

## 延性モード加工

Ductile Mode Machining

谷 泰 弘\*

Yasuhiro TANI

硬脆材料の高精度鏡面加工技術の必要性が高まるにつれて、脆性破壊ではなくせん断破壊により材料の一部を削り取る延性モード加工が注目されるようになってきている。この加工技術は工具軌跡の転写性を高めるのみならず、クラックのない高品位の仕上げ面を与えることになる。本稿では硬脆材料の延性モード加工に関する最近の研究開発の動向について紹介する。

### 1. は じ め に

最近硬脆材料の『延性モード加工』が、材料の一部を削り取ることで形状創成を行う除去加工の分野で大きな話題となっている。これを受けて、平成2年2月には「議論しませんか、ナノメータグライディング」という講習会がこの分野の専門学会である精密工学会により企画され、また精密工学会誌56巻5号（平成2年5月）では「ぜい性材料の延性モード研削加工技術」と題する特集号が発刊されている。その特集号の執筆者は7件のうち半数を越える4件が外国人という国際的なものであり、この研究分野が全世界的に現在最も注目されていることがよく伺える。

金属などの延性材料に対しては、クラックを加工物に残さないで材料の一部を削り取る延性モード加工が当然と考えられている。そして、その最も理想的な状態で発生する流れ型の切り屑が流出する状態において、工具摩耗が少なくまた仕上げ面が最もよくなることが知られている。一方、ガラスやセラミックス等の脆性材料は、加工物表面を破碎しながら加工を行う脆性モード状態の加工が当然と考えられてきた。しかし、こうした脆性材料に対しても、研磨加工のように工具に非常に微小な切込みを与えると、延性モード状態の加工が実現できることは早くから知られていた<sup>1)</sup>。

電子産業や光学産業等においては、種々の用途に対応した機能性材料の開発が活発に行われている。その結果新しく開発された電子材料や光学材料の大部分が、脆性材料である。そして、これらの材料に形状精度が高く仕上げ面が鏡面状態の加工が要求されるようになるにつれて、切削加工や研削加工のように一定の切込みを与えて加工を行う制御性に優れた運動転写方式の加工で、脆性材料の延性モード加工を実現することが求められるようになった。この社会的要求が、それまで軟質延性材料の単刃切削のみに目を向けられていた超精密加工に新しい

\*東京大学生産技術研究所 付属先端素材開発研究センター

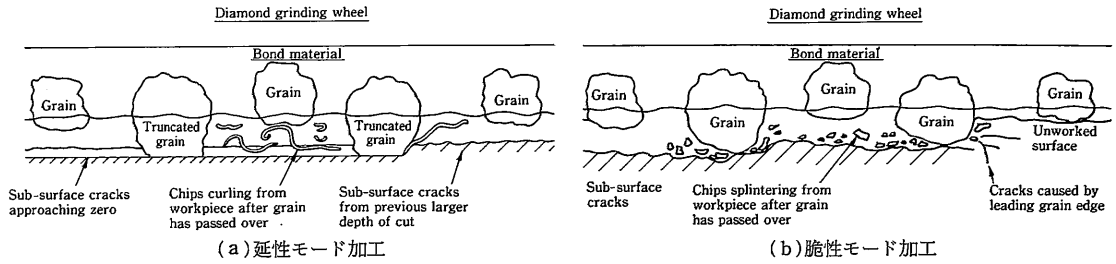
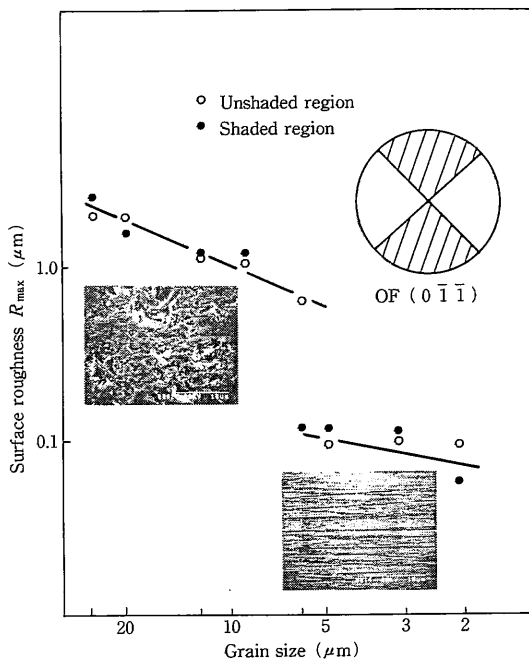
研究分野を切り開くことになったのである。すなわち、運動転写方式の加工では工作機械の運動精度が直接加工精度に影響するため、加工精度の高い加工を行うためには運動精度の高い工作機械を使用することが不可欠となる。しかも、脆性材料を延性モード状態で加工するためには、微小の切込み制御を行うことが必要となる。したがって、高精度の工作機械を用いて微小切込みを実現する超精密加工が、延性モード加工の実現のための基礎技術となったのである。

