

ファインセラミックス研削加工技術研究

— ま と め —

佐 川 克 雄*

第 1 章 研究目的及び概要

本研究は、高強度、耐食性、耐熱性、耐摩耗性といった優れた特性を持っているファインセラミックスを、機械部品として使用する場合の一助となることを目的として、セラミックスの研削加工について実施したものである。

セラミックスを機械部品として使用する場合、成形焼成工程だけでは要求される面粗さ、寸法、形状の精度を得ることが難しいので、二次加工が施される。主に二次加工は、ダイヤモンド砥石を用いて行われているが、ここで重要なことは、破壊の起源となる研削加工による研削傷及び微少亀裂を減じ、破壊に対する亀裂感受性を低下させることである。

以上のことから、第一段階として客員研究員を招へいして研削面の微小亀裂の軽減を目的とした延性モード研削加工(第 2 章)、及び超音波振動を研削加工に付加することによるセラミックスの高精度・高能率・塑性研削加工(第 3 章)の研究を実施した。また、並行して第二段階(第 4 章)として理論的に解明の困難な突発的に観測される傷についての検討を、品質工学のパラメータ設計の手法を用いて実施した。またセラミックスとは異なるかもしれないが、前記の研究内容を応用して、第三段階(第 5 章)の硬脆材料である卵殻の切断、及び硝子ネジ加工の研究を実施した。

第 2 章 延性モード研削加工¹⁾²⁾³⁾⁴⁾⁵⁾

研削面の微小亀裂の軽減を目的とした塑性研削加工(延性モード研削加工)については、参考文献 1)から 5)に示す。

第 3 章 超音波振動を研削加工に付加したセラミックスの高精度・高能率・塑性研削加工⁶⁾⁷⁾

3.1 まえがき

本研究は、第二章において砥石切込み量及び砥石結合材弾性率について微小塑性領域の研削加工条件を検討したので、砥石周速度と微小塑性領域の加工条件の関係を検討し、次に超音波振動を付加した場合について検討した。

3.2 実験装置及び方法

実験は、横軸角型テーブル平面研削盤(岡本工作機械製作所 CGM-63)に砥石を取り付けて湿式研削を

*新技術応用部

実施した。超音波は、砥石軸方向の振動とし、28KHz $\times$ p8 μ m の性能の装置((株)超音波工業 USV-200Z28S)を使用した。研削表面の評価は、走査型電子顕微鏡にて表面損傷及び端部の欠けを観察した。

砥石周速度と塑性研削条件の関係は、図 3.1 に示す方法にて端部より内側の表面に対して欠けを発生させ、 ラップ面の欠けとの比較(最大欠け)により検討した。使用した砥石は、結合材の弾性率が小さいために研削欠けの発生が少ない SDC140N75B ($E=6.9\text{GPa}$)の砥石を用いた。テーブル速度は、 5 m/min 一定とした。

3.3 実験結果及び考察

図 3.2 は、最大砥粒切込み深さ $g=0.14\mu\text{m}$ として、砥石周速度 V_s と塑性研削条件(被削材 Si_3N_4)の関係を検討したものである。この図より、 V_s が 1700m/min より大きい時は欠けがラップ面と同じ大きさになったので一般の研削よりは、ラップ加工と同程度の塑性的研削が行われていると考えられる。このことは、塑性研削条件が砥石周速度と関連することを示す。また研削面をよく観察すると剥離や欠

