これは切れ刃とメタルボンド部分の色相が近く、両者がほぼ重なり合うかたちで輝度分布を構成していることを示している。前述のように、従来実験に用いてきたレジンボンド砥石では、特徴的なレジンの赤褐色と、黒っぽい砥粒部分に対応したピークが表れ、この色相の違いを利用した砥粒抽出アルゴリズムが有効であった。しかし、メタルボンド砥石の場合には、各色に対応したヒストグラムに、切れ刃とボンド部分を区分するような特徴的なピークは存在せず、色の違いから切れ刃とボンド部分を区分するような従来の手法²⁾は適用できない。そこで新たに、以下のような検出アルゴリズムを考案した。

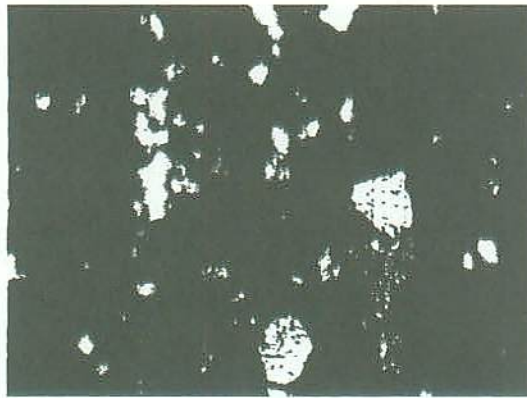
一般に、延性モード研削に適した砥石では、切れ刃が大きな逃げ面をもち、反射の強い平坦部となる。そこで、図 5.8 (c)では、画像の輝度に一定のしきい値を設定して、明るい部分だけを取り出している。原画像と比較すると、明るい切れ刃部分が抽出されていることがわかるが、同時に、切れ刃と同様な明るさを持つボンド部分も多数拾出してしまっていることがわかる。このように、輝度のしきい値設定による 2 値化手法だけでは、切れ刃の正確な抽出が難しい。

そこで、図 5.8(d)のような輪郭画像を利用することにした。これは、砥粒先端の切れ刃が、顕微鏡の焦点に合う一定の高さに揃っていて、くっきりとした輪郭を持ちやすい点に着目した抽出法で、輝度による抽出結果に、この輪郭画像を重ね合わせ、重複する部分を切れ刃と判定することで、正確に切れ刃だけを抽出することができる。図 5.8(e)が、この方法で切れ刃抽出を行った結果で、ボンド部分が除かれ、切れ刃だけが忠実に抽出されている様子がわかる。単純なアルゴリズムだが、この手法を使うことで、ほぼ正確に、かつ短時間で、切れ刃を抽出することが可能となった。

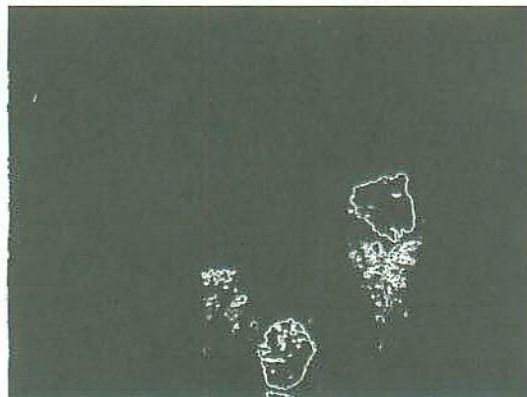
切れ刃面積率等の評価パラメータは、この抽出した切れ刃部分の画素数をカウントすることで算出する。この切れ刃部分の画素数は、前述の輝度のしきい値設定によって微妙に異なってくる。この面積率の計算精度の評価については、さらに 5.3.1 節で検証するが、本システムでは、メタルボンドダイヤモンド砥石の砥石作業面画像が、正規分布状の RGB 輝度ヒストグラムを持つことを利用して、平均と標準偏差を求め、この両方の値を使うことで自動的なしきい値設定が行えるようにもしている。現在のところ、この設定値は、画像の撮影条件によって若干のばらつきが出るため、正確な測定には用いていないが、今後データの集積を行うことで、その精度を高めることが可能だと考えている。



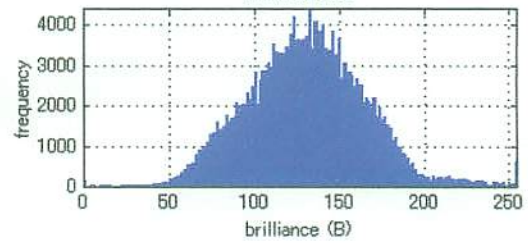
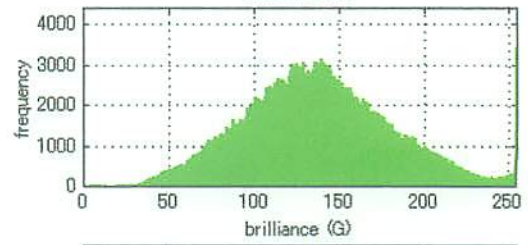
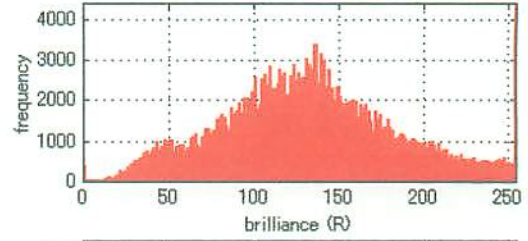
(a) 原画像



(c) 輝度による切れ刃抽出



(d) 輪郭による切れ刃抽出



(b) RGB 輝度のヒストグラム



(e) 輝度と輪郭を合せた切れ刃抽出

図 5.8 輝度と輪郭を利用した切れ刃の自動抽出アルゴリズム

5.2.6 自動撮影・作業面画像処理プログラム

本システムでは、上記の切れ刃抽出法に合わせ、従来から用いられている以下の評価パラメータを使って、砥石作業面性状を定量的に把握することにした。

- (1) 平均切れ刃密度 $n_p = N_p / A$ (個/mm²)
- (2) 平均連続切れ刃間隔 $a = L / N_a$ (mm)
- (3) 平均切れ刃面積率 $\eta = \sum s_i / A$ (%)

ここで、 N_p は観測面内にある切れ刃個数であり、 A は観測面積である。本システムで用いた 200 倍の画像の場合には、1 画面の観測面積 $A = 0.67 \times 0.5 = 0.335 \text{mm}^2$ となる。 N_a は研削方向に引いた幅 b の線上に並ぶ切れ刃の個数で定義され、これは触針を用いた測定法に対応している。本システムでは、従来のシステムとの対応から、幅 10 μm の触針を仮定して画面中央に線を引き、その幅に入る切れ刃個数を算出して求めた。

また、切れ刃面積率算出に用いる各画像の切れ刃面積 s_i は、従来、手作業で顕微鏡写真上の切れ刃を輪郭線で囲み、その内部をすべて切れ刃面積として算出しているものが多い。しかし、砥石作業面性状の正確な把握のためには、切れ刃逃げ面上の小さな穴や条痕の発生などによる変化を定量的にとらえることが重要となる。そこで本システムでは、デジタル画像の画素数をそのまま使い、画素単位の微小な欠落も直接的に切れ刃面積率算定に反映できるようにした。

図 5.9 に本システムの処理の流れを示す。基本的な処理手順としては、スタート時に砥石を原点に復帰させ、撮影開始位置・撮影回数などを入力して、その後、砥石を順次所定の位置に移動させながら、撮影・切れ刃抽出・評価係数算出を繰り返す。この際、撮影した画像および評価係数の算出結果は、ファイル上に記

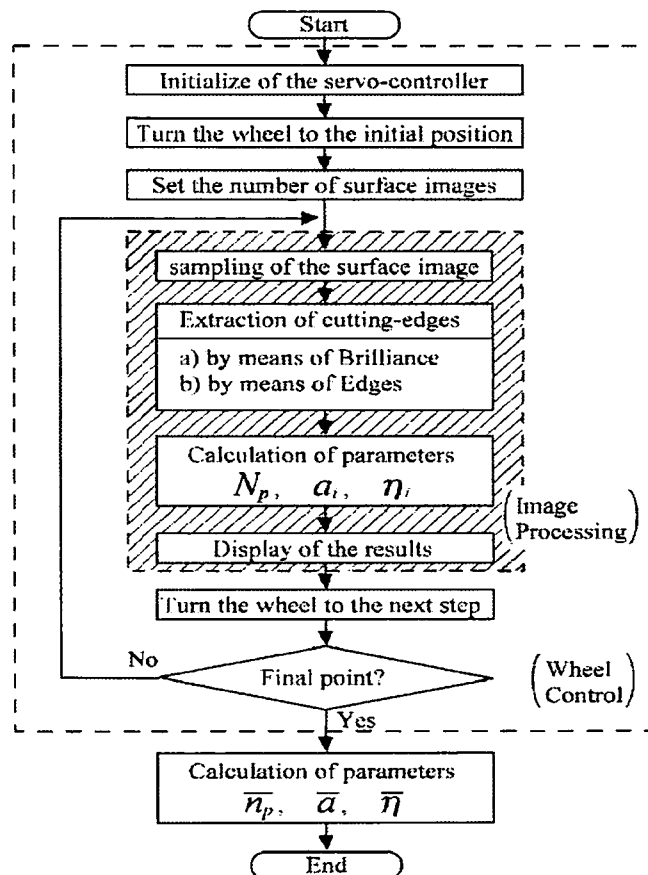


図 5.9 自動砥石作業面画像処理ソフトウェアの処理の流れ

録していき、後から確認できるようにしている。そして、砥石1周の観測が終了すると、砥石全体の平均切れ刃密度 n_p 、平均連続切れ刃間隔 a 、平均切れ刃面積率 η を算出して、これをもとに砥石作業面性状を評価する。

図 5.10 に、本システムの実行画面を示す。Windows 上に砥石の撮影開始位置、撮影回数、移動間隔などの入力部があり、プログラムを実行させると砥石を回転させ、撮影した砥石作業面画像や切れ刃抽出状況を示しながら、各評価係数値を算出・表示する。また、その時点までに累計した切れ刃個数や平均切れ刃面積率も表示する。そして、1 周の測定が終了すると同時に、最終的な平均切れ刃密度や平均切れ刃面積率等を入力する。

プログラムの作成には Windows 上での画像の取扱いが容易な Visual Basic (VB) を用いた。システムの高速度を図るため、画像処理用の Windows-API 関数を直接呼び出して利用しており、VB 自体のグラフィック関数を使った処理より 2~3 倍の実行速度を得ている。切れ刃抽出のアルゴリズムが、画像中の切れ刃個数や大きさに依存するため、多少のばらつきはあるが、1 枚の画像処理に要する時間は 2~3 秒である。ただ、現在のところ、画像のぶれを避けるため撮影時サーボモータの通電を一時停止しており、この再起動と砥石の微小回転にかかる時間を含めると 1 画面当たり 10 秒程度が必要となっている。

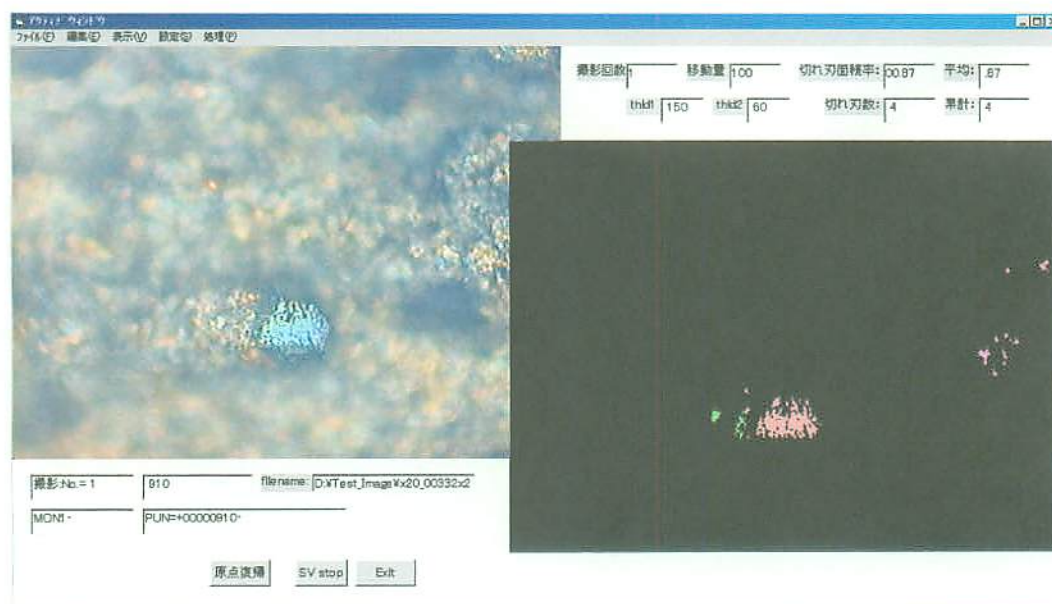


図 5.10 自動砥石作業面画像処理システムの実行画面

5.3 自動砥石作業面画像処理システムの検証

5.3.1 切れ刃密度および切れ刃面積率の算出

システムの検証として、粗粒メタルボンドダイヤモンド砥石を用いたファインセラミックスの延性モード研削への適用を取り上げる。使用した砥石は 4.2.2 節で示したものと同一のもので、粒度#140，集中度 50，平均砥粒径が $100\mu\text{m}$ 程度である。前述のように、延性モード研削では、砥粒の切れ刃逃げ面の大きさ、つまり切れ刃面積率 η の値が、仕上げ面生成に大きく影響する。5.2.5 節で示したように、メタルボンド砥石の場合には、画像の輝度ヒストグラムが正規分布に近く、平均と標準偏差を利用して輝度のしきい値を自動設定することで、撮影画像の明るさ等の条件に関係なく、ほぼ正確に切れ刃の自動抽出を行うことができる。図 5.11 にその実行例を示す。