本稿では、現在話題となっている脆性材料の延性モード加工に関する最近の研究開発の動向について紹介する。

### 2. 脆性モード加工から延性モード加工への遷移点

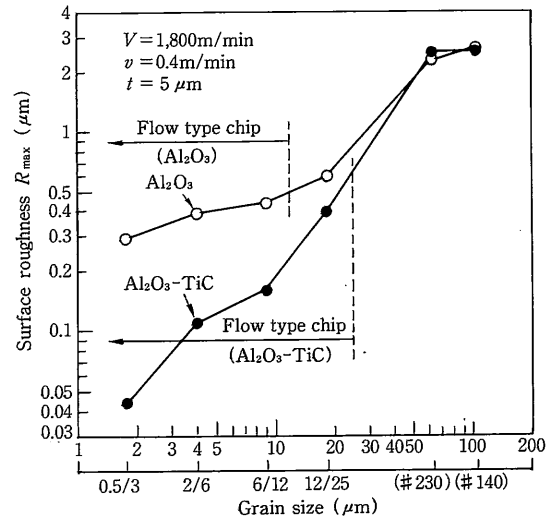
図1<sup>2)</sup>に示されるように、延性モード加工と脆性モード加工では、切り屑の形態や仕上げ面の状態が異なる。すなわち、延性モード加工では切り屑がせん断変形を受けて流れ型の切り屑が発生し、方向性のある仕上げ面が得られる。これに対して、脆性モード加工では切り屑はほとんど塑性変形を受けず、加工物に亀裂を生じてその一部がはく離するため、種々の形状の亀裂型切り屑が発生し、方向性のない仕上げ面となる。そのため、延性モード加工で作られた仕上げ面の粗さは、脆性モード加工で作られた仕上げ面の粗さに比較してはるかによい値となる。延性材料では大きな切込みや送りを与えて重加工を行っても、せん断破壊が生じる延性モード加工状態となり、脆性破壊はめったに生じることがない。一方、脆性材料では通常は脆性破壊で加工が進展するが、上述のように非常に小さな切込みを与えると延性モード状態の加工に移行する。

ここで問題となるのは、1切れ刃当たりの切込み量である。旋削加工のような単刃切削では、切れ刃切込み量は工具切込み量、加工物1回転当たりの工具送り量、工具形状の関数となる。一般に、工具切込み量や工具送り量が小さいほど、また工具先端の曲率半径が大きいほど、

図1 延性モード加工と脆性モード加工<sup>2)</sup>図2 GaAsウエハでの砥石粒度による仕上げ面粗さの変化<sup>4)</sup>

切れ刃切込み量は小さくなる。そのため、超精密切削でよい仕上げ面を得るためには、小さい工具切込み量と非常にゆっくりとした工具送り量、曲率半径の大きいRバイトあるいは曲率半径が $\infty$ と考えられる先端が平らな平バイトを用いて加工が行われる。一方、研削加工のような多刃の工具を用いた加工では、切れ刃切込み量は工具切込み量、連続切れ刃間隔、工具1回転当たりの加工物送り量の関数となる。したがって、他の加工条件が同一でも、砥石粒度を小さくして砥粒密度を高くした砥石を使用し、連続切れ刃間隔を小さくすれば、切れ刃切込み量を小さくすることができる<sup>3)</sup>。