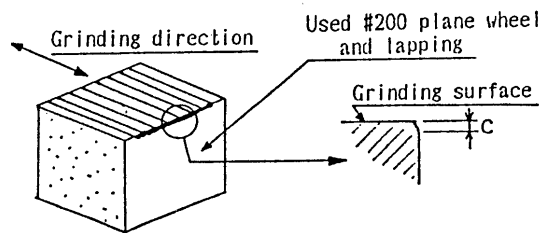


Fig. 3.1 Lapping process

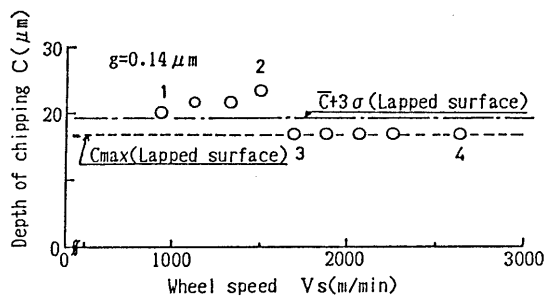
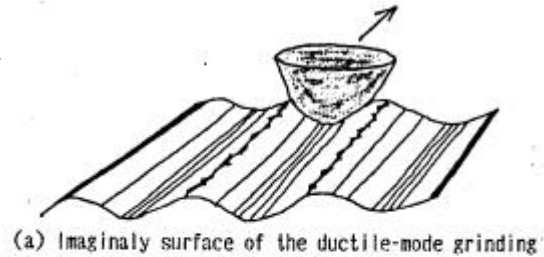
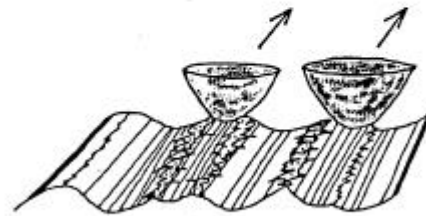


Fig. 3.2 Resultant depth of chipping C of the Si_3N_4 as a wheel speed V_s



(a) Imaginary surface of the ductile-mode grinding



(b) Practical surface of the ductile-mode grinding



(c) Added AE surface of the ductile-mode grinding

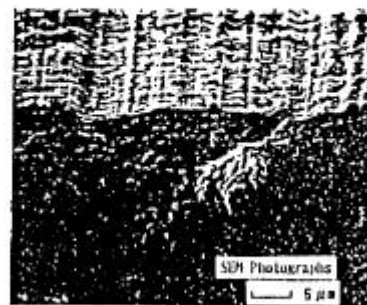


Fig. 3.3 Imagination diagram of the ductile-mode grinding

けは、研削条痕の中心部分には発生せず側方の盛り上がり部分に発生していることがわかる。これは、本来研削仕上げ面となるべき側方盛り上がり部分に、接触剛性起因する弾性接触状態の後続砥粒が干渉し、その部分に研削方向と同一方向に分布する剥離や欠けを発生させているためと考えられる。それを模式的に示したものが図 3.3(b)である。