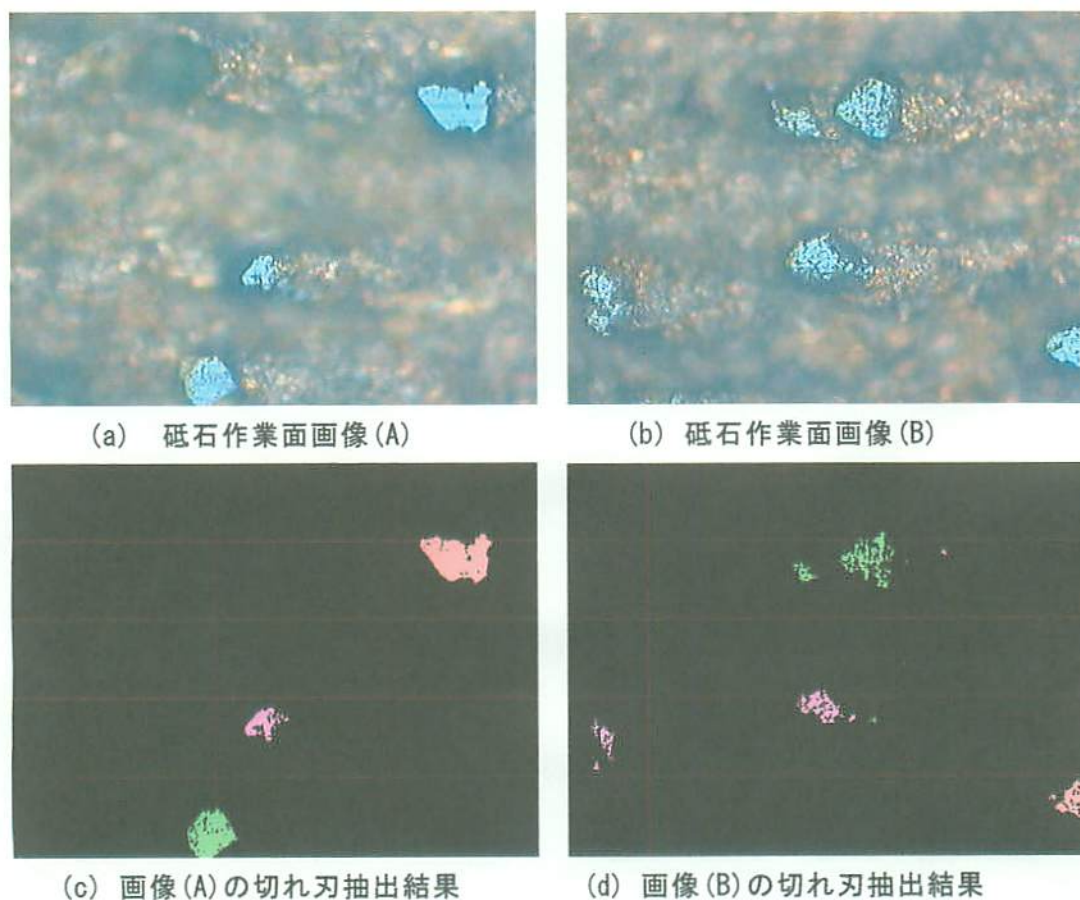
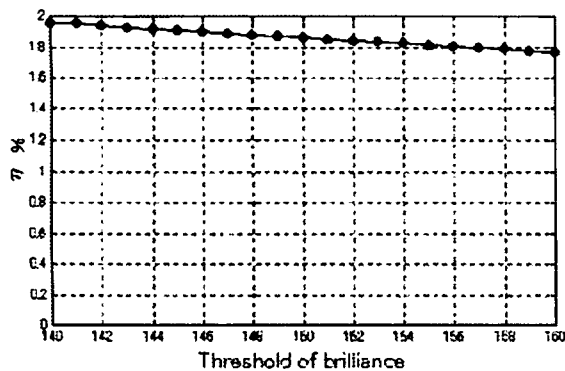


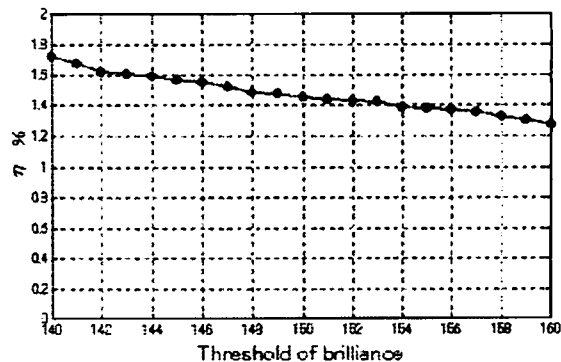
図 5.11 異なる切れ刃逃げ面状態とその切れ刃抽出結果

この時の切れ刃面積率 η の算出値は、切れ刃自体の状態にも影響を受ける。図 5.11 (a)の状態では、図 5.11(c)の切れ刃抽出結果に示すように逃げ面がほぼ偏平で鏡面に近く、図 5.12(a)のようにしきい値を自動設定の範囲内で変化させても $\eta=1.8\sim 1.9\%$ と変化が小さい。これに対し、図 5.11(b)の状態では、(d)の切れ刃抽出結果でもわかるように、切れ刃逃げ面に無数の凹凸が生じており、複雑な摩耗状態となっている。従来の 100 倍画像を使った面積算出ではこうした状態変化の把握は難しかったが、本システムでは明確にその差が反映される。ただこの場合、現状では閾値の設定によって算出値が変動しやすい。上記の範囲で閾値を変えると、 $\eta=1.3\sim 1.7\%$ となり、0.4%の差が生じる。このように、本システムの個々の切れ刃面積率 η の計算では、算出値に対して最大 $\pm 15\%$ 程度の誤差が含まれる可能性がある。しかし、これは複雑な切れ刃状態の場合に生じるもので、多数の画像を使って求める平均切れ刃面積率 η の値については、5.3.3 節でも示すように統計的に大きな誤差は生じないと考えている。

同様に、切れ刃密度 n_p の算出については、ボンドテール部分の状況が大きく影響する。研削の進行にしたがって切れ刃と後縁のメタルボンド部分の高さに差がなくなり⁵⁾、この部分から強い反射を生じて、これが擬似的な切れ刃として検出されるためである。そこで、本システムではこの問題に対処するため、検出した切れ刃を大きさで順位付けして、一定以上のものについては図心を求め、これを中心に平均砥粒径内にある微小切れ刃は、ボンドテールも含め、同一のグループとして認識するアルゴリズムを導入した。図 5.11(c)、(d)に示す切れ刃の色分けは、この結果にしたがっており、これによって切れ刃個数についての正確な算出ができるようになった。なお、ボンドテール部分の解析については、砥石作業面性状の把握に欠かせない要素であり、第 6 章でその抽出法について示す。



(a) 画像 4.9(a)の場合
($\eta = 1.8 - 1.9\%$)



(f) 画像 4.9(b)の場合
($\eta = 1.3 - 1.7\%$)

図 5.12 しきい値を変えたときの切れ刃面積率 η の変化

5.3.2 砥石作業面の連続撮影および全周観察

図 5.13 は、砥石作業面を、多少のオーバーレイを含みながら、1画面分ずつ移動させて連続的に撮影した画像（倍率 100 倍）を貼り合わせ、 $2 \times 3.5 \text{ mm}$ の範囲で示したものである。砥石の軸方向にも観察位置をずらして撮影しており、これによって砥石作業面が連続写真のかたちで視覚的に把握できる。従来の手作業による撮影では、こうした全周的な観察は極めて難しかったが、本システムを利用することで簡単に実行が可能となる。

倍率 200 倍の画像の場合、砥石回転方向の撮影範囲が 1 画面当たり $670 \mu\text{m}$ のため、直径 200 mm の砥石作業面の全周撮影を行うには約 900 枚の画像が必要となる。図 5.14 は、全周を 895 点で連続撮影・処理した結果をまとめたもので、(a) が切れ刃密度 n_p 、(b) が切れ刃面積率 η のヒストグラムである。両図ともランダムな切れ刃の生成を示す確率分布となっており、標準偏差も $s_{n_p} = 6.32$ 、 $s_\eta = 0.59\%$ と比較的ばらつきが大きい。こうした統計的な分析も砥石作業面の評価に有効だと考えている。

図 5.15 は、同じ 895 枚の処理結果を砥石外周に沿って 16 分割して、位置に対応した各評価係数の平均値で示したもので、(a) が平均切れ刃密度 n_p 、(b) が平均連続切れ刃間隔 a 、(c) が平均切れ刃面積率 η の分布である。3 係数とも全体の平均値 $n_p = 9.6$ 個/ mm^2 、 $a = 10.4 \text{ mm}$ 、 $\eta = 0.78\%$ を中心に推移しているが、砥石上の位置で見ると若干の偏りがあることがわかる。目直し・目直し時など新しい切れ刃を生成させた場合には、こうした解析を実施して精密な調整を行うことが有効だと考えている。

全周観察時の画像データは約 800MB の容量となるが、本システムでは DVD 装置 (6.4GB) を用いることによって、ファイル等の記録も確実にできるようにしている。このように砥石の正確な回転位置制御を活かし、大量の画像の自動撮影と解析を実施して、詳細な砥石作業面性状の把握が行える点に、本システムの最大の特徴がある。

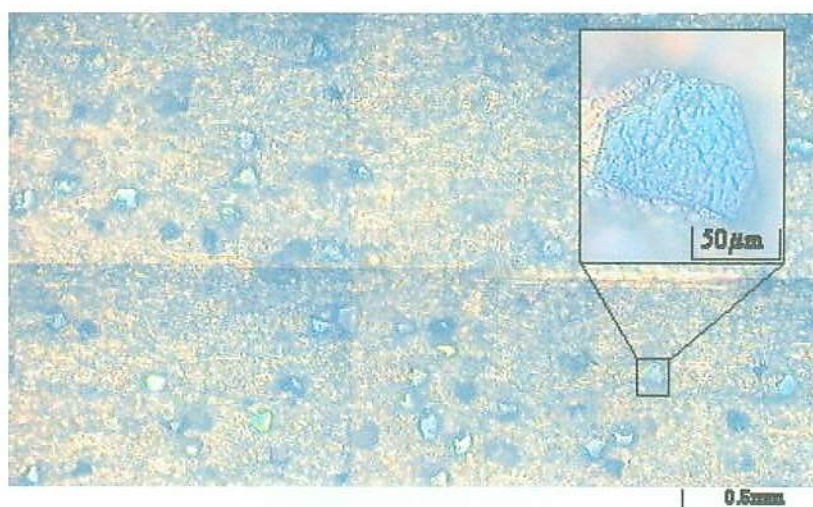


図 5.13 連続撮影による砥石作業面の合成画像（縦 2.0 mm × 横 3.5 mm ）

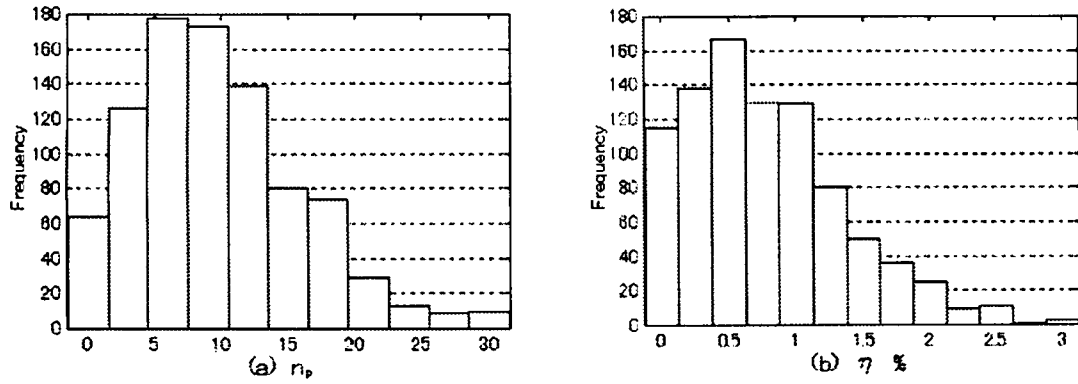


図 5.14 砥石作業面全周観察結果 (895 点) による 切れ刃密度 n_p および 切れ刃面積率 η の 統計分布

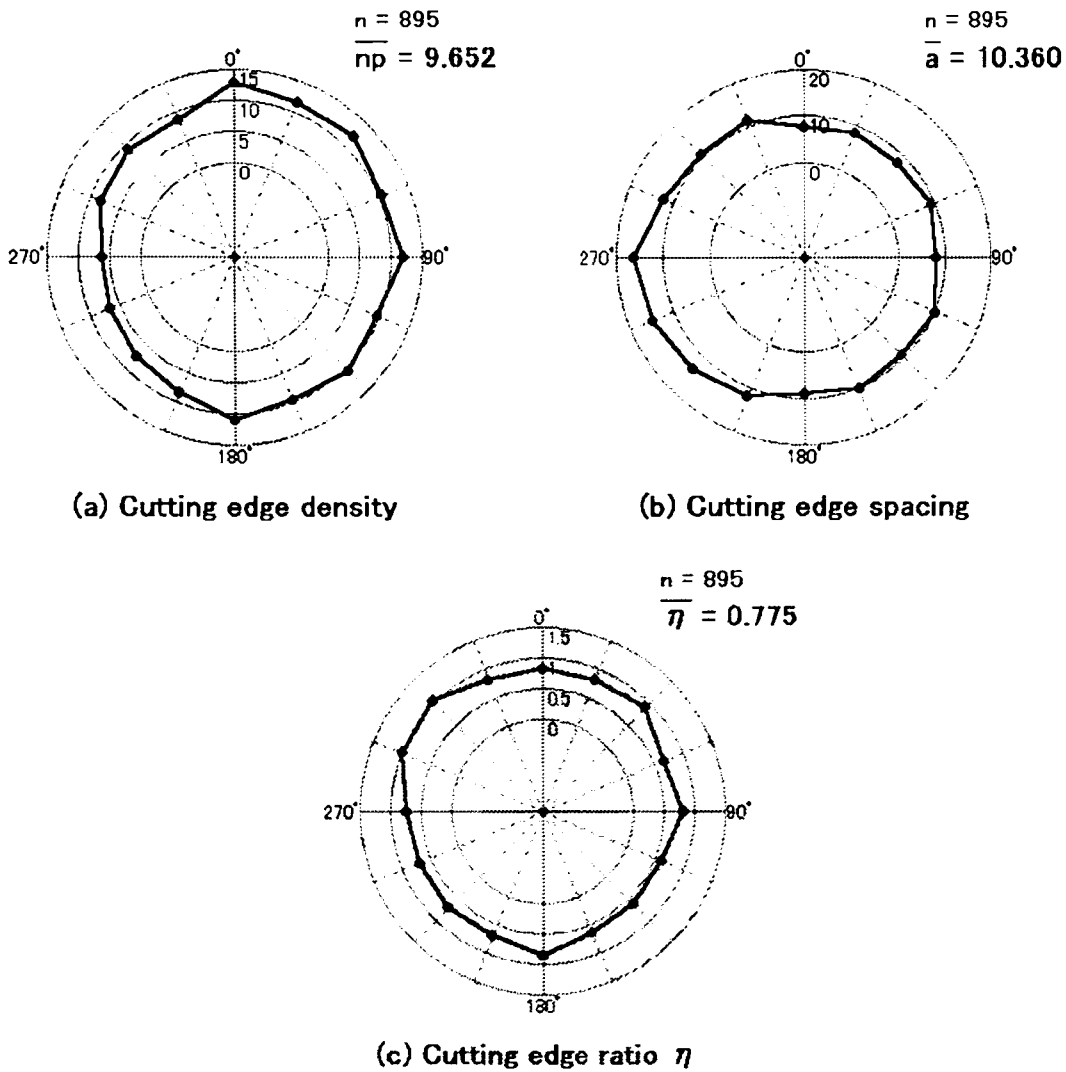


図 5.15 砥石作業面上の位置による 切れ刃密度 n_p , 連続切れ刃間隔 a , 切れ刃面積率 η の 違い (16 地点, 各 56 画像平均値)

5.3.3 一般の研削実験への適用

全周観察によって砥石作業面の状況が正確に把握できることは間違いないが、前述のように砥石の微小な回転に時間がかかり、895枚の自動撮影と処理に約120分を要する。そこで、実際の研削実験の過程でシステムを効率的に利用するためには、どの程度の画像数で各評価係数の値が安定するかを調べた。