図2は、単結晶GaAsウエハをレジンボンドダイヤモンドホイールの砥石粒度を変えてインフィード研削した結果である<sup>4)</sup>。砥石粒度が $6\mu\text{m}$ よりも大きい場合には仕上げ面粗さが悪い脆性破壊状態を示している。砥石粒度が $6\mu\text{m}$ の場合には脆性破壊状態とせん断状態が混在している。砥石粒度が $5\mu\text{m}$ 以下の範囲では仕上げ面粗さ

図3 セラミックスでの砥石粒度による仕上げ面粗さの変化<sup>3)</sup>

のよい延性モード加工状態となっている。このように、単結晶GaAsや単結晶InP<sup>5)</sup>のような材料異方性の強い脆性材料では砥石粒度と仕上げ面粗さとの間に不連続な関係を示す。しかし、単結晶Si<sup>4)</sup>やセラミックス<sup>3),6)</sup>の場合にはより連続的な変化を示し、脆性破壊とせん断破壊が混在した状態で脆性モード状態から延性モード状態にゆるやかに移行する。

図3は、砥石粒度の異なるレジンボンドダイヤモンドホイールを用いて、99.7% $\text{Al}_2\text{O}_3$ セラミックスおよび $\text{Al}_2\text{O}_3$ -30%TiCセラミックスを平面プランジ研削した結果である<sup>3),6)</sup>。この場合にも粒度の細かい砥石を使用するにしがたい、脆性モード状態から延性モード状態に移行している。しかし、流れ型切り屑の発生限界と仕上げ面粗さの不連続的な変化点は、必ずしも一致しているとは言えない。

### 3. 単粒切削による遷移点の検出

脆性モード加工から延性モード加工に移移する切込み量を明確にすることは、脆性材料の鏡面加工を行う加工条件を知る上で重要である。これをランダムな形状と位

置を有する多数の砥粒切れ刃が散在する研削のような加工で明確にすることは困難である。そこで、形状が明確にわかっている単一切れ刃を用いて、この遷移点の切込み深さを計測することが行われている。具体的には切込み量を徐々に変化させながら、延性モード状態から脆性モード状態に遷移する点あるいは脆性モード状態から延性モード状態に遷移する点を検出し、残された溝形状からその切込み量を測定することが行われている。

図4には、膜のはく離試験のように単一切れ刃に作用する力を徐々に増加させながらゆっくり横方向に移動させ加工を行った時に、残された加工溝の深さをイメージ的に示したものである。押し付け力が非常に小さい時には、加工溝の痕跡が残らない弾性変形領域がまず存在する。押し付け力がもう少し大きくなり材料の降伏強度を越えると、両側に盛り上がりのある溝形成が行われ切り屑の発生しない塑性変形領域になる。さらに押し付け力が増大すると、切れ刃の移動方向に垂直に溝の底面に微小なクラックが現われるマイクロクラック加工状態<sup>9)</sup>になり、ついには亀裂型切り屑の生じる脆性モード加工状態に移行する。マイクロクラック加工状態ではせん断型切り屑が生じている。延性/脆性遷移点の工具/加工物干渉量(切込み深さ) $d_c$ <sup>9)</sup>としては、転写性の立場からマイクロクラック加工状態と脆性モード加工状態の境界の切込み深さを当てる考え方も存在するが、クラックフリーの仕上げ面状態を得ることを目的とすれば、延性モード加工状態とマイクロクラック加工状態の境界の切込み深さを当てるべきであろう。

$d_c$ 値を求める実験は、図4のように押し付け荷重を変化させる方法<sup>9)</sup>のほかに、正面切削でピエゾアクチュエータにより設定切込み深さを強制的に変化させる方式<sup>9),10)</sup>や切れ刃を円板の外周に取り付けその円板を回転させて円弧状に加工する円弧切削方式<sup>11),12)</sup>、加工物を傾斜させることで切込み深さを变化させる傾斜加工方式<sup>12),13)</sup>などの設定切込み深さを变化させる方法で行われている。このように種々の方法で加工を行った後、図5<sup>13)</sup>のように加工により作られた溝を顕微鏡で観察し、脆性/延性モードの遷移点を確認し、その近傍の溝の断面形状を触針式粗さ計で測定し、 $d_c$ 値が求められている<sup>9),13)</sup>。