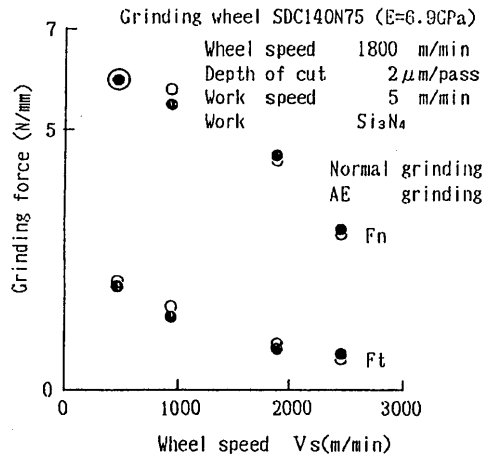


Fig.3.4 Grinding force

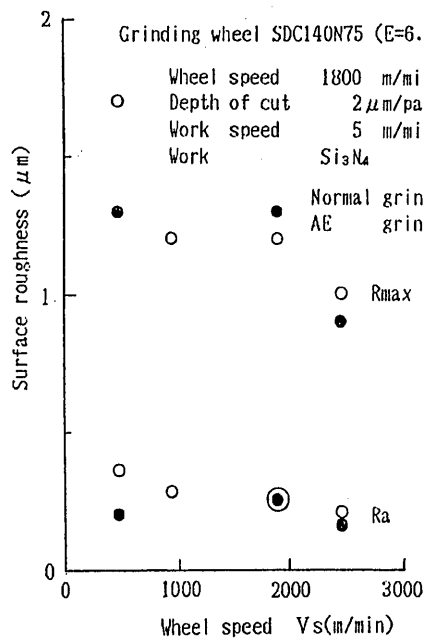


Fig.3.5 Surface roughness



Fig.3.6 SEV Photographs of ground surface

そこでこの影響を緩和する目的で後続砥粒の軌跡を図 3.3(c)に示すごとく先行砥粒の研削条痕とクロスさせることにより,仕上げ面に発生する後続砥粒による剥離や欠けの割合を軽減することを考えた。そのためには,砥石軸方向に超音波振動を付加すればよい。以上のことから超音波発信器を用いて砥石切込み $d=2\mu\text{m}$, テーブル速度 5m/min として Si_3N_4 を超音波及び普通研削した時の研削抵抗, 研削方向の仕上げ面粗さ, 及び表面の SEM 像を図 3.4 ~ 図 3.6 に示す。図 3.4 より砥石軸方向に超音波振動を付加しても研削抵抗は, 普通研削の場合と変わらないことがわかる。図 3.5 に示す研削方向の仕上げ面粗さは, 砥石周速度 V_s が低い領域で粗くなっている。このことは砥石周速度 V_s の小さい領域では, 超音波振動の効果が大きいことが伺える。同様に図 3.6 に示す SEM 像より超音波振動による効果は, 砥石周速度 V_s の低い領域で効果が大きく $V_s=2449\text{m/min}$ では全く効果がないことがわかる。なおこの時の振幅は $V_s=471\text{m/min}$ の時のみしか計測出来ないが P-P の値は約 $8\mu\text{m}$ であり, 無負荷時の P-P の値と一致する。

3.4 結 言

- (1) セラミックス塑性研削条件は, 砥石周速度 V_s と最大砥粒切込み深さ g に関連する。
- (2) 砥石周速度 V_s には, 最適値が存在する。
- (3) 塑性研削加工における最大の問題点は, 砥石と工作物の弾性接触領域における後続砥粒の影響である。
- (4) 後続砥粒の影響による研削条痕の側方剥離や割れは, 砥石軸方向に超音波振動を付加し研削条痕をある程度の角度以上で交差させることにより軽減できる。

第 4 章 品質工学(パラメータ設計手法)を用いた理論的に解明困難な突発的に観測される傷についての検討

4.1 アルミナの品質工学(パラメータ設計手法)を用いた理論的に解明困難な突発的に

観測される傷についての検討⁸⁾⁹⁾¹⁰⁾

アルミナの研削傷の検討については, 参考文献 8) から 10) に示す。その結果, 粗さ及び傷を小さくする因子は砥粒径であることが判明し, これらを小さくするには砥粒径の小さい砥石を用いることのみが改善する手段であることがわかった。

4.2 窒化珪素の品質工学(パラメータ設計手法)を用いた理論的に解明困難な突発的に観測され

る傷についての検討¹¹⁾¹²⁾

4.2.1 はじめに

ダイヤモンド砥石を用いたセラミックス研削加工で重要なことは, セラミックス製品の品質上大きな問題となり, 破壊の起源ともなる欠陥の中で, 特に形の大きい研削傷を軽減することである。本研究は, 窒化珪素について研削面のシミュレーション, 及び研削実験による研削傷を小さくする加工条件の推定を行い, 研削傷の発生原因を検討したものである。

4.2.2 研削傷の評価方法

傷の評価は、測定した粗さ曲線より明らかに突き出た山を除き、一番高い山と一番深い谷の差を研削傷の深さと定義した。測定する基準長さ L は、試料の大きさ ($50\text{mm} \times 25\text{mm} \times 10\text{mm}$) を考慮して $L=20\text{mm}$ とし、測定は、研削方向と直角に 4 ヶ所とした。

傷の評価は、深さと発生頻度が重要であるので、研削傷の深さを 0 よりのはらつきとして評価することとした。このことから望小特性の SN 比¹³⁾を研削傷の程度を表す特性値として用いた。(なおこのような研削傷の評価方法は、疑問が提起されており現在検討中である。)