図5.16は、撮影画像数を全周観察時の895枚から減少させていったときの変化を示したもので、(a)が平均連続切れ刃間隔 a 、(b)が平均切れ刃面積率 η である。図からわかるように、両係数値とも、画像数200枚程度までは値が大きくばらつくこともなく一定精度が保たれるが、100枚以下では値が変動している。これらの結果から、通常の実験では、砥石外周256点の撮影でシステムを運用することにより、約30分で観察・評価が終了でき、測定精度とも合わせ、十分実用性を満たすと考えている。

また、本システムでは、測定後にも記録した画像ファイルを再度読み出して切れ刃抽出等の処理を実行できるようにした。つまり、システムの画像処理部を独立して使うことによって、手作業もしくはその他の機器で撮影した画像を用いて、砥石作業面性状の評価を行うことができる。これによって、本システムのような主軸制御のない一般研削盤での実験についても、適用が可能となっている。

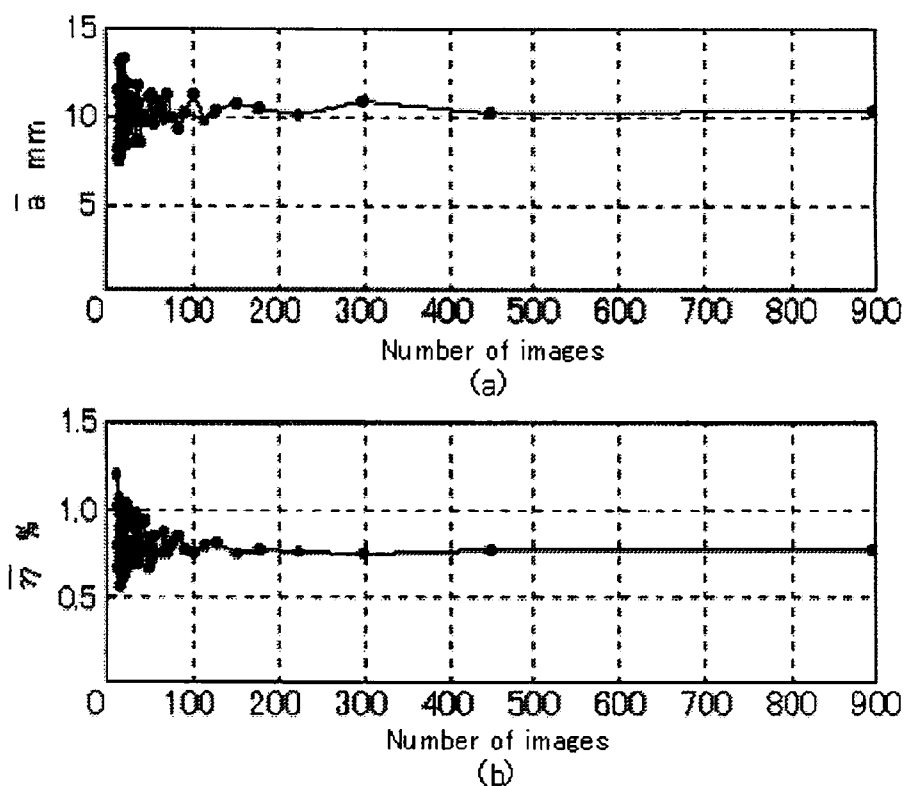


図 5.16 撮影枚数による評価パラメータ値（連続切れ刃間隔 a および 切れ刃面積率 η の平均値）の変化

5.4 結 言

本研究では、Windows-OS 対応の PC を中心に、砥石回転位置制御と画像処理を統括した新しい自動観察・処理システムを構築して、その実用性を検証した。本システムが実現した内容をまとめると、以下のようになる。

- (1) マルチタスク処理が可能な Windows-OS 搭載パーソナルコンピュータを中心に、砥石位置制御部、デジタル画像入力部、画像処理部を連携させた自動化システムを実現した。
- (2) サーボモータを利用した砥石作業面上の正確な位置決めと画像撮影・処理を連動させることで、位置を指定した連続撮影や全周にわたる砥石作業面観察を可能にした。
- (3) CCD カメラで撮影した砥石作業面画像を、ビデオボードを介して、直接コンピュータ内にデジタル画像として取り込むことによって、迅速な画像処理が可能となった。
- (4) 輝度と輪郭を合わせた切れ刃抽出アルゴリズムの導入によって、従来検出が難しかったメタルボンド系砥石についての的確な切れ刃抽出および評価係数の算出が可能となった。
- (5) Windows-API 関数等を利用することで、1 枚の画像処理時間を 2~3 秒に短縮し、回転移動に要する時間と合わせて、砥石 1 周 256 画面を約 30 分で観察・評価できる。
- (6) 上記各機能の実現によって、実際の粗粒メタルボンドダイヤモンド砥石を用いたファインセラミックスの延性モード研削実験に、本システムを活用できることが確認できた。

参 考 文 献

- 1) 例えば, 安井平司, 津和秀夫: 砥石作業面性状の定量化に関する研究 (第1報), 精密機械, 40, 8 (1974) 639.
- 2) 細川 晃, 安井平司, 鐘尾幸久, 佐藤 郁: 画像解析による砥石作業面の評価 (第1報), 精密工学会誌, 62, 9 (1996) 1297.
- 3) 細川 晃, 安井平司, 永江昌義, 佐藤 郁: 画像解析による砥石作業面の評価 (第2報), 精密工学会誌, 65, 10 (1999) 1440.
- 4) 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スの延性モード高平滑研削 (第1報), 精密工学会誌, 63, 9 (1997) 1270.
- 5) 安井平司, 川下智幸, 大崎真嘉: レジンボンド CBN 砥石の形直し特性の一検討, 精密工学会誌, 58, 8 (1992) 1351.

第6章 自動砥石作業面画像処理システムの実験への適用

6.1 緒言

5章では、砥石作業面画像を用いて、研削砥石の評価を行う自動砥石作業面画像処理システムの開発について述べた。このシステムでは、研削盤の砥石上方に光学顕微鏡と CCD カメラを設置して、砥石の回転駆動を正確に制御しながら指定した位置の砥石作業面画像を撮影し、この画像をパーソナルコンピュータ上で連続処理することで、自動的に切れ刃面積率などの評価パラメータ算出を行った。結果として、このシステムではサーボモータを使った正確な砥石回転制御と画像撮影を連動させることにより、砥石の研削方向の作業面を、全周にわたって約 900 枚の画像を連続撮影して、多数の切れ刃状態を正確に評価することができた。

ここでは、さらにこのシステムを、形直し作業等における砥石作業面変化の追跡・観察に適用する目的で、いくつかの機能の拡張と改良を行った結果と、それを使って実際の形直し・目直し時の砥石作業面観察実験へと適用した結果について述べる。

具体的なシステムの改良点は、まず、砥石作業面上のボンド部分が工作物と接触して表れる、いわゆるボンドテールについて、輝度による画像処理を用いて、切れ刃部分との分離を可能にしたことである。これによって、ボンドテールの発生後も切れ刃部分だけに焦点を当てた状態変化の検察・追跡が可能となった。

さらに、これらの画像処理によって自動抽出した個々の切れ刃の位置や大きさを、切れ刃リストとして一覧ファイルを作成して、砥石作業面上の切れ刃を個別に把握できるようにした。システムでは、このリストを活用して、切れ刃の変化を効率的に追跡できる砥石作業面画像ビューアや切れ刃マップの機能も追加して、実験での実用性向上を図っている。

実験では、システムを実際の形直し作業における砥石作業面変化の追跡に適用して、1024 画面による詳細な撮影を行い、詳細な切れ刃状態の変化を観察・追跡した。結果として、砥石外周上の約 3000 個の切れ刃のうち 1000 個あまりの切れ刃が形直し過程でその表面状態の変化を起こすことを捉えた。また、これに引き続いて実施した目直し実験では、さらに 1000 個程度の砥粒が脱落する現象も捉えた。

以下には、新しく開発したシステム機能の概要と、これらの機能を用いて形直し・目直し過程における切れ刃変化を観察・追跡した結果について述べる。

6.2 自動砥石作業面画像処理システムの構成

図 6.1 に、自動砥石作業面画像処理システムの基本構成を示す。システムの中心は、Windows-OS 搭載のパーソナルコンピュータ（CPU Pentium 350MHz、メモリ 64MB；以下 PC）で、シリアル通信型のサーボコントローラや映像信号を取り込むビデオキャプチャボード等を介して装置全体を統括的に制御する。

砥石駆動用のサーボモータは、16bit 絶対値エンコーダ付きでコントローラを通信制御することで、回転精度 0.01° 、直径 200mm の砥石作業面上を $19\mu\text{m}$ の精度で位置決めできる。研削盤の砥石上方には光源付きの光学式微分干渉顕微鏡（倍率 100~1000 倍）と CCD カメラ（36 万画素）を設置しており、砥石作業面を直接的に観察・撮影して、 640×480 画素、24bit フルカラーの 1 画面 900KB のデジタルデータとして、1/60 秒で PC 内へ取り込む。画像処理部は、取り込んだ画像データを、PC 上ですばやく演算処理することで、砥石作業面上の切れ刃を自動的に抽出して、切れ刃の個数や面積、あるいは平均切れ刃面積率などの評価係数を短時間で算出する。

本システムの最大の特徴は、砥石の正確な回転制御と画像撮影・処理を連動させ、砥石の全周観察など、大量データを用いた精密な砥石作業面の解析・評価ができる点にある。

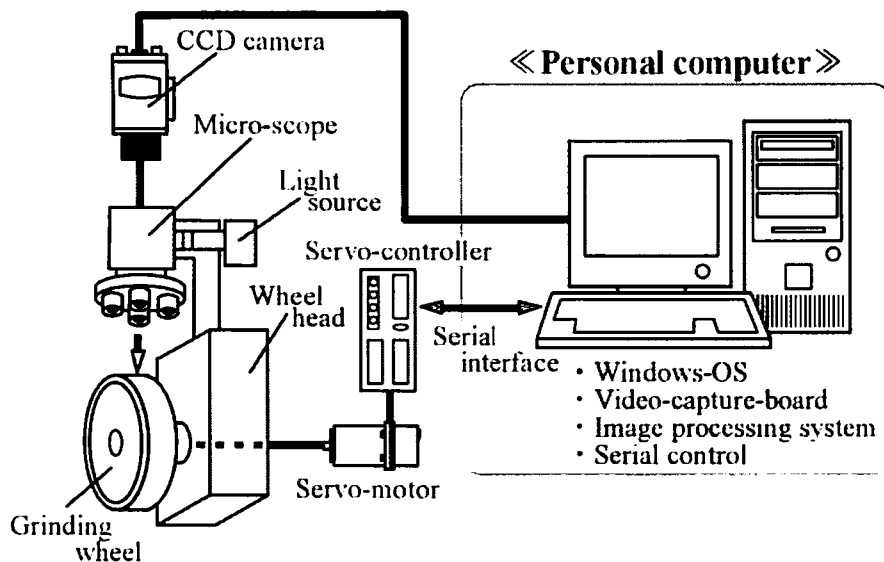


図 6.1 自動砥石作業面画像処理システムの構成

6.3 自動砥石作業面画像処理システムの拡張

6.3.1 切れ刃抽出プログラムの改良 —ボンドテールの抽出—

本システムでは、図 6.2(a)に示すような顕微鏡画像を使って、砥石作業面性状を把握する。図 6.2(a)は、メタルボンドダイヤモンド砥石の作業面画像で、顕微鏡倍率が 200 倍、撮影範囲は $670 \times 500\mu\text{m}$ 、測定面積は 0.335mm^2 である。メタルボンド砥石

の場合、背景となるメタル部分と抽出対象となる切れ刃の色調が近く、色相などによる従来の識別法を行うことが難しいため、本システムでは、切れ刃が顕微鏡焦点の合う一定の高さにそろっていて、くっきりとした輪郭をもちやすい点を利用して、輝度値と輪郭像を組み合わせた独自の認識アルゴリズムを使って、切れ刃抽出を行っている。本研究では、さらにこの切れ刃抽出プログラムを、目直しや形直し過程における砥石作業面追跡実験に適用していくため、以下のような改良を行った。

図 6.2(a)では、切れ刃後方に、ツルアとボンド部分が接触したために生じる、いわゆるボンドテールが発生している。従来の切れ刃抽出プログラムでは、図 6.2(b)のように、ボンドテールも切れ刃と同じように認識してしまい、切れ刃部分だけを取り出すことができなかった。改良プログラムでは、輝度が大きく黄色い色調も一定しているボンドテールを、図 6.2(c)のように先に抜き出して、両者を区分するようにした。図 6.2(d)が切れ刃だけを抽出した結果で、これによってボンドテールが存在しても切れ刃だけを抽出して変化を追跡することができる。

本報告では、こうして求めた抽出結果から、切れ刃のみの個数や面積、あるいはこれを測定面積で割った切れ刃面積率 η などの評価係数を求め、計算精度の向上を図っている。

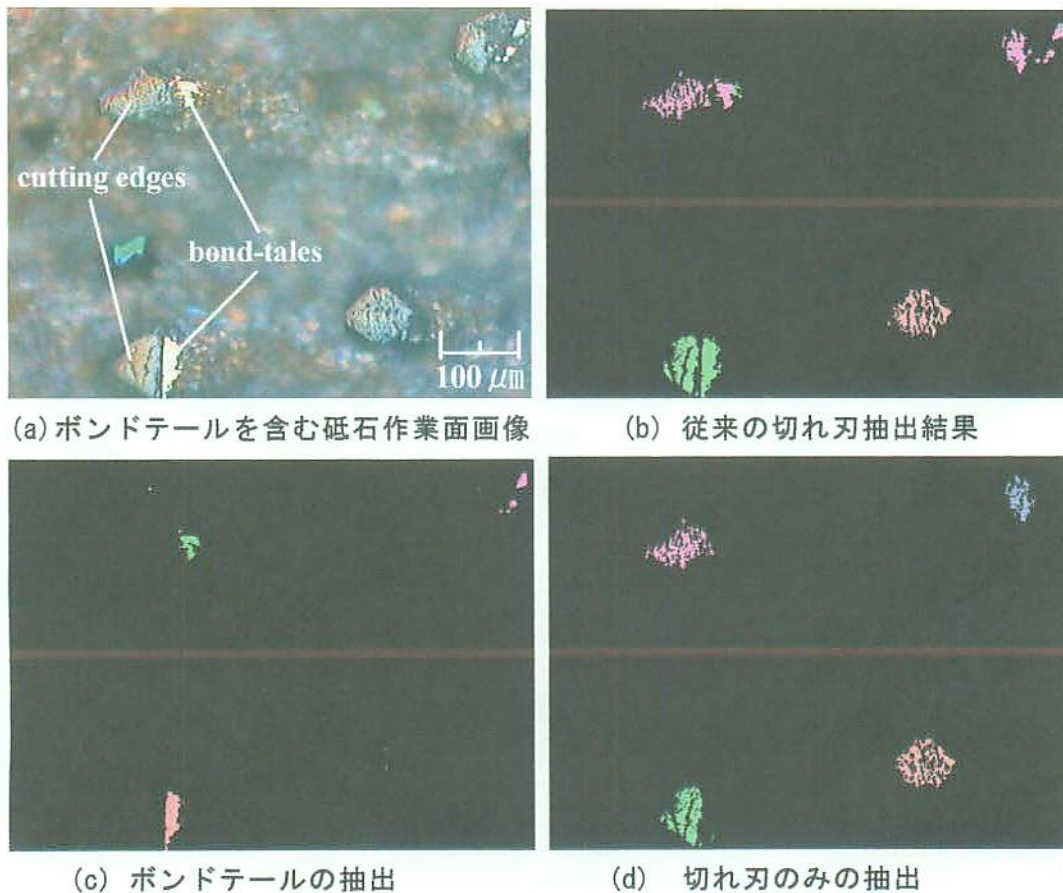


図 6.2 切れ刃抽出ソフトウェアの改良（ボンドテールと切れ刃の分離）

6.3.2 システム機能の拡張

従来のシステムは、研削加工中の砥石作業面性状を素早く定量的に把握することを目的としていたため、砥石作業面の撮影と同時に評価パラメータを算出して、リアルタイムでの数値把握を目標としていた。しかし、形直しにおける切れ刃逃げ面状態を追跡するような実験では、実験後、記録した撮影画像を再度詳細に検討する必要がある。そこで、一旦、砥石作業面の全周撮影を行い、切れ刃の抽出を行った後で、より詳細かつ効率的に切れ刃表面の変化が追跡できるように、以下のような解析ツールの開発を行った。

a) **砥石作業面画像ビューア**：観察・撮影した砥石作業面画像を連続的に一覧表示して、全般的な砥石作業面の状態を素早く視覚的に把握できるように、図 6.3 に示す砥石作業面画像ビューアを作成した。これによって、砥石作業面上の研削方向にそった切れ刃状態を 30 枚ずつ連続的に観察することができる。また、表示モードを切り替えることで、実験前と実験終了後など、2 つの砥石作業面画像を上下に並べて、比較検討できるようにした。この機能では、さらに後述する切れ刃リストのデータを参照して、切れ刃に変化のある画像だけを抽出して表示することができる。この機能は、形直し時の切れ刃変化を捉える実験等において、極めて効果的に用いることができる。