しかし、現実には遷移点の位置における溝深さを正確に測定することが困難であり、幅の狭い溝では触針の曲率半径のために誤差が生じるため、遷移点における切込み量の同定は困難である。そこで、以下のようにしてその切削溝深さを測定している<sup>9)</sup>のが現状である。

- ①遷移点での切削溝の幅を、顕微鏡写真から測定する。
- ②触針式粗さ計により遷移点近傍の切削溝形状を測定する。あまりに狭い切削溝では、粗さ計の触針半径のために誤差が生じるため、適当に広い切削溝の形状を測

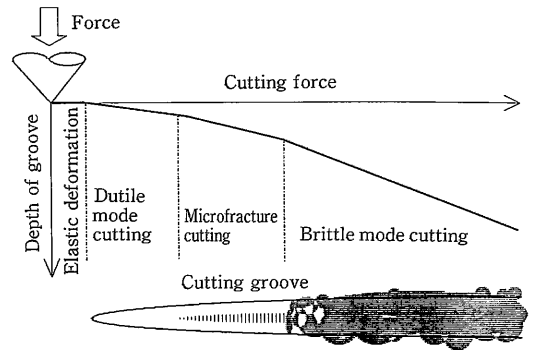
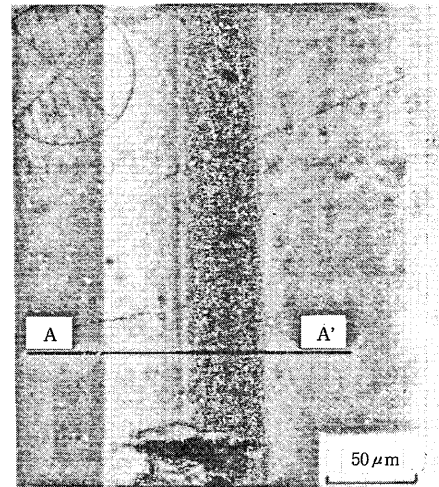
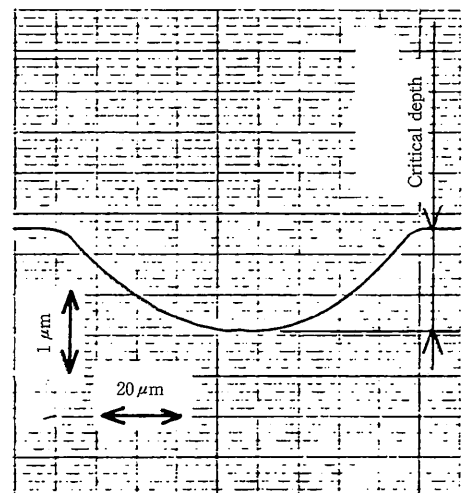