4.2.3 プランジ研削のシミュレーション

4.2.3.1 シミュレーション条件

研削傷の発生原因としては、脱落もしくは破砕砥粒、突き出し量の大きい砥粒と考えられる。ここでは砥粒突き出し量が傷発生の要因と考えて以下の仮定をし、プロダラムを作成してプランジ研削の場合の粗さ曲線を、パソコンにてシミュレーションし、同時にプランジ研削実験を行い、基準長さ L が短いために研削傷の定義とは異なるが、 R_{max} を研削傷と考えて検討した。

- 1) 粗さ及び傷は、研削部分ではなく図 4.1 に示すように砥石と Si_3N_4 の弾性接触部分で発生したものが、仕上げ面に残る。
- 2) 弾性接触部分の長さは、実験による法線方向の研削抵抗 F_n より円筒と平面の接触の、ヘルツの公式を用いて求める。(このようにして求めた接触長さは、研削条痕の SEM 観察の結果と概略一致していた。)
- 3) 以上のことより、砥石結合材の弾性率が

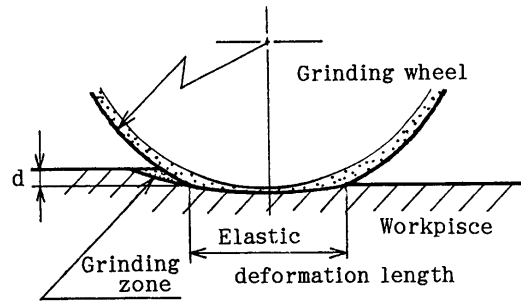


Fig.4.1 Schematic diagram of the grinding process

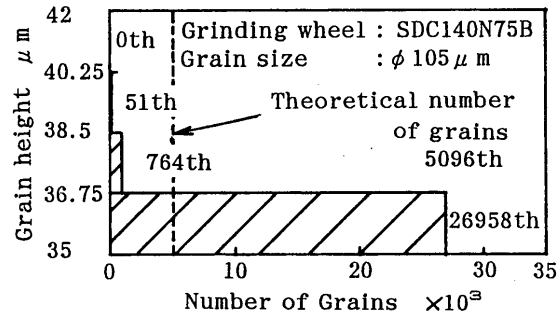


Fig.4.2 A hypothetical distribution of grain heights

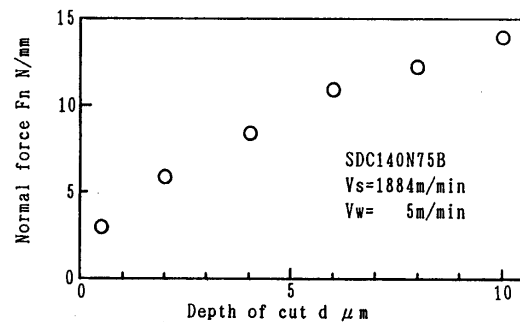


Fig.4.3 Relation between Normal force and Depth of cut

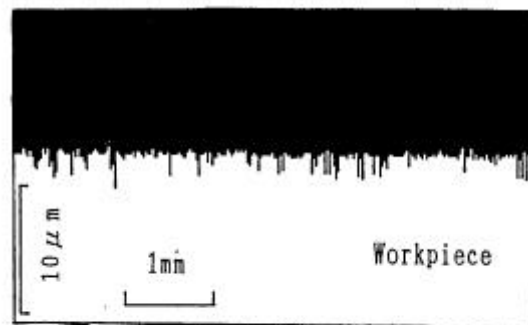


Fig.4.4 Ground surface by simulation

明かな必要があるので、幅 10mm の S D C140N75B

($E=6.9\text{GPa}$)の結合材弾性率の明かな砥石を用いる。

4) 砥粒の先端角は、 120° とする。

5) 砥粒による研削条痕は、1)及び2)の仮定より図 4.2 に示すような砥粒突き出し量分布を仮定して、砥粒径が大きいので砥粒の結合材中への逃げ及び砥石と窒化珪素の弾性変形を無視し、幾何学的な砥粒の軌跡のみが仕上げ面に残る。

4.2.3.2 シミュレーション結果

法線研削抵抗 F_n と砥石切込み量 d の関係を図 4.3 に示す。この F_n を用いて粗さ曲線を模擬した結果の一例を図 4.4 に、 d と $R_{\max}$ の関係を図 4.5 に示す。