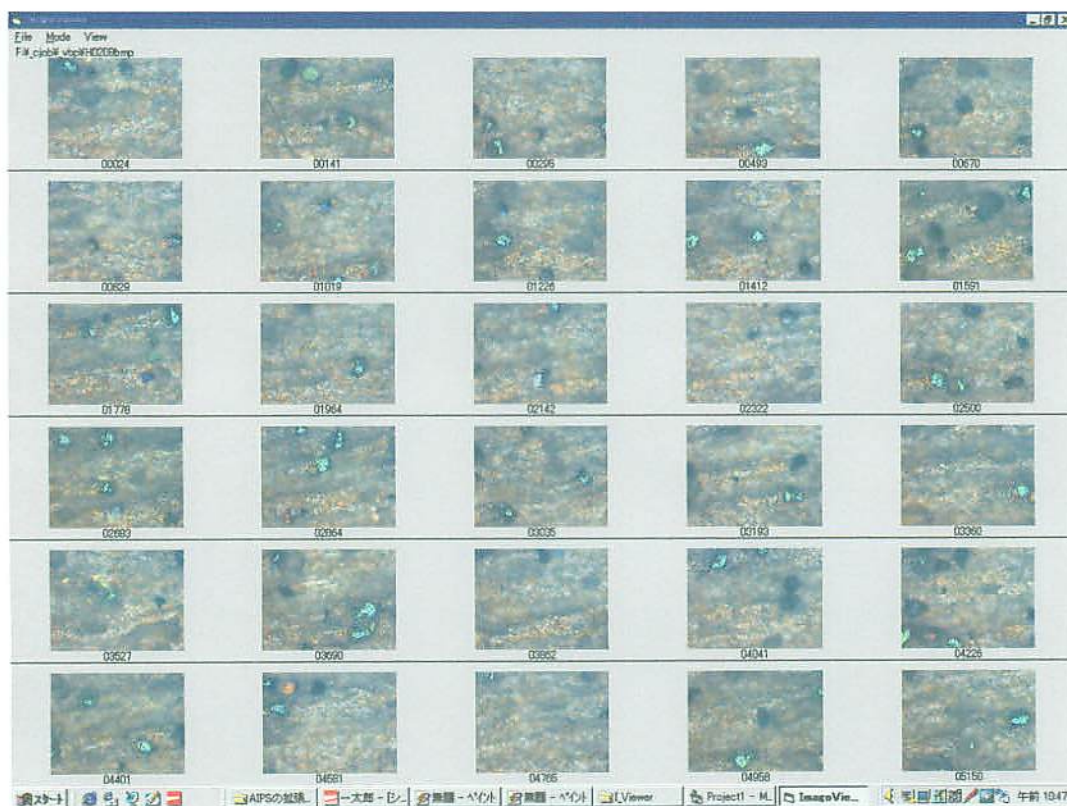


図 6.3 砥石作業面画像ビューア

b) 切れ刃リスト：砥石作業面撮影時の切れ刃の抽出結果について、従来のように切れ刃の個数や平均面積率を算出するだけでなく、個々の切れ刃の位置や大きさ（面積）を記録した切れ刃リストを作成するようにした。図 6.4 は、その表示結果で、内容は撮影画像位置（図中では番号）、切れ刃の xy 座標、面積（ドット単位）などからなり、これらのデータから砥石作業面上の正確な切れ刃の位置や大きさを参照することができる。これによって、実験過程での砥石作業面上の個々の切れ刃状態を短時間に比較・検討することができ、このリストを参照テーブルとして活用することで、上記ビューアや次に示す切れ刃マップなどで変化した切れ刃画像だけを呼出す機能が実現できる。

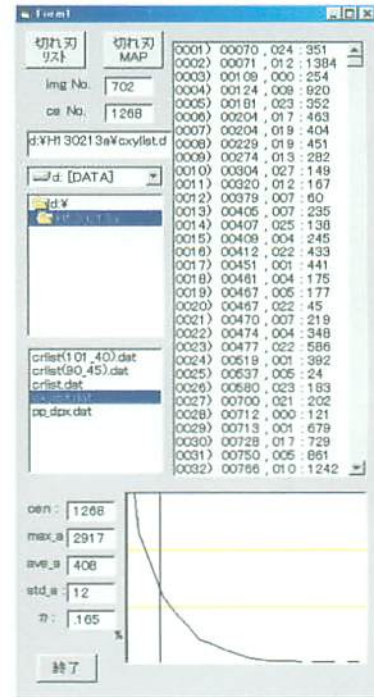
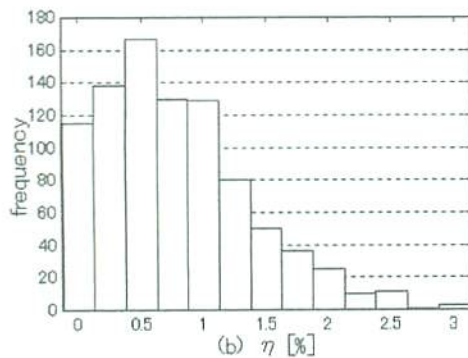


図 6.4 切れ刃リスト

c) 切れ刃大きさヒストグラム：従来のシステムでは、画像ごとに算出した切れ刃面積率 η などの値を使って、図 6.5(a) のような切れ刃の分布を調べていた。

しかし、この場合、顕微鏡の倍率を大きくすると観測面積が小さくなり、切れ刃が存在しない画面が増えて、結果的に面積率 $\eta=0$ の度数が大きくなるなど、見かけ上のばらつきが出た。そこで、上記の切れ刃リストを使って、個々の切れ刃のデータから直接、図 6.5(b) のような切れ刃大きさヒストグラムを求めるようにした。これによって、砥石作業面上に存在する多数の切れ刃の正確な大きさの分布が求められ、平均値や標準偏差などの統計量の算出とともに、砥石作業面上の全体の切れ刃の構成などに大きな変化が生じていないかを数量的に把握する手がかりとなる。



a) 撮影画像ごとのヒストグラム



b) 切れ刃リストによるヒストグラム

図 6.5 切れ刃大きさヒストグラムの改良

d) **切れ刃マップ**：砥石作業面の研削方向に並んだ切れ刃全体の状態を視覚的に表わすために、切れ刃リストを使って Windows 上に位置と大きさを示す切れ刃マップを作成するようにした。図 6.6 は、この切れ刃マップを示したもので、ここでは全周 628mm の砥石作業面を約 20mm 分ずつ、30 列に分けて表示している。大小の各点が個々の切れ刃を示しており、点は大きく・中・小の大きさ別に表示できるようにしている。また、各切れ刃の表示点をマウスでクリックすることにより、その切れ刃の位置 (xy 座標: μm 単位) や面積 (μm^2 単位) も画面上方の表示部に示され、対応する画像ファイルが参照表示できるようにしている。これによって、砥石作業面の切れ刃の正確な位置を確認しながら、該当する切れ刃の状態を選択的に観察することができる。また、この切れ刃マップについても、2 つの切れ刃リストの内容を比較して、変化の大きいところだけを抽出・表示する機能も付け加えた。これによって、画像ビューアと同様に、研削過程での砥石作業面状態の変化追跡において効果的に活用することができた。

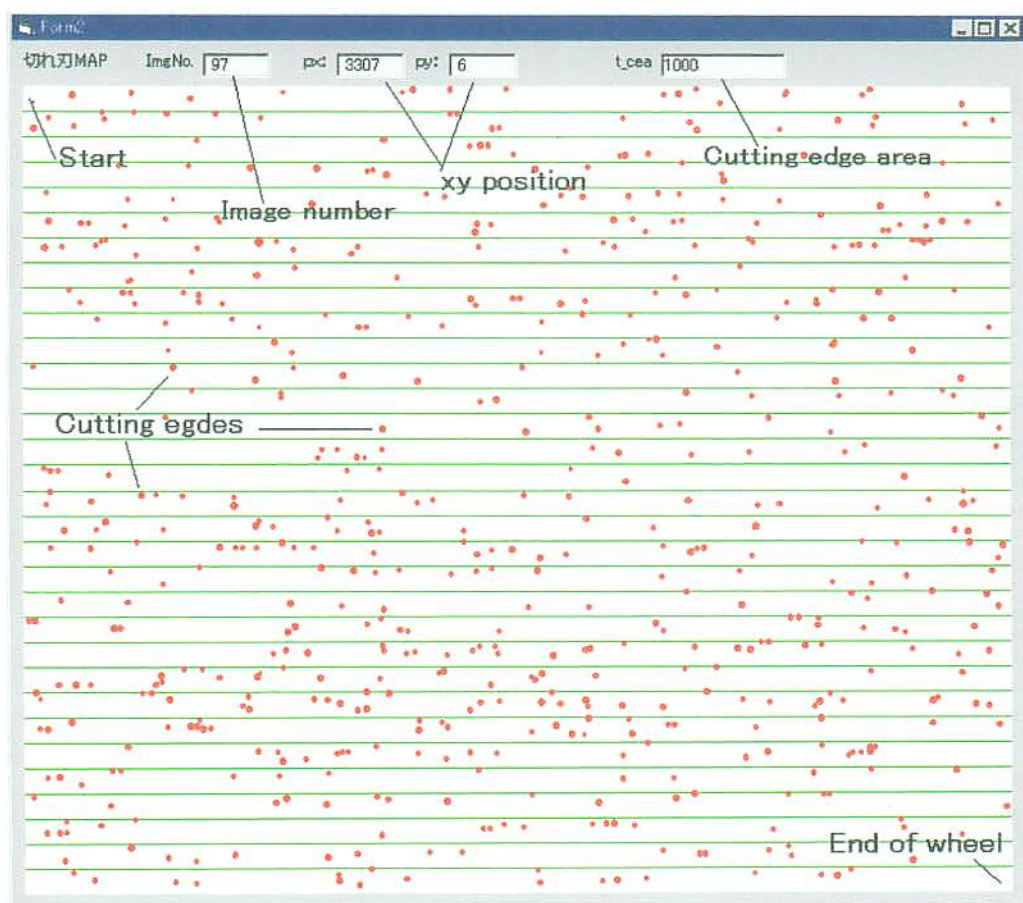


図 6.6 切れ刃マップ (砥石作業面全周の切れ刃の分布)

6.3.3 システムの実行

図 6.7 に、新たに開発したシステムの実行画面を示す。砥石作業面撮影時に作成した、画像フォルダ内の切れ刃リストのファイルを指定してマウスクリックすると、切れ刃データの内容が表示され、同時に切れ刃大きさヒストグラムや平均値等が計算され、切れ刃マップが開く。さらに、この切れ刃マップ上の切れ刃の点をマウスクリックすると、マップ Window 上の表示部に対応する切れ刃の xy 座標と面積が表示され、同時に対応する切れ刃画像が表示される。

プログラムの作成には、従来と同じように Windows-OS 上での画像の取扱いが容易な Visual Basic (VB) を用いているが、時間を要する砥石作業面観察・撮影が終了した後での切れ刃リストを使っての処理なので、ほとんどリアルタイムで実行が可能である。ポストプロセスの操作機能ではあるが、後述するような形直し過程での切れ刃変化の追跡実験等においては、本システムの拡張機能は大きな効果を上げるものとなった。

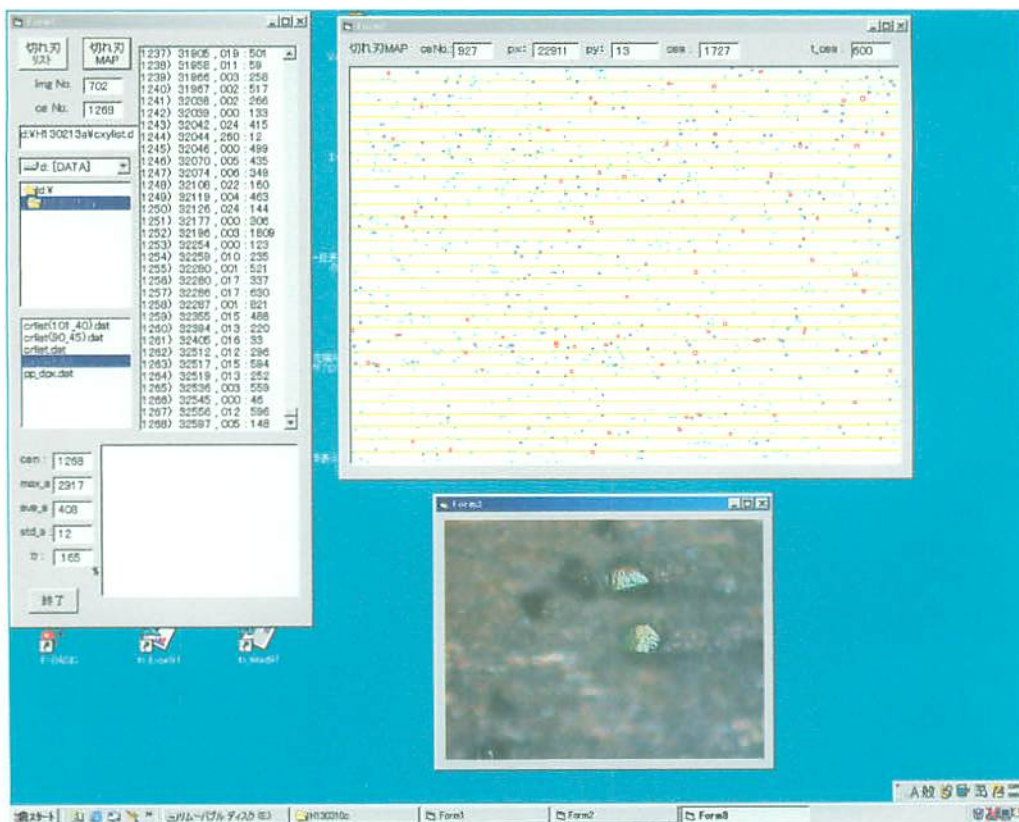


図 6.7 システムの実行画面 (切れ刃リストとマップ)