図4 押し付け力と加工溝深さの関係

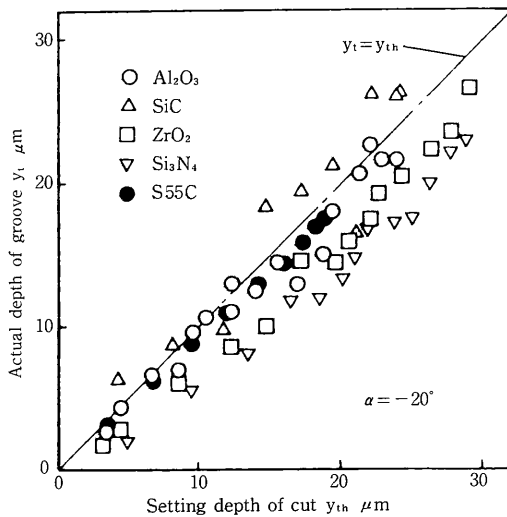


(a) 遷移点近傍の加工溝



(b) A A' 部の断面曲線

図5 脆性/延性遷移点の観察<sup>13)</sup>

図6 切削溝深さと設定切込み深さの関係<sup>11)</sup>

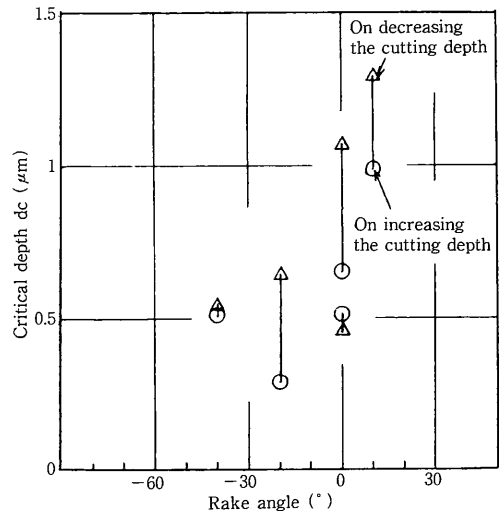
定する。

③②で測定された切削溝形状から、切削溝深さ／切削溝幅で定義される形状比を計算する。

④①で測定された遷移点の切削溝幅に、③で求めた形状比を乗じて、遷移点の切削溝深さを算出する。

こうして計測された切削溝深さは、実切込み深さとは異なり、したがって当然設定切込み深さとも異なる。すなわち、ある切込み深さが設定されたとしても、工作機械の運動誤差、制御誤差、剛性および工具、工作物等の剛性のために、実切込み深さは異なったものとなる。また、加工点の弾性のために加工後に残された切削溝深さは実切込み深さとも異なるものになる。図6は、頂角90°、すくい角-20°、先端半径50μmの焼結ダイヤモンド工具を50m/minの速度で回転させながら種々の材料を円弧切削した際の、切削溝深さ $y_t$ と設定切込み深さ $y_{th}$ との関係を示したものである<sup>11)</sup>。大きな切込み量では材料により破碎状態が異なるためばらつきが大きくなっているが、全般的に切削溝深さは設定切込み深さより小さくなる傾向がある。 $d_c$ 値を実切込み深さの値で評価したいところであるが、上述のように困難であるため、現実には切削溝深さにより評価することになる。一般に切削溝深さは実切込み深さよりも小さくなるため、切削溝深さで $d_c$ 値を捕らえておけば、それ以下の切込み深さでは延性モード加工が実現できる。

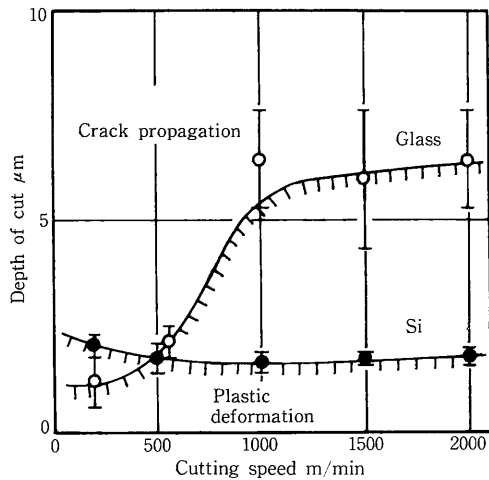
では、この $d_c$ 値が切削条件によりどのように変化するだろうか。最も大きな効果を与えられ思考えられるのが、切れ刃形状と切れ刃のすくい角である<sup>9)</sup>。LLNLのグループが単結晶シリコンをダイヤモンド切削した結果では、工具すくい角が負になるにつれて $d_c$ 値が大きくなっている<sup>14)</sup>。この傾向はガラスについて求められている結

図7 ガラスにおける切れ刃すくい角に対する $d_c$ 値の変化<sup>10)</sup>

果<sup>9),10)</sup>と全く正反対であり、ガラスの場合には図7<sup>10)</sup>に示されるようにすくい角とともに $d_c$ 値が減少している。加工条件の比較が正確にできないため示された結果の比較は困難であるが、この全く正反対の傾向は単に加工物材料の相違とは言い難い。また、シリコンの $d_c$ 値が80~260nm<sup>14)</sup>であるのに対して、光学ガラスF2の $d_c$ 値が0.3~1.3μm<sup>10)</sup>という1桁近く異なる値となっている。この相違も単に加工物材料の相違が原因とは言い難い。これらの大きな違いは、 $d_c$ 値に対する定義、計測方法や評価方法が確立しておらず、現状では各研究者により異なるものが使用されているためと考えられる。