$R_{\max}$ は、シミュレーションでは砥石切込み量 d が大きくなるのに従い向上し、その後一定値に収束する傾向を示す。これは、 d が大きくなると F_n が大きくなり弾性接触部分の長さが長くなるために、研削面に作用する砥粒数が増大するためと考えられる。プランジ研削実験結果もドレッシングの影響によると考えられるばらつきは大きい、同様の傾向を示す。しかし、 d がある値を越えると $R_{\max}$ が若干大きくなる傾向を示す。この違いは、実際には切込みがある程度大きくなると条痕側方や下部に割れや剥離が発生するため、もしくは、破碎、脱落砥粒の影響と考えられる。

4.2.4 研削実験及び結果

これまでは研削傷を、シミュレーションによる粗さ曲線により検討したので、次に生産現場での最適加工条件を推定する目的もあるために、シミュレーションに使った砥石とは異なるが、より加工現場に近い幅の広い砥石(幅 20mm)を用いて、研削加工実験を実施し研削傷を検討した。¹¹⁾¹²⁾

各因子の効果は、大きい順に砥右の砥粒径、クロス送り量、及び砥石切込み量は小さく、砥石周速度は速く、テーブル速度は遅くすることが良く、最大砥粒切込み深さ g を小さくする条件であることがわかった。なお、傷の大きさを軽減することができる主たる因子は、砥石の砥粒径の違いである。砥石表面状態の効果は、砥右切込み量の次に大きくツルイング、ドレッシング後が良いことになった。なお、砥右周速度と累積研削量間には、交互作用が認められ、累積研削量が大きくなると砥石周速度の効果が小さくなることわかった。

4.2.5 考 察

$R_{\max}$ は、シミュレーションでは、砥右切込み量 d が大きくなるのに従い向上し、その後一定値に収束する傾向を示す。本実験結果は、 d については微小切込みの時にのみ傷及び $R_{\max}$ が向上することを示している。ここで、プランジ研削のシミュレーション結果より本実験の様にクロス送りを与えた場合に

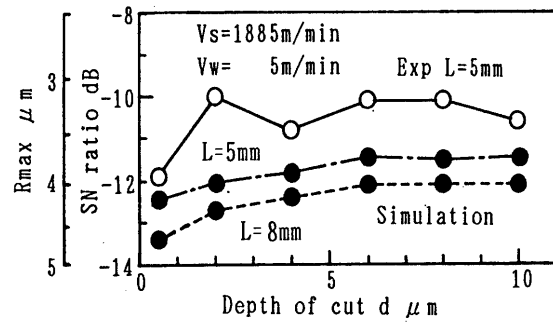


Fig.4.5 Relations between Surface roughness and Depth of cut

について考察してみる。クロス送りを与えた場合は、微小切込みの場合でも研削面に作用する砥粒数が多くなるために山の部分が低くなり、傷及び R_{max} はある一定値に収束するので、切込み量の効果はほとんど現れないことになる。これは、研削実験結果に合致しない。

このことから、研削傷及び R_{max} を発生させる要因は、砥粒の突き出し量ばかりではなく、破碎もしくは脱落砥粒の影響であることがわかる。このことは、実験結果より推定した最適加工条件は、最大砥粒切込み深さ g を小さくする条件であり、 g が小さくなると個々の砥粒に作用する研削抵抗が小さくなるので、破碎砥粒もしくは脱落砥粒が減少することにより、傷及び粗さが小さくなることから推測できる。

4.2.6 結 言

窒化珪素の研削加工において、品質や強度を低下させる研削傷について検討した結果、以下のことが明らかになった。

- 1) 研削傷を小さくするには、砥石のダイヤモンド砥粒の粒径を小さくすることが最も有効であるが、その他の加工条件では砥石のツルイーイング、ドレッシング後で、最大砥粒切込み深さを小さくすると良い。
- 2) 窒化珪素の研削傷及び仕上げ面粗さ R_{max} の発生原因は、シミュレーション及び実験結果より破碎砥粒もしくは脱落砥粒の影響であることが明らかになった。