6.4 自動砥石作業面画像処理システムの適用

6.4.1 形直し過程における砥石作業面変化の追跡

本システムの各種実験における有用性を確認するために、実際の形直し作業における砥石作業面変化の追跡を行った。形直しは、図 6.8 に示すように、粒度 #140 の粗粒メタルボンドダイヤモンド砥石を対象に、粒度#100 のブロック型多石ダイヤモンドツルアを微小な切込みで当てて行う方法で行った。

実験では、砥石を周速 20m/s で回転させ、そこにツルアを切込み量 $1\mu\text{m}$ で、プランジ・トラバース双方向に同時に送り、ツルアの表面が砥石作業面に均等に当たるようにした。砥石作業面の撮影は、この作業を 10 パス行ったあと、画像境界の切れ刃も正確に補足するため各画面がわずかに重なるように回転角を設定して、全周 1024 枚で実施した。撮影時に作業を中断しているため厳密な値ではないが、最終的なツルアの総設定切込み量は $60\mu\text{m}$ である。表 6.1 に、形直しの作業条件を示す。

図 6.9 は、形直し作業前後の砥石作業面の変化を連続画像で示したものであり、図 6.10 は、形直し過程における特定の切れ刃の変化を、ツルアの設定切込み量にそって時系列で示したものである。図 6.10(a) の形直し前の状態から切込み $10\mu\text{m}$ の段階までは、ボンドテールも発生せず、切れ刃状態に目立った変化は見られなかった。切込み量 $20\mu\text{m}$ の図 6.10(b) の段階で、ほとんどの切れ刃後方にボンドテールが発生し、切れ刃逃げ面の光沢にも若干変化が現れる。さらに切込み $40\mu\text{m}$ の図 6.10(c) では、画像中央の砥粒に細かい割れが生じ、右下のすでに割れていた砥粒が脱落する。その後、図 6.10(d) の切込み量 $60\mu\text{m}$ の形直し終了段階では、ボンドテールがわずかに拡大し、中央の砥粒の割れが若干進行しているが、大きな変化は見られない。

粗粒のメタルボンドダイヤモンド砥石の場合、本実験のような微小なツルアの切込みに対して、ほとんどの砥粒切れ刃状態は安定しており、形直しによる実質的な切れ刃高さの変化も設定切込み量の 5% 程度とかなり小さいことがわかってきている⁴⁾。しかし、本システムを用いた大量切れ刃の精密な追跡によって、上記のような割れや光沢の変化など個々の切れ刃の細かな状態変化がより正確に捉えられると考えた。

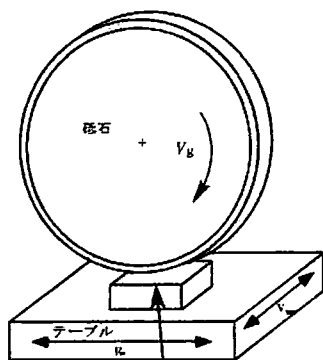


図 6.8 形直し方法

表 6.1 実験条件 (形直し)

研削盤	平面研削盤
砥石	SD140N50M
ツルア	SD100P100M
砥石速度	$V_g = 20 \text{ m/s}$
送り速度	$v_w = 5 \text{ mm/s}$
	$v_{cw} = 0.1 \text{ mm/s}$
ツルア切込み量	$t_f = 1 \mu\text{m} / \text{pass}$

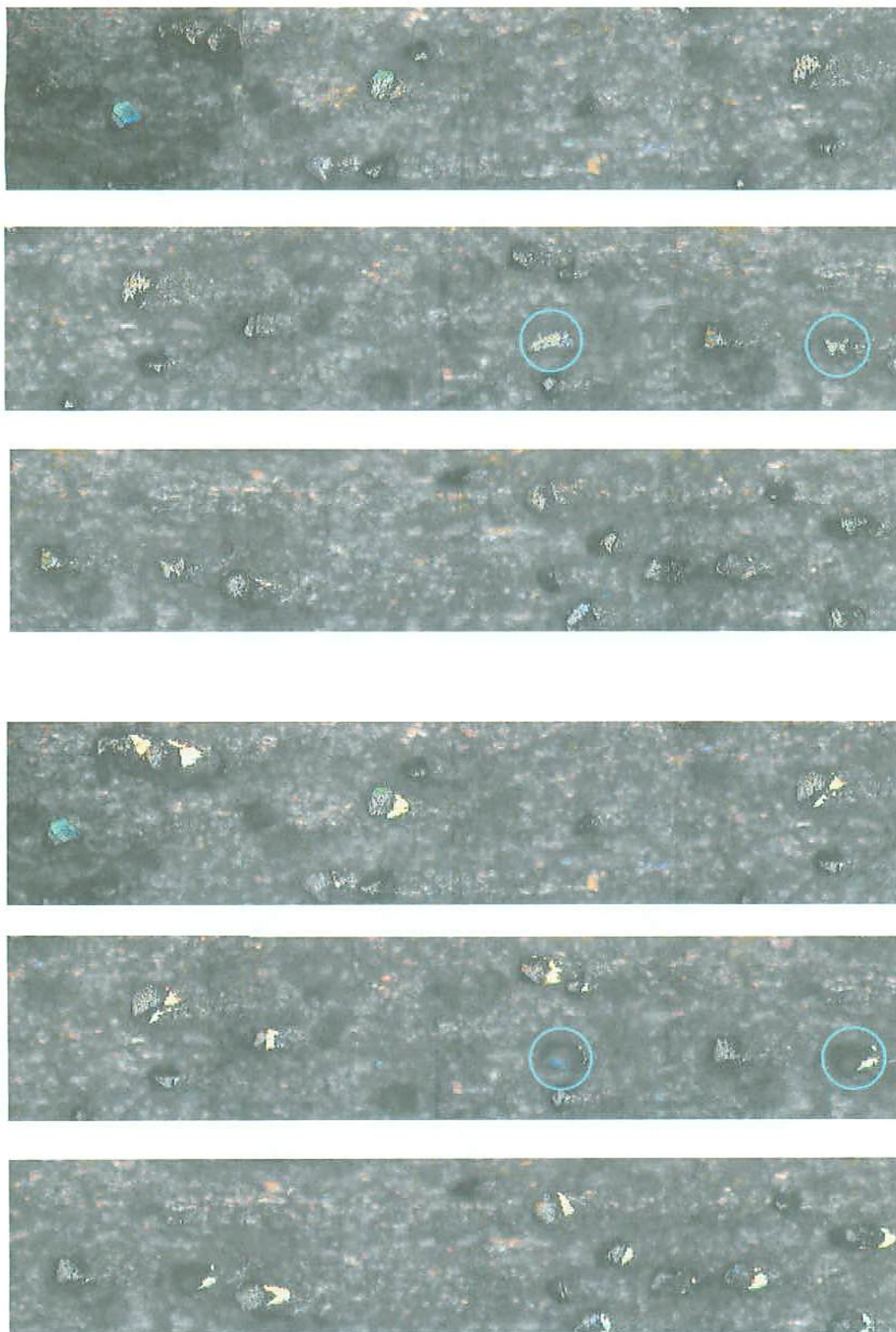


図 6.9 形直し過程における砥石作業面の変化(1) (連続画像)

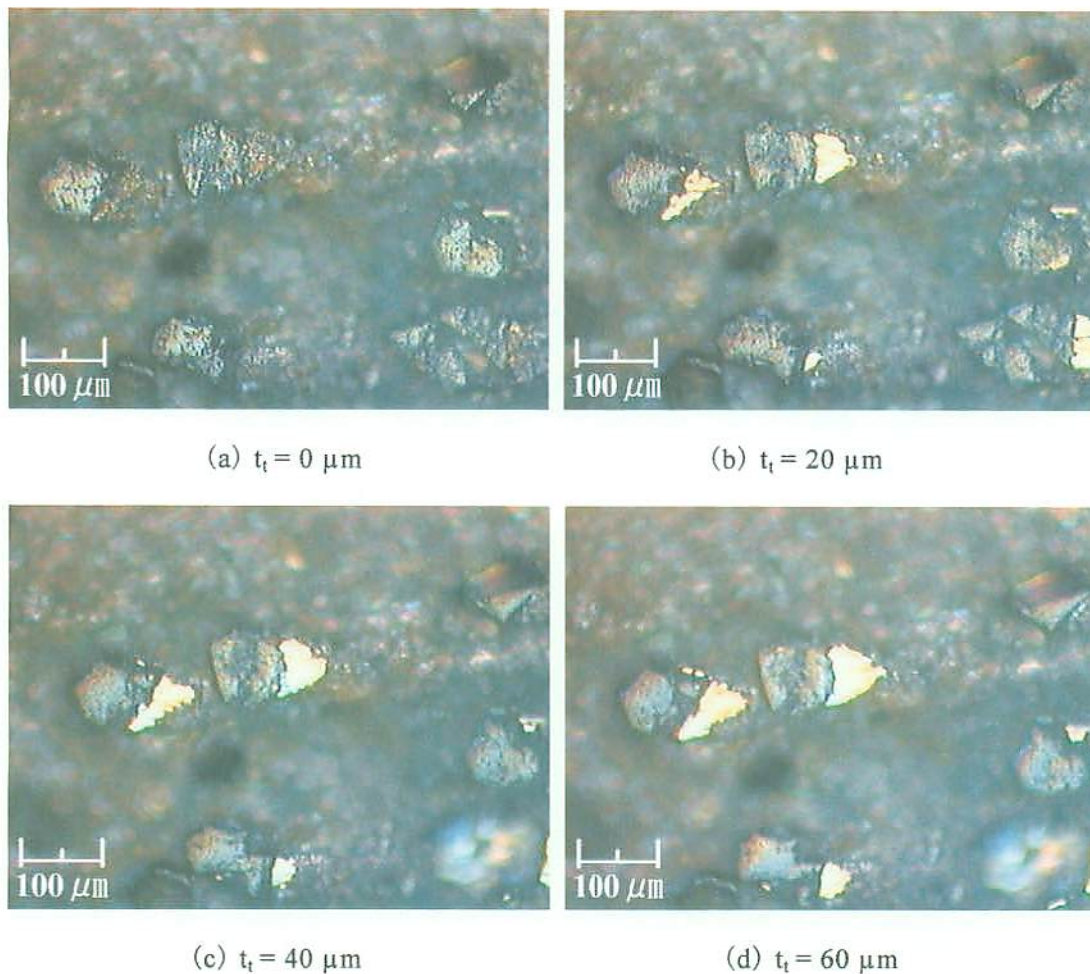


図 6.10 形直し過程における砥石作業面の变化 (2) (割れの発生)

6.4.2 切れ刃リストを利用した砥石作業面変化の追跡

図 6.11 は、こうした形直し前と形直し終了後の切れ刃変化の状況を前述した切れ刃マップを使って示したものである。マップ上の緑の点が大きな変化のない切れ刃、赤い点が面積などが大きく変化した切れ刃を示している。ここでは、切れ刃面積が $100\mu\text{m}^2$ 以上の比較的大きな切れ刃だけを示しているため表示個数が少ないが、それでも、今回の形直し実験で、かなりの切れ刃に変化が起っており、その発生場所も砥石の終端部分にやや多いことなどが明瞭にわかる。

図 6.12 は、同じく切れ刃リストを使って、形直し作業前後に変化のある切れ刃だけを呼び出して画像ビューア上で見たものである。三列に並んだ上下 1 組の画像の上段が形直し前、下段が設定切込み量 $60\mu\text{m}$ までツルアを切込ませた状態で、形直し後の切れ刃が小さくなったり、消失している状況が一覧できる。こうして本システムで検出した切れ刃状態変化を個々に検討していくと、切れ刃変化の内容にも、いくつかのパターンが存在することがわかった。



図 6.11 マップを利用した形直し過程での切れ刃変化の追跡

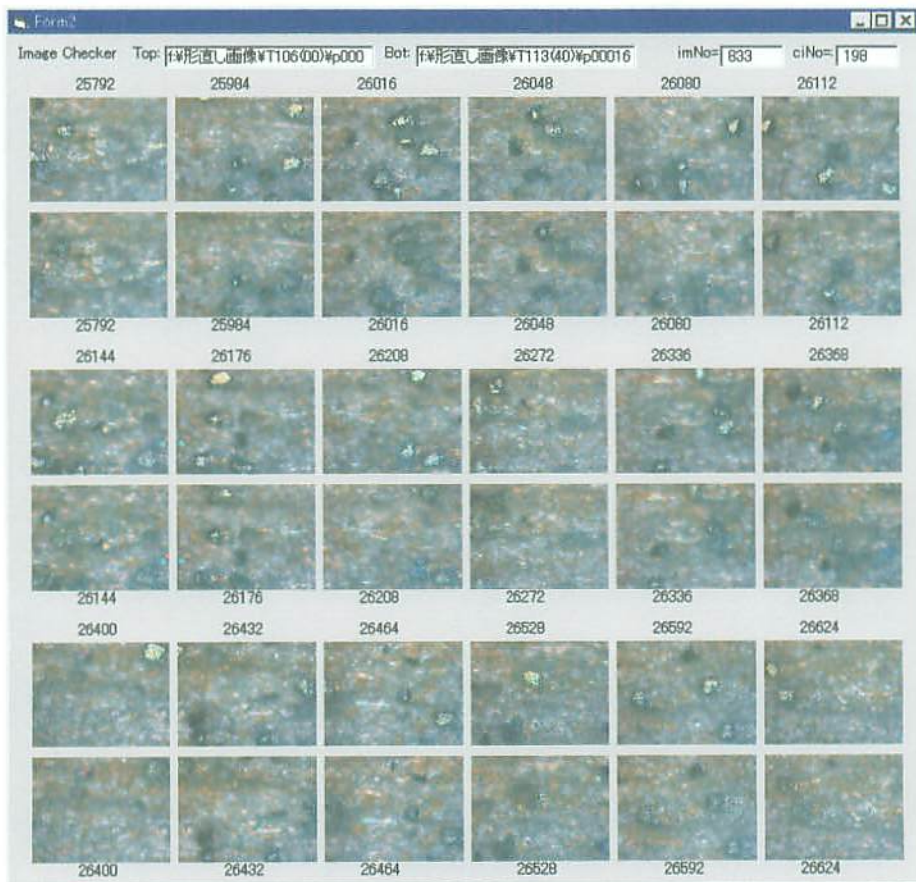
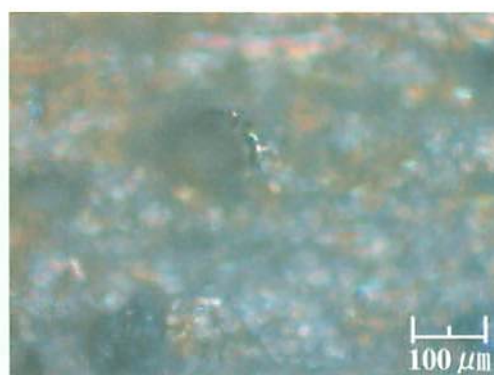
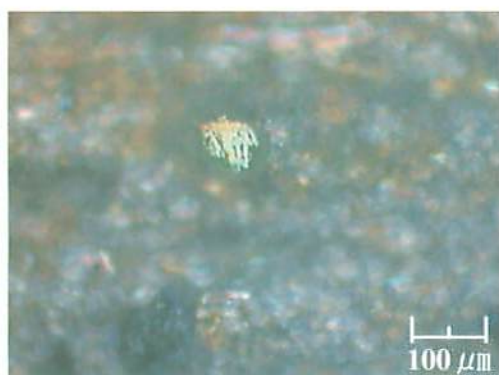