ダイヤモンド圧子を用いた実験における、加工速度によるガラスとシリコンの $d_c$ 値の変化を示しているのが、図8<sup>15)</sup>である。200~2000m/minの切削速度範囲において、シリコンは $d_c$ 値の速度依存性を示していないが、ガラスは500m/minの近傍で $d_c$ 値が急激に増加している。これは破壊じん性値や降伏応力の温度特性によるものと考えられている<sup>15)</sup>。10~200m/minの切削領域の速度範囲においては、ガラスは小さい切削速度ほど $d_c$ 値が大きくなることが報告されている<sup>9)</sup>。この傾向は図8のシリコンの低切削速度領域での傾向と一致している。

ダイヤモンド工具の切れ味は、硬脆材料の単粒切削試験において、 $d_c$ 値に大きく影響を及ぼす。すなわち、みかけは全く同一の工具を用いて同一の加工条件で切削を行っても、 $d_c$ 値が大きくばらつく。当然切れ刃が摩耗して切れ味が低下すれば、 $d_c$ 値は減少することになる<sup>9)</sup>。したがって、上記のデータがどのような状態の切れ刃を使用して実験が行われ得られた結果であるかが重要となる。切れ味の評価技術に関しては、精密工学会に1986年2月

図8 加工速度による $d_c$ 値の変化<sup>15)</sup>

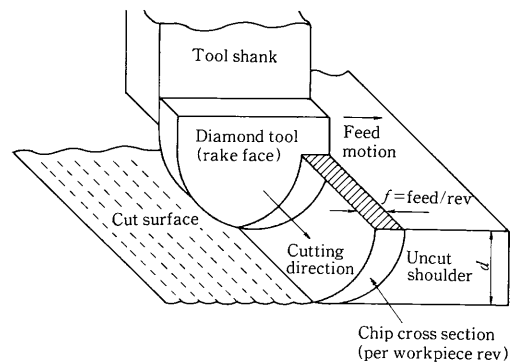
に設置された「超精密ダイヤモンド切削加工用工具刃先の評価に関する研究協力分科会」において議論が行われたが、結論を得るには至っていない。

#### 4. 単刃から多刃へ

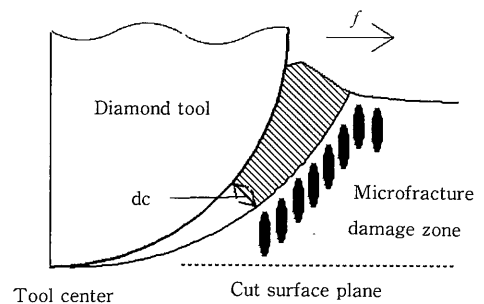
上記のような過程を経て $d_c$ 値が求まり、設定切込み深さをその $d_c$ 値内に抑えることが可能な加工機械を製作できれば、単刃切削で延性モード加工が実現できるはずである。しかし、これは切削溝が干渉しないねじ切りのような加工の場合に成立する話で、通常の切削のように切削溝が干渉する状態では、もう少し複雑になる。すなわち、図9のように次に削られるべき切削溝の側面には加工によるダメージ・歪が残留しており<sup>16)</sup>、またその上面には盛り上がりが残留している。したがって、実切込み深さは設定切込み深さとは異なるとともに、加工される材料特性も違ってくる。

図10は、パイレックスガラスのダイヤモンド切削において切込み深さに対する盛り上がり量の変化を示したものである<sup>17)</sup>。遷移点を境にして盛り上がりは増加する傾向があることが示されている。しかし、この遷移点の切込み深さは $1\mu\text{m}$ と大きいことから、マイクロクラック加工状態と脆性モード加工状態の境界を意味しているものと考えられる。似たような結果は、図11に示される種々のセラミックスに対して求められた加工溝幅に対する盛り上がり幅の比に関しても得られている<sup>12)</sup>。切削溝深さが小さくなるにつれて、この比が減少し、極小値をとった後、増加に転じている。江田らによれば、極小値をとる時点で微小塑性が発生している<sup>12)</sup>と報告されている。しかし、この点の切削溝深さも $1\sim 3\mu\text{m}$ と大きいことから、この点もマイクロクラック加工状態と脆性モード加工状態の境界を意味しているものと考えられる。

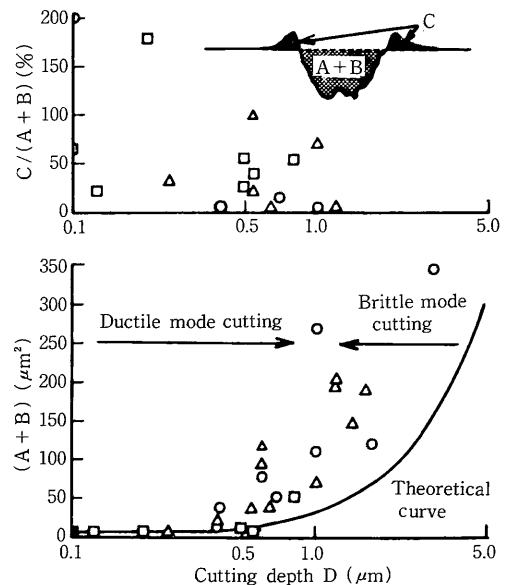
以上のように、延性モード加工領域では切込み深さが



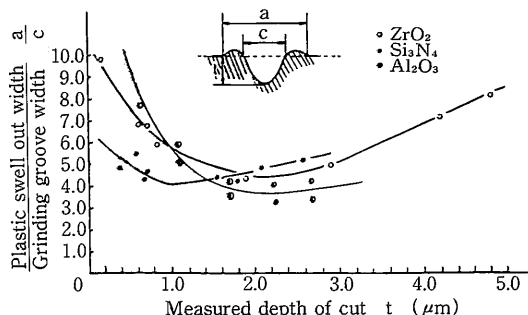
(a) 切削状態



(b) 加工域の状況

図9 二次元切削状態<sup>16)</sup>図10 切込み深さによる盛り上がり量の変化<sup>17)</sup>

小さくなるにつれて、盛り上がり量は大きくなる。したがって、切削溝が干渉する状態で連続して切削が行われれば、設定切込み深さが一定に保たれても、実切込み深

図11 切削溝幅と盛り上がり幅の比<sup>12)</sup>

さが盛り上がりのために増加することになる。その結果、試料面全域にわたって延性モード切削を実現するためには、設定切込み深さではなく、実切込み深さを制御できる方法を確立することが必要となる。著者らが提案した浮上工具方式の切削加工技術<sup>18)</sup>は、これを実現できる一方法と考えている。

さらに、研削加工のように多数の切れ刃が同時に作用しながら加工が行われる場合は、単刃工具により加工が行われる場合とは、状況は少し異なってくる。数本の溝が同時に並行して創成されるため、上述の単刃切削の場合と異なり、前の加工で作られた盛り上がりやダメージの影響が後の加工に次々と伝搬していくということなくなる。これが切削加工よりも研削加工で延性モード加工が実現しやすい理由の一つになっているものと思われる。数本の溝が同時に近接して創成されるような状態では、表面状態が圧縮応力場となり、独立した溝創成の場合に比較して亀裂の発生が抑えられると考えられる。この点を考慮して複数切れ刃の加工面創成状態を観察しようとする試み<sup>19)</sup>も行われている。もし、このことが事実であるとすれば、このことも研削加工で延性モード加工が行われやすい理由の一つとなろう。

## 5. お わ り に

本稿では、硬脆材料の延性モード加工を実現することを目的として行われている、単粒切削での延性/脆性遷移点 $d_c$ 値の検出を中心に、関連する研究開発の動向について紹介した。しかし、現実には遷移点あるいは $d_c$ 値の明確な定義付けがまだ行われていない状況にあるため、定性的な議論のみで定量的な議論を行うには至っていない。今後この遷移点の定義を明確にするとともに、その周辺技術としての工具の切れ味評価技術、切削溝深さの計測技術、実切込み量の検出技術、実切込み量の制御技術、多刃工具での干渉状態の解析技術などを確立することが必要である。上述のように、山積みされている問題は非常に多い。多くの研究者、技術者の活躍が期待される。