図 6.12 ビューアを用いた形直し過程での切れ刃変化の追跡

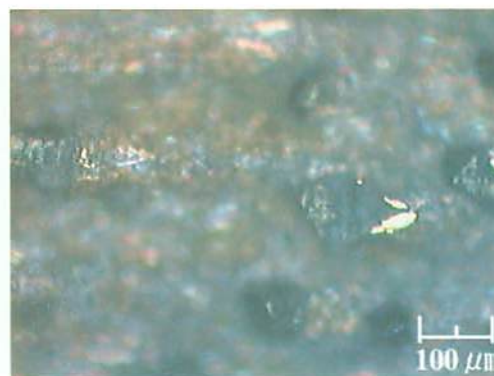
図 6.13 は、観察した形直し過程における切れ刃変化のパターンを示したものである。図 6.13(a)は、砥粒そのものが脱落した例で、ボンド部分に砥粒に対応した穴が空いている。こうした砥粒の脱落は、図 6.10 で示したような割れを伴ったものもある。図 6.13(b)は、砥粒切れ刃の中央部から後が破砕され、先端部だけが残っている例である。後方にボンドテールが生じているが、このボンドテールに近い部分から欠けており、砥粒の下部はボンド内に残っている。これらの明らかな砥粒の欠けや損耗は確率的にそう多くは発生しなかった。

(形直し前)

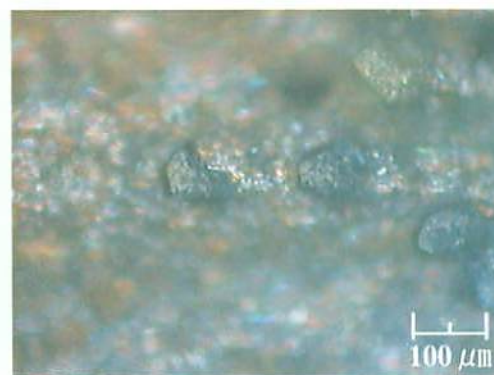
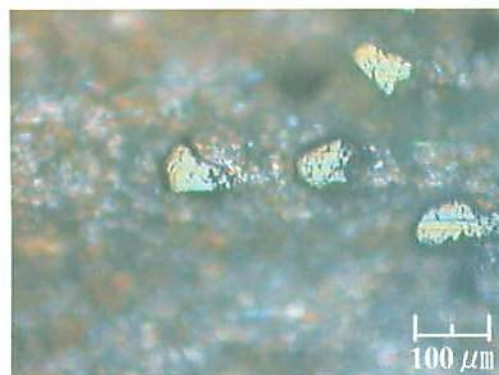
(形直し後)



(a) 砥粒の脱落



(b) 砥粒の割れ



c) 砥粒切れ刃の消失

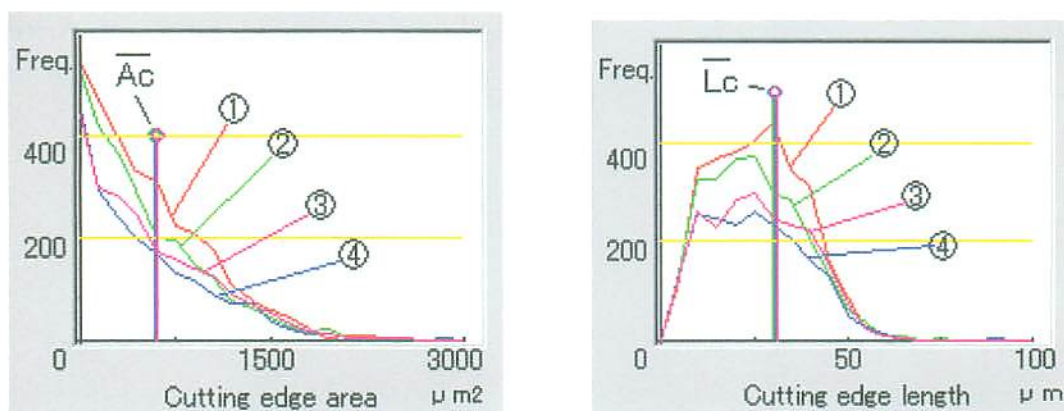
図 6.13 形直し過程における切れ刃変化のパターン

一方、図 6.13 (c) の切れ刃は割れや脱落を生じていないが、押し潰されたように表面の光沢を失っている。これは、ツルアとの接触によって切れ刃逃げ面に細かな損耗が生じている結果だと考えられる。この場合、砥粒自体はまだ存在しており、内部に割れなどの大きなダメージを受けていなければ、再度切れ刃として再生してくることが考えられる。

6.4.3 切れ刃ヒストグラムによる形直し過程の切れ刃変化の追跡

こうした形直し過程における砥石作業面の変化を、数量的に把握するために、前述の切れ刃ヒストグラムを作成して、変化の状況を確認した。図 6.14 は、ツルアの総設定切込み量 0, 20, 40, 60 μm の各段階について、切れ刃大きさヒストグラムの変化を見たものである。図 6.14 (a) は、切れ刃面積を 0~3000 μm^2 の間で 20 区分して度数を示したものである。切れ刃面積の分布は指数関数的で小さな切れ刃もかなり多く、形直しが進むにつれ、どの大きさの切れ刃も一様に減少していることがわかる。一方、図中に縦線で示した各段階での平均切れ刃面積 \bar{A}_c の位置はほとんど変わらず、形直しの進行にもかかわらず、600 μm^2 程度でほぼ一定の値を保っている。

面積区分では平均的な大きさの切れ刃の変化が捉えにくいと考え、切れ刃を円形と仮定し面積から直径に換算した代表切れ刃長さ L_c を求め、同様に形直し過程における度数変化の様子を見たのが、図 6.14 (b) である。切れ刃抽出の過程で、有効切れ刃とはならない微小面積のものを除いているために、10 μm 未満の切れ刃については切捨てたかたちとなっているが、 L_c はほぼ 10~70 μm の間で平均値を中心とした確率的な分布となっていることがわかる。これは、本実験で用いた #140 砥石の砥粒径にほぼ対応した値となっている。また、ここでも、平均の切れ刃長さ L_c は 30 μm 程度で、面積と同様にほぼ一定の値を保っていることがわかる。



(a) 切れ刃面積の分布

(b) 切れ刃長さの分布

図 6.14 形直し過程における切れ刃ヒストグラムの変化

[ツルア切込み量 : ① 0 μm , ② 20 μm , ③ 40 μm , ④ 60 μm]

図 6.15 は、こうした形直しの各段階で算出した統計量の変化をツルアの切込み量によって示したものである。今回の実験では、切れ刃個数 C_n は形直しの進行にしたがって 2998 個から 1957 個まで 1000 個あまり減少しており、これにともなって切れ刃面積率 η も 0.84 から 0.54 へ低下している。両者とも形直しの進行につれ、変化がやや小さくなる傾向も見える。一方、切れ刃面積や切れ刃長さの平均値は、 $A_c=583\sim 613\mu\text{m}^2$ 、 $L_c=30.8\sim 31.5\mu\text{m}$ と、前述のようにほとんど変化していない。

今回の実験では追跡した総数 3000 の切れ刃のうち、変化した 1000 個のほとんどが切れ刃表面のつぶれによるもので、やや判定の難しいものもあるが、砥粒の割れや脱落などの発生は最終的な形直し終了時でも 30 個程度と極めて少なかった。このことが切れ刃個数や面積率の減少にもかかわらず、切れ刃大きさの平均値が変化しない結果に表われている。つまり、今回のようなメタルダイヤモンド砥石の微小切込みによる形直し作業では、設定切込み量が大きくても砥石作業面全体の状態変化は意外に小さいことを裏付けていると考えられる。

切れ刃表面のつぶれをどう評価するかについては、今後さらに切れ刃逃げ面の状態変化を詳細に観察して見極める必要がある。本システムでは、今後、顕微鏡倍率の変更や切れ刃抽出時の画像上のしきい値操作等を対応させることで、こうした課題の解明に取り組んでいきたいと考えている。

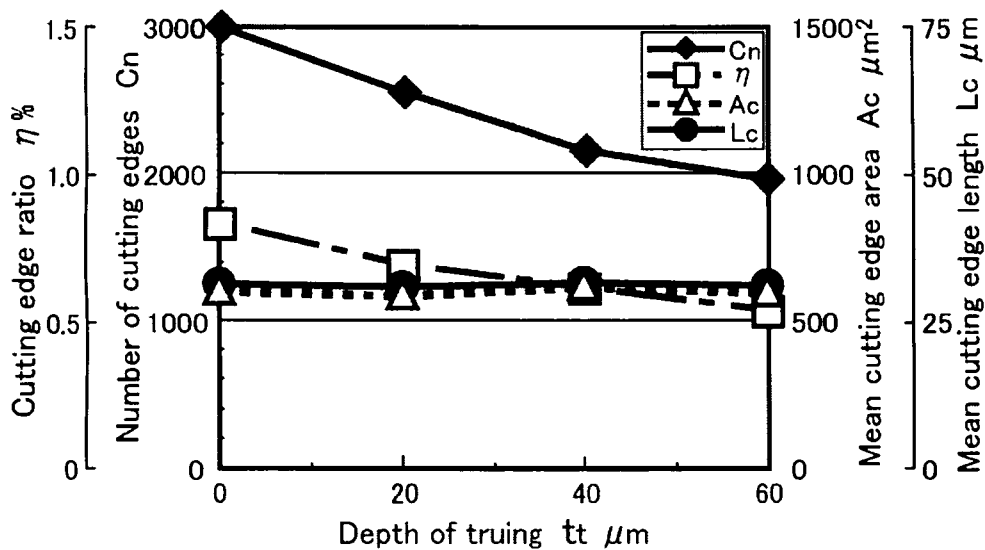


図 6.15 形直し過程における切れ刃個数 C_n 、平均切れ刃面積 A_c 、平均切れ刃長さ L_c および切れ刃面積率 η の変化

6.4.4 目直し過程における砥石作業面の全周観察

さらに、本システムを用いて、目直し作業における砥石作業面変化の追跡を行った。目直しは、粒度 #140 の粗粒メタルボンドダイヤモンド砥石を対象に、図 6.16 に示すような、サーボモータで制御する定速度微小送り装置を用いて、粒度#100 のWAスティックを使って湿式ドレッシングを行った。このシステムでは、パーソナルコンピュータからサーボパックに指令を送ってサーボモータを回転させ、ボールネジの回転によってドレッサの送り運動を制御する。サーボモータは 30W、定格 3000rpm のものを使用している。この目直し装置によって、従来と比べスティック送り等を細かく制御しながら、目直し作業を行うことができる。装置の構成を図 6.16(b)に示す。

実験では、砥石を周速 20m/s で回転させ、そこにスティックを切込み量 1mm/s で送り、スティック表面が砥石作業面に均質に当たるようにした。この WASD 法では、目直し時にスティックから脱落した WA 砥粒が、スティックと砥石との接触領域で滑りまたは転動することによって結合材が除去されると考えられる。除去される量は、転動長さ、つまり砥石とスティックの接触長さが長くなると増加する。特に WA スティックでは、気孔部で脱落砥粒が一時保持されるため、さらに接触弧の長さが結合材の除去効果に影響すると考えられる。表 6.2 に目直し条件を示す。

表 6.2 目直し条件

研削盤	PSG-52BN
砥石	SD140N50M6
砥石周速度	$V_g=20\text{m/s}$
送り速度	1.5~3.0mm/min
ドレッサ	WA180G
研削液	Soluble S47(1/5)

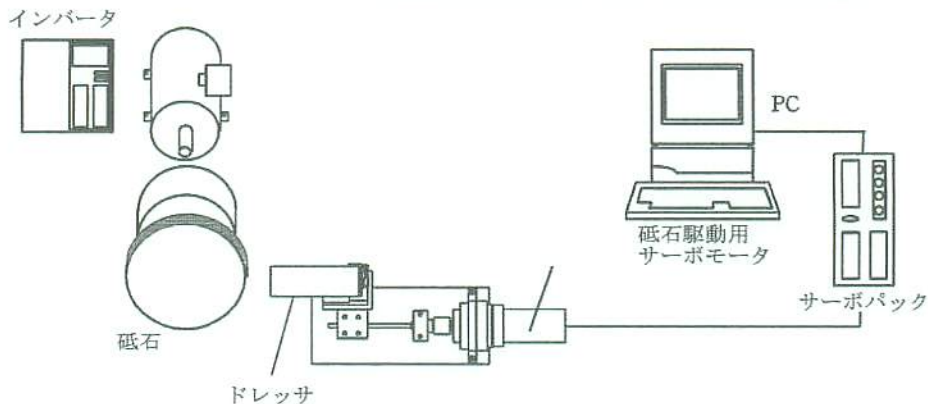
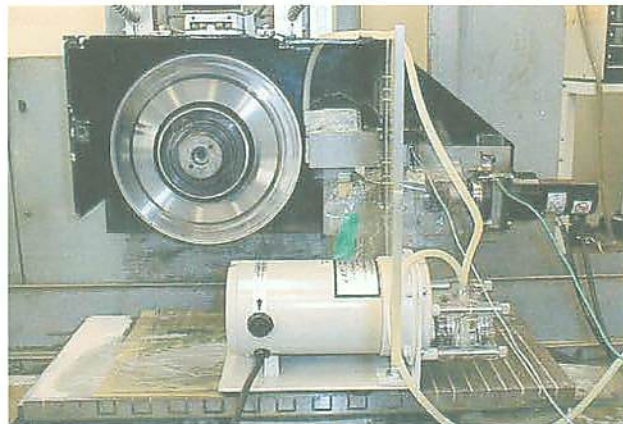


図 6.16 自動目直し装置

砥石作業面の撮影は、このスティック送りを10mmずつ行ったあとに4回実施した。画像撮影は、画像境界の切れ刃が正確に補足できるように、画面がわずかに重なる回転角に砥石移動量を設定して、全周1024枚で行った。

まず、砥石作業面上の全周にわたる砥粒切れ刃の分布状態等を把握するために画像ビューアを用いて確認した。図6.17, 18は、砥石作業面の変化を連続画像で示したものである。両図とも、上段が目直し前、下段が目直し後で、目直しによって形直しによって生じていた切れ刃後縁のボンドテールがきれいに除去されていることがわかる。