(1991年 8月23日受理)

## 参 考 文 献

- 1) O. Imanaka, S. Fujino, S. Mineta : NBS Spec. Publ., No. 348, (1972) 37.
- 2) P.A. McKeown, K. Carlisle, P. Shore, R.F. Read : Ultra-precision, High Stiffness CNC Grinding Machines for Ductile Mode Grinding of Brittle Material, 精密工学会誌, 56, 5 (1990) 806.
- 3) 貴志浩三・市田良夫 : 微粒CBN砥石およびダイヤモンド砥石による鏡面研削, 機械と工具, 29, 2 (1985) 17.
- 4) 西口勝規・後藤 登 : GaAsウエハの鏡面研削加工技術, 超精密加工マニュアル, (株)大河出版, (1989) 72.
- 5) 後藤 登・西口勝規・西沢秀明 : InPウエハ研削加工の基礎検討, 1990年度精密工学会秋期大会学術講演会講演論文集, (1990) 237.
- 6) 市田良夫・貴志浩三・植田友重 : セラミックスの塑性流動型研削に関する研究 (第1報) —砥石粒度と研削形態—, 昭和60年度精機学会春季大会学術講演会論文集, (1985) 815.
- 7) 宮下政和 : ぜい性材料の延性モード研削加工技術, 精密工学会誌, 56, 5 (1990) 782.
- 8) 杉田忠彰・西 誠・沢田 豊・上田完次 : セラミックスの単粒研削における脆—塑性境界の破壊力学的解析, 1990年度精密工学会秋期大会学術講演会講演論文集, (1990) 997.
- 9) 谷 泰弘 : 超精密加工技術, 生研セミナーテキスト, (1990) 32.
- 10) 山田 収・西口 隆・榊田正美・内田浩二 : ガラスの臨界切込み深さに及ぼす工具すくい角の影響, 1990年度精密工学会秋期大会学術講演会講演論文集, (1990) 751.
- 11) 岡村健二郎・水谷秀行・古久保 浩 : セラミックス材料の切削特性, 1990年度精密工学会春期大会学術講演会講演論文集, (1990) 853.
- 12) 江田 弘・鈴木克彦・久保田 譲・佐川克雄・高島茂雄 : ファインセラミックスの超精密研削加工に関する研究—微小塑性の発現—, 1990年度精密工学会春期大会学術講演会講演論文集, (1990) 953.
- 13) 森脇俊道・社本英二・井上健二 : ガラスの延性モード超音波振動切削加工の研究, 1991年度精密工学会春期大会学術講演会講演論文集, (1991) 249.
- 14) C.K. Syn, J.S. Taylor : Ductile-Brittle Transition of Cutting Mode in Diamond Turning of Single Crystal Si and Glass, ASPE/IPES Conf., (1989).
- 15) 杉田忠彰・上田完次・遠藤勝義 : 硬ぜい性材料のマイクロ切削における塑性変形型材料除去の可能性, 精密工学会誌, 52, 12 (1986) 2138.
- 16) T.A. Dow, R.O. Scattergood : Ductile/Brittle Transition and Development of Ductile Mode Grinding Technology, 精密工学会誌, 56, 5 (1990) 794.
- 17) 田所 譲・柴田順二 : ガラスと切れ刃の干渉深さの効果について, 1989年度精密工学会春期大会学術講演会講演論文集, (1989) 1123.
- 18) 榎本俊之・谷 泰弘・佐藤壽芳・上村康幸 : 浮上工具方式による超平面切削加工技術, 生産研究, 42, 6 (1990) 389.
- 19) 藤田 実・吉川昌範・戸倉 和・高野文孝 : 複数切れ

刃ダイヤモンドによるセラミックスの加工面性状,  
1990年度精密工学会春期大会学術講演会講演論文集,

(1990) 215.