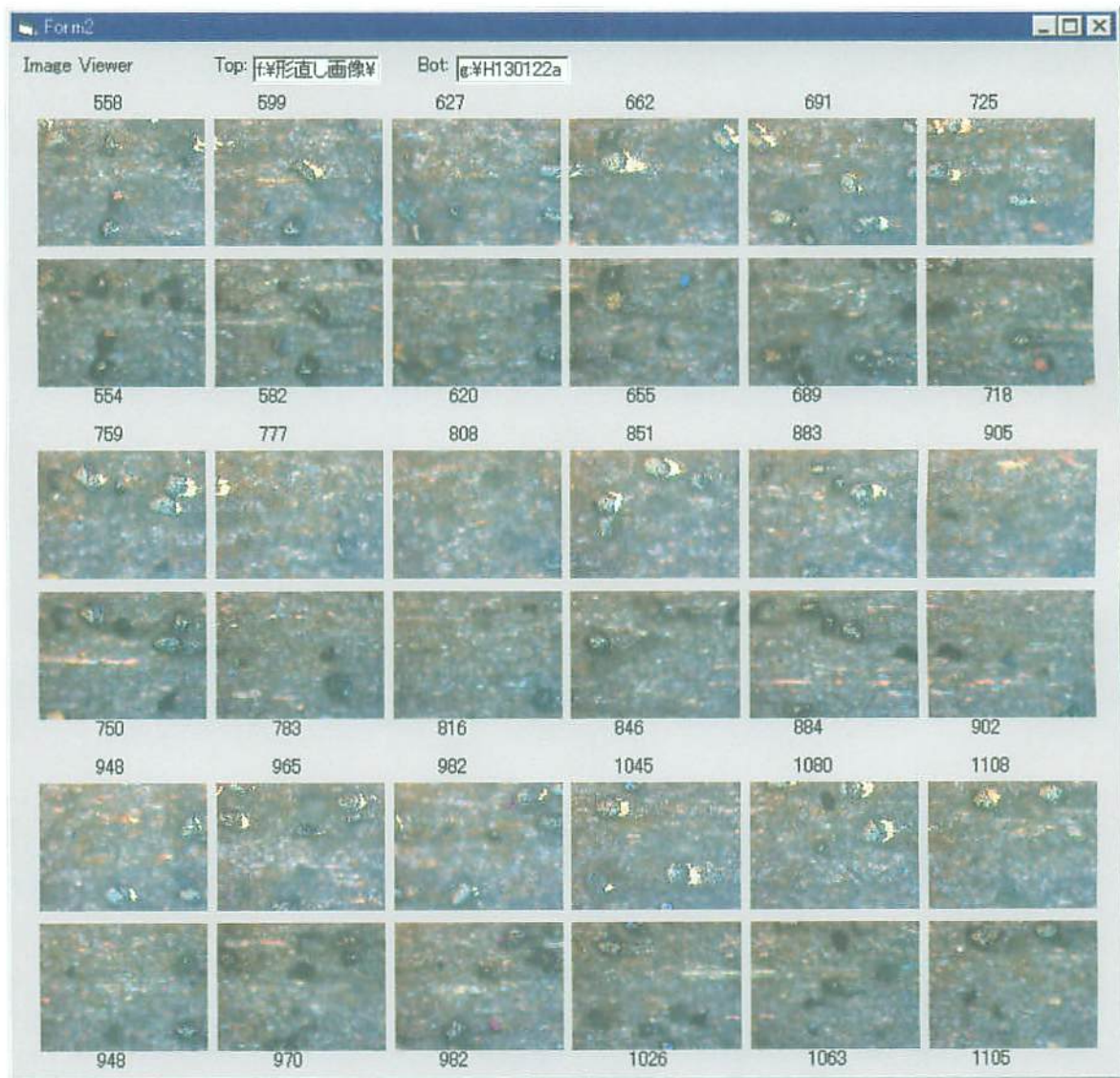


図 6.17. ビューアを用いた目直し前後の砥石作業面画像の比較

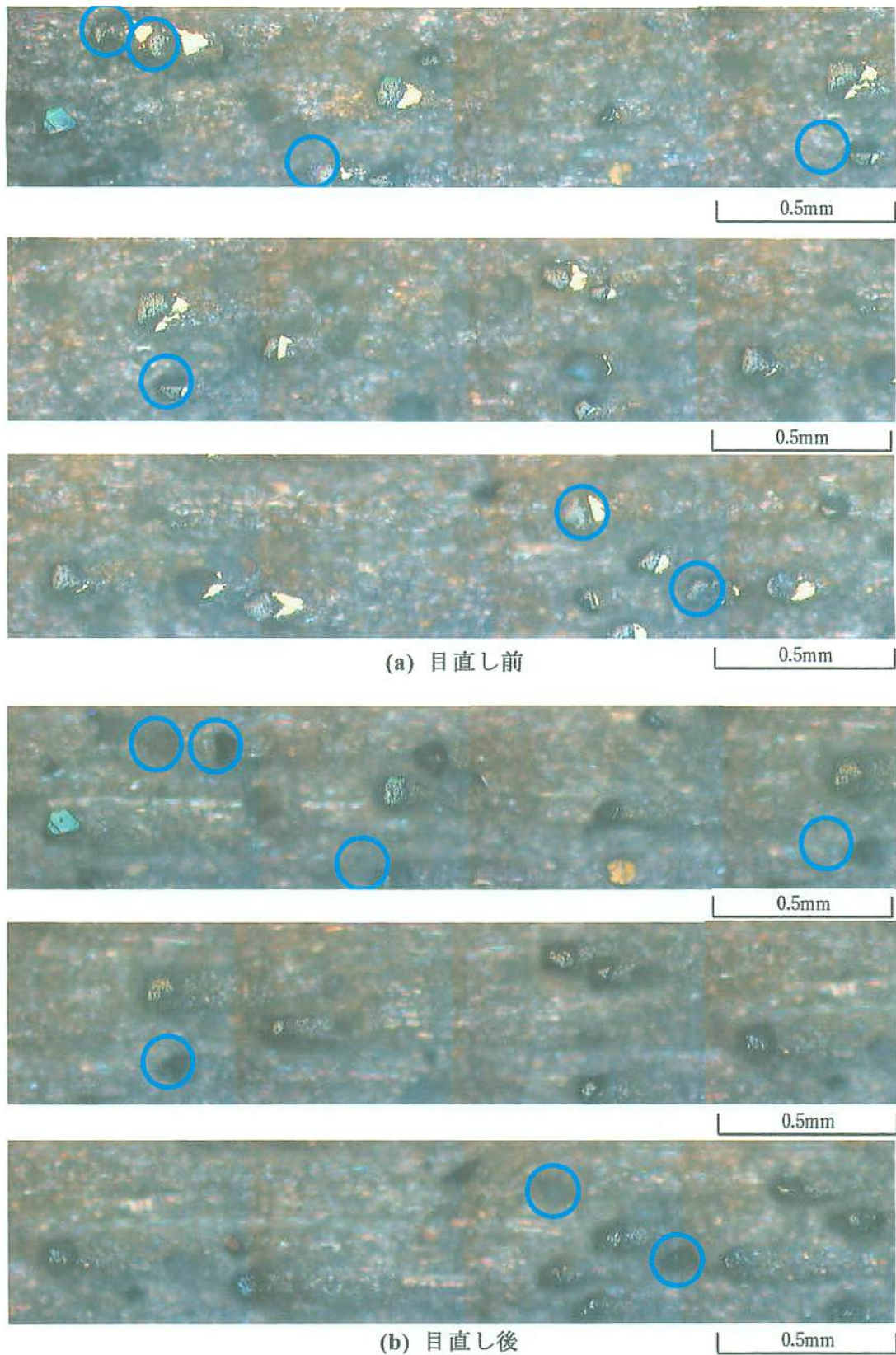
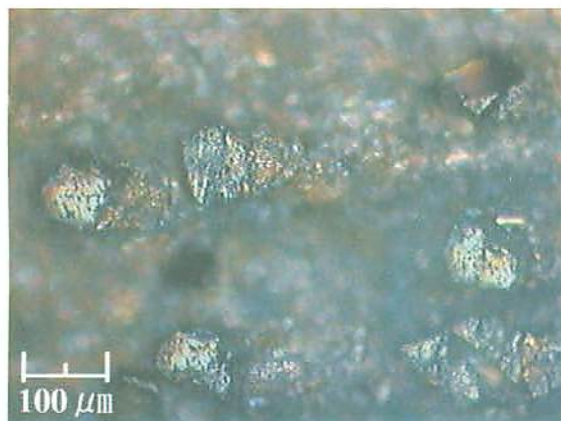


図 6.18 連続画像による目直し前後の砥石作業面変化の追跡

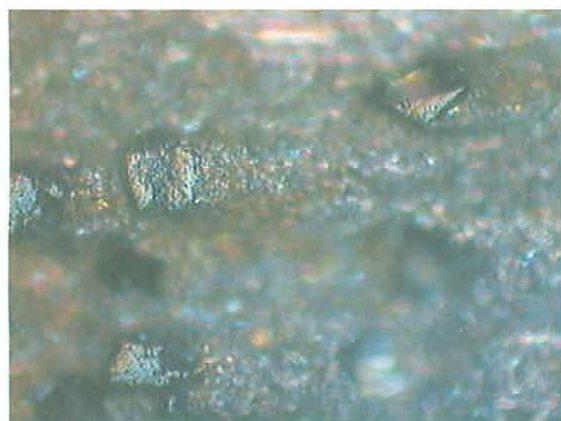
図 6.19 は、今回の実験を目直し前の形直し過程を含めて、同じ砥粒切れ刃を例として、その変化を示したものである。図 6.19 (a) から (b) にかけて、形直し時のツルアとの接触によって切れ刃後縁にボンドテールが生じ、砥粒の割れが発生している。一方、図 6.19 (c), (d) の目直し過程では、発生していたボンドテールが消え、割れた右下の砥粒は除去され、形直し時には残っていた中央前方の砥粒が脱落している。



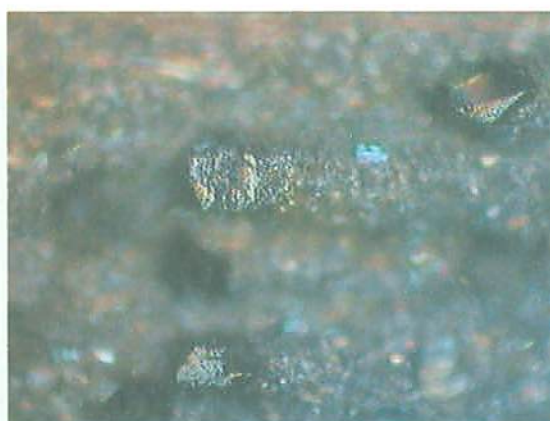
(a) 形直し前



(b) 形直し後



(c) 目直し途中



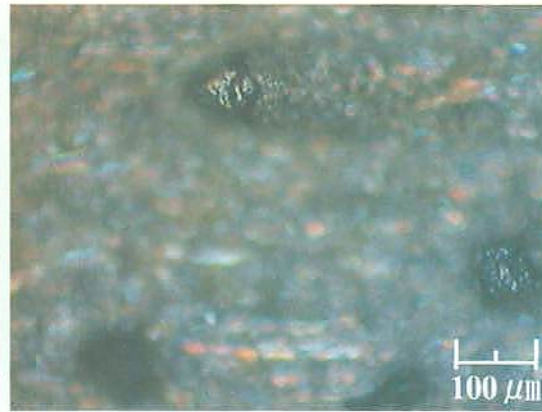
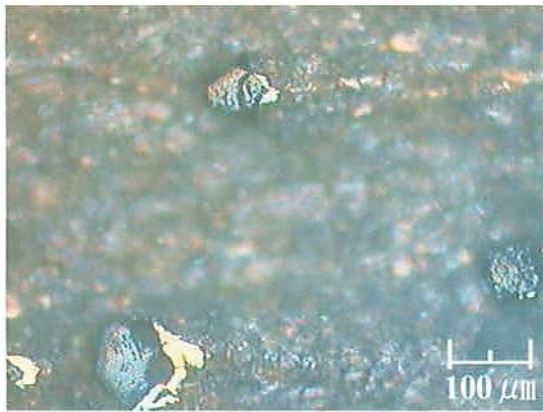
(d) 目直し後

図 6.19 形直しから目直し過程への砥石作業面の変化

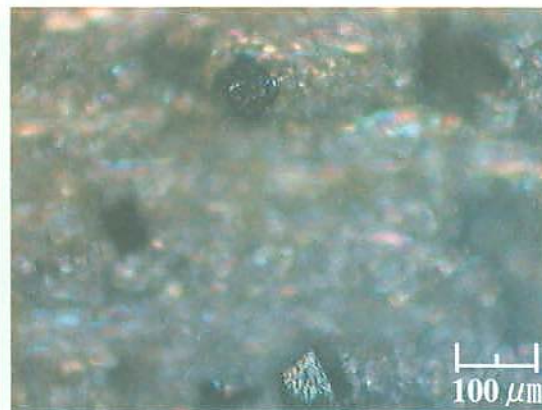
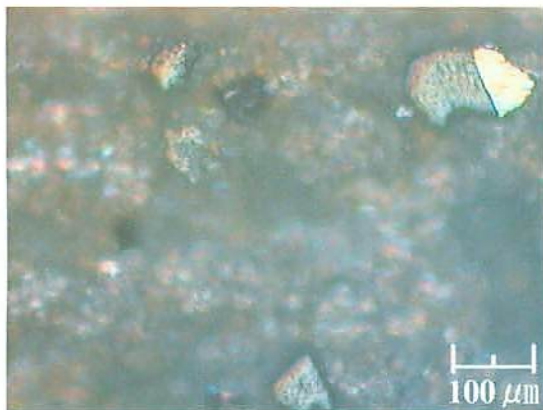
図 6.20 は、こうした目直し前後での砥粒の脱落の例を示したものである。目直し過程においては、図のような大きな切れ刃逃げ面をもつ砥粒の脱落が多数観察され、特に、図 6.20(c)に示すような、後縁に大きなボンドテールをもつ砥粒の脱落が目立った。

(目直し前)

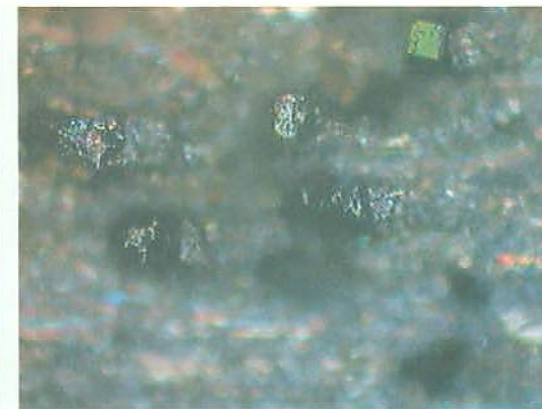
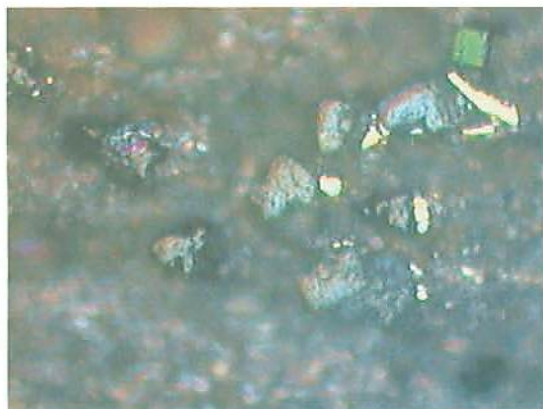
(目直し後)



(a) 砥粒の脱落例 (1)



(b) 砥粒の脱落例 (2)



(c) 砥粒の脱落例 (3)

図 6.20 目直し過程での砥粒の脱落

6.4.5 切れ刃ヒストグラムによる目直し過程の変化の追跡

こうした目直し過程における砥石作業面の変化を、統計的に把握するために、切れ刃の大きさのヒストグラムを作成して変化を追跡してみた。図 6.21 は、目直しの前後について変化を見たものである。図 6.21 (a) は、切れ刃面積を $0 \sim 3000 \mu\text{m}^2$ の間で 20 区分して度数を示している。切れ刃面積の分布は指数関数的で小さな切れ刃もかなり多く、目直し後に大きな切れ刃が減少していることがわかる。また、図中に縦線で示した平均切れ刃面積 \bar{A}_c の位置も大きく変化しており、目直しの進行とともに大きな切れ刃が脱落したことをうかがわせる。図 6.21 (b) は、平均的な大きさの切れ刃の変化を調べるために、切れ刃を円形と仮定して直径に換算した切れ刃長さ L_c で度数分布を見たものである。 L_c で見ると、平均以上の大きな切れ刃が脱落している様子がよくわかる。

表 6.2 は、こうした目直し前後の状態を算出した統計量の変化で示したものである。今回の実験では、切れ刃個数 C_n は目直しによって 1957 個から 1055 個まで約 900 個減少しており、これに伴い切れ刃面積率 η も 0.54 から 0.20 まで低下している。また、切れ刃面積や切れ刃長さの平均値は、 $\bar{A}_c = 592$ から $288 \mu\text{m}^2$ 、 $L_c = 31.0 \mu\text{m}$ も $21.6 \mu\text{m}$ に、前述のように大きく変化している。

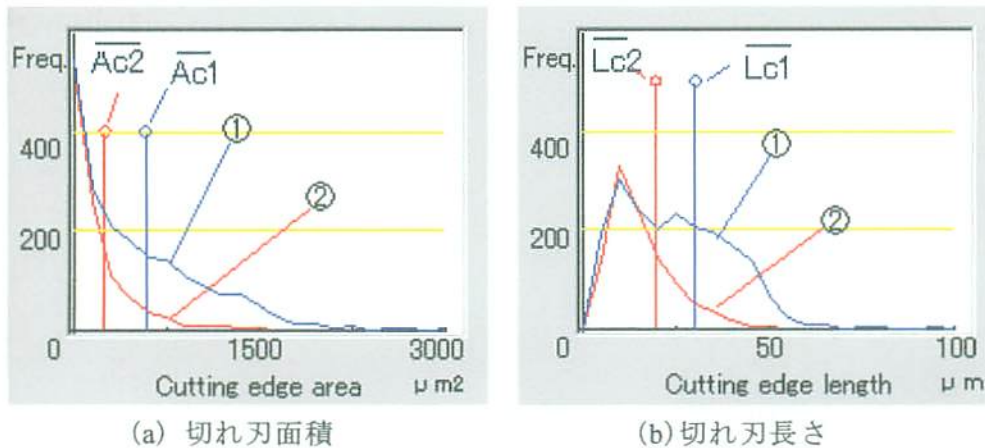


図 6.19 目直し前後の切れ刃ヒストグラムの変化 [① 目直し前, ② 目直し後]

表 6.2 目直し前後の切れ刃状態の変化

	(目直し前)	(目直し後)
切れ刃個数 C_n	1957	1055
切れ刃面積率 η %	0.54	0.20
平均切れ刃面積 $\bar{A}_c \mu\text{m}^2$	592	288
平均切れ刃長さ $L_c \mu\text{m}$	31.0	21.6

6.5 結 言

本章では、4章で示した自動砥石作業面画像処理システムの大量データ解析に、切れ刃マップ等の機能を追加して、砥石作業面変化の追跡が効率的に実施できるように改良を行った。本システムで実現した機能は、(a)砥石作業面画像ビューア、(b)切れ刃リスト、(c)切れ刃大きさヒストグラム、(d)切れ刃マップなどで、各機能では切れ刃リストを活用して、変化した切れ刃だけを自動的に抽出して追跡できるようにも改良した。

そして、これらの機能を追加したシステムを、実際の粗粒ダイヤモンド砥石の形直し過程における切れ刃変化の追跡に適用して、その有用性を検討した。実験では、ダイヤモンドブロックツールを使って、総設定切込み量 60 μm まで形直し作業を行い、砥石作業面全周に存在する約 3000 個の砥粒切れ刃の変化を追跡・検討した。また同様に、目直し時の切れ刃の挙動についても調べ、目直しによって砥石全周約 2000 個の切れ刃のうち約 900 個が脱落し、なかでも比較的大きな砥粒切れ刃が脱落しやすい傾向が確認できた。

本実験の範囲では、形直し・目直し過程で変化する切れ刃について、以下のような知見を得た。

- (1) 直径 200mm 砥石外周に存在する約 3000 個の砥粒切れ刃のうち、形直し作業で変化した切れ刃は 1000 個あまりで、全体の 3 割以上に変化が現れた。
- (2) 変化した切れ刃のうち、大きな欠けや割れあるいは砥粒自体の脱落等が発生したものは 30 個程度で、確率的には全体の 1% とかなり小さかった。
- (3) 変化した切れ刃のほとんどは、押し潰れと思われる切れ刃逃げ面の表面変化によるもので、砥粒自体は砥石作業面上に残っており、切れ刃として再生する可能性も高い。
- (4) 全体として、本実験のような 1 μm 程度の微小な切込みの形直しでは、設定切込み量がかかなり大きくなっても、砥粒自体には大きな変化がなく、砥石作業面全体の状態変化は比較的小さいと言える。
- (5) これに対し、目直し過程では、形直し後の約 2000 個の切れ刃のうち、約 900 個が脱落し、急激な切れ刃の減少が起こった。
- (6) これによって、目直し過程では、平均切れ刃個数および平均切れ刃面積率等の数値も大きく低下し、砥石作業面上状態が大きく変化することが確かめられた。

参考文献

- 1) 例えば, 安井平司, 津和秀夫: 砥石作業面性状の定量化に関する研究 (第1報), 精密機械, 40, 8 (1974) 639.
- 2) 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スの延性モード高平滑研削 (第1報), 精密工学会誌, 63, 9 (1997) 1270.
- 3) 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.
- 4) 川下智幸, 安井平司, 開 豊, 久留須 誠, 細川 晃, 坂田 正登: 粗粒ダイヤモンド砥石の形直し過程における切れ刃の挙動, 砥粒加工学会誌, 44, 11 (2000) 498.

第7章 総括

研削砥石はその外縁上に点在する多数の砥粒を切れ刃とするため、実際の研削に関与する部分の状態が一定でなく、その状態を正確に把握することが難しい。実際、粗粒砥石の場合でも、砥粒の数は数万個におよび、各々の配置も平面的・立体的なばらつきがあって、個々の切れ刃の形状はさらに不揃いになる。また、各砥石粒を固定するボンド部分も、原理的に研削抵抗によって脱落を生じる機構となっており、その分布状態はさらに変化しやすい。そして研削作業においては、こうした砥石作業面状況の変化に対応して、仕上面状態が大きく影響を受ける。したがって、研削現象を解明し、その成否を正確に知るためには、砥石作業面性状を的確に把握する必要があるが、砥石作業面を精密に測定して、実際の砥粒切れ刃の変化等を詳細に追跡した研究は意外に少ない。特に、ダイヤモンドなどの超砥粒砥石を用いた高平滑研削においては、要求される仕上げ面の高精度化にも関わらず、近年でも正確な砥石作業面状態把握を主眼とした研究はほとんど見当たらないのが現状である。

こうした中で、本研究では光学顕微鏡を用いた砥石作業面観察システムを構築して、撮影位置を決定するサーボモータの制御やCCDカメラからの画像入力あるいは高速な画像処理を実現するためのソフトウェア作成など、実用的な砥石作業面観察・評価システムの開発を行った。具体的には、測定や画像処理を実行するコンピュータをマルチタスク型のWindows PCに一元化して、位置決めから画像撮影そして切れ刃抽出までの処理を完全に自動化・高速化して、大量の画像撮影による砥石作業面観察を可能にした。また、従来の輝度や色彩による画像解析に加え、切れ刃の輪郭を利用した新しい画像処理アルゴリズムを開発して、切れ刃とボンド部分の色調が似ていて処理が困難だったメタルボンドダイヤモンド砥石においても、的確で迅速な切れ刃の自動抽出を可能とした。これによって、大幅な処理時間の短縮と省力化を実現して、大量の画像を用いた高精度な砥石作業面解析・評価システムを構築した。

本システムは、従来困難とされていた砥石作業面全体についての詳細な観察を行うことができ、また自動的に切れ刃の抽出処理が可能である。今後さらなるCPUの高速化、メモリ容量の増加などによって、さらなる実行時間の短縮も可能である。加えて、作業面を評価パラメータのみでなく、切れ刃マップなどによって視覚的に観察できるのもこのシステムの特徴である。これによって、砥石作業面全周上を約900枚の画像の自動撮影による評価を実現して、形直し・目直し過程などにおける切れ刃変化の追跡など、極めて詳細な砥石作業面状態の変化追跡が可能となった。

本論文では、この自動砥石作業面画像処理システムの開発に関して、以下のような内容について検討し、それぞれの知見を得た。

- (1) 第2章では、粒度#140および#320の粗粒メタルボンドダイヤモンド砥石を用い、電子磁性材料であるアルチックファインセラミック ($\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiC}$) を工作物として、延性モード研削および超平滑研削を実施し、高平滑研削の可能性について検討した。結果として、これらの研削では、テーブル送り速度を極めて遅くすることにより砥粒切込み量を少なくすることで、工作物表面の軟化を伴う延性モード研削が実現できることを示し、クラックの無い極めて良好な仕上面が得られることを示した。また、超平滑研削法を用いた研削実験でも、ナノオーダーの極めて平滑な仕上面が得られることを示した。そして、双方の場合とも、砥粒先端の切れ刃状態が、研削仕上面の良否に大きく影響を与える現象があることについて確認した。
- (2) 第3章では、2章で重要となった、砥石作業面状態の影響について検討した。実験では、炭化けい素(HPSC)と窒化けい素(HIPSN)を用い、砥石作業面状態を示す評価パラメータである切れ刃面積率を変えながら延性モード研削を行った結果について示した。そして、延性モード研削においては、切れ刃面積率がある程度大きく、砥石作業面の砥粒の高さがそろっていることが、良好な仕上面を得るための重要な要因であることをつきとめた。しかし、切れ刃面積率等の変化で示される砥石作業面の状態が、仕上面粗さに与える定量的な影響については、まだ解明するには至らなかった。
- (3) 第4章では、多石ダイヤモンドブロックツルアを用いて、粗粒メタルボンドダイヤモンド砥石の形直し実験を行い、形直し過程における砥石の形状や砥石作業面性状の変化を調べ、形直し過程における切れ刃挙動について追跡した。そして、1) ブロックツルアによる粗粒ダイヤモンド砥石の形直し過程における切れ刃の挙動は、一定の形直し量で変化し、2段階に分類されること、2) 前段階では、形直しによって砥粒逃げ面が摩耗し増大し、砥石最外周面砥粒切れ刃密度は密になり、このため形直しにより仕上げ面粗さは向上すること、3) 後の段階では、砥粒が破壊し、前段階までで増加した砥粒逃げ面が減少するため、仕上げ面粗さは向上しなくなること、4) 前段階での設定形直し量に対する実形直し量の割合は5%程度であり、後段階は、その割合が前段階より増加すること、5) 形直し過程において砥粒の脱落はほとんど観察されないことなど、基礎的な知見を得た。
- (4) 第5章では、本論の中心テーマとなっている光学顕微鏡と CCD カメラを利用した自動砥石作業面画像システムの開発について述べた。ここでは、マルチタスク対応の Windows-OS 搭載コンピュータを中心にして、より連携的で統合的なかたちでシステムを構築し、砥石回転制御や切れ刃認識のためのソフトウェア等の全面的な再構築を行って、従来に比べ大幅な処理時間の短縮を実現して、大量画像による高精度な砥石作業面評価システムを構築して、詳細な砥石作業面の観察・評価が可能となったことを示した。また、砥石作業面を評価するための平均連続切れ刃間隔 a や、

平均切れ刃面積率 η などを正確に求めるためには、画像数 200 枚程度の撮影が必要になることなどを検証した。

- (5) 第 6 章では、上記システムについて、切れ刃リスト・切れ刃マップ作成などの機能を追加拡張して、実際の形直し・目直し時の砥石作業面観察実験へと適用した..そして、実際の形直し・目直し作業における砥石作業面変化の追跡実験から、本実験の範囲では、形直し・目直し過程で変化する切れ刃について、以下のような知見を得た。まず、形直しでは、(1) 直径 200mm 砥石外周に存在する約 3000 個の砥粒切れ刃のうち、形直し作業で変化した切れ刃は 1000 個あまりで、全体の 3 割以上に変化が現れ、変化した切れ刃のうち、大きな欠けや割れあるいは砥粒自体の脱落等が発生したものは 30 個程度で、確率的には全体の 1%とかなり小さく、変化した切れ刃のほとんどは、押し潰れと思われる切れ刃逃げ面の表面変化によるもので、砥粒自体は砥石作業面上に残っており、切れ刃として再生する可能性も高いこと。(2) 全体として、4 章での実験結果と同様に、1 μ m 程度の微小な切込みの形直しでは、設定切込み量がかなり大きくなっても、砥粒自体には大きな変化がなく、砥石作業面全体の状態変化は比較的小さいこと。などをつきとめた。これに対し目直し過程では、形直し後の約 2000 個の切れ刃のうち、約 900 個が脱落し、平均切れ刃個数および平均切れ刃面積率等の数値も大きく変化し、砥石作業面上状態が大きく変化していることが確かめられた。

謝 辞

終わりに、本研究の計画、実施、結果の検討を含め、研究遂行の全般にわたって、終始、先見のかつ的確な見通しのもと、熱意溢れるご指導を頂きました 熊本大学 安井 平司 教授に心から感謝の意を表します。また、論文のまとめにあたり、有益なご教示やご討論を頂いた 同大学 渡邊純二教授 および 小田 勇 教授 に厚く御礼を申し上げます。

研究の過程では、同大学 坂本重彦講師、坂田正登助手、黒田龍一技官 および 古庄周市氏に、具体的な研究手法等を含め、多方面にわたる様々なご助言とご指導を頂きました。また、佐世保工業高等専門学校 川下智幸助教授には、数々の研究上のご支援と貴重なご助言を頂きました。ここに深く感謝の意を表します。

さらに、実際の実験等の実施にあたっては、内山真一郎君、林 幸児君、鶴崎美智子君、谷口 龍君および平河哲彦君らの全面的な協力と支援を得ました。暖かい雰囲気、研究遂行上の便宜と励ましを与え続けてくれた他の知能機械製作学分野の諸君共々、心から感謝の意を表したいと思います。

最後に、本研究の推進にあたっては、勤務先である八代工業高等専門学校 佐藤泰生校長はじめ 同校の関係各位 から、数多くのご支援とご配慮を頂きました。この場を借りて心からの感謝を表します。