第 5 章 研究成果の応用

5.1 鶏卵の切断

5.1.1 はじめに

鶏卵を利用した例えば薬物の毒性試験は、鶏卵の上部卵殻に開口部をあけ鶏卵内部に薬物を投入して、鶏卵を成長させて観察したり胎児を取り出して観察することにより行われる。従来の卵殻切断装置は、卵黄または卵白を取り出すための物であり、卵殻を割るのが目的のため卵殻にかなりのダメージを与えてしまう。そのために卵殻に開口部をあける作業は、人手によりピンセット等を用いて行われているのが現状である。その様なことから、(株)三友製作所より相談のあった卵殻を切断する場合に発生する割れを軽減し、しかも高速で切断することができる装置を共同開発することになった。

5.1.2 切断方法の検討

卵殻の切断方法としていくつかの方法を検討し実用化できると考えた切断方法は、1) 薄いダイヤモンド切断ホイールを用いた横方向よりの切断、2) 加工速度は遅いが岩石などの切断において加工変質層の極めて少ないといわれているダイヤモンド電着ワイヤソーを用いた横方向よりの切断(多数個の切断が可能)、3) 円筒状の切断工具を用いた切断(ダイヤモンド電着を含む)である。1) と 3) の方法については、有限要素法解析による応力分布よりクラックの少ないと考えられる方法を選定することとした。なおここで 2) の試作については、センタ-にアイデアがあったことからセンタ-で行うこととし、1) もしくは 3) についての試作は(株)三友製作所で行うこととなった。なお 2) については前年度報告書 14) に

してあるので、報告を省略する。

5.1.3 有限要素法による解析

割れ発生メカニズムの検討は、当センターの大高氏の協力により三次元 CAE システムによる有限要素法にて実施した。切断ホイールによる横方向よりの切断は、図 5.1 及び図 5.2 に示すように切断中の、切断後半部(図 5.1)及び切断終了間際(図 5.2)の卵殻の応力状態を解析することにより行った。硬脆材料は、引張り応力により破壊 15) すると考えられるので、卵殻に発生する引張り主応力について計算した。

1)の切断方法の場合の応力は、終端部以外の切断では切断点周辺に引張り応力が発生しているが、未切断部分が大きいために、切断力による鶏卵の引張り応力は大きくならない。しかし、終端部の切断では未切断部分が小さいために、切断力による応力は 4.8 倍と大きくなり、かつ切断部下方(図では右方)に引張り応力が発生する。また、引張り応力の方向は切断点近傍以外では周方向(切断方向)にほぼ平行に発生する。そのため終端部では、2 箇所切断点より下方(図では右方)にクラックが進展する。進展したクラック先端には切断力による応力集中が発生し、よりクラックの進展が速まり、ついには発生したクラック先端が下方でつながり、大きな割れによる卵殻側方除去部を発生させて切断が終了することがわかる。

3)の円筒状刃物による切断方法では、卵殻が真円ではないために、完全に卵殻周上に刃物が接触することはほとんどない。しかし、卵殻切断の進展状況から判断して、卵殻周上に均等に接触していると考えても支障がない。以上のことから、卵殻周上に均等に接触していると考えて応力の状態を解析した。その結果切断部付近には、図 5.3 に示すように圧縮応力が発生する。もう少し詳細に述べると、周方向

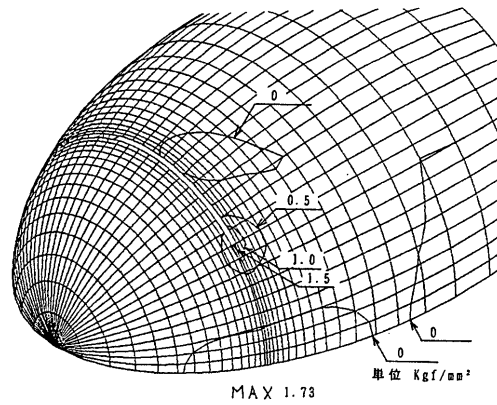


図 5.1 切断ホイールによる応力分布
(最大応力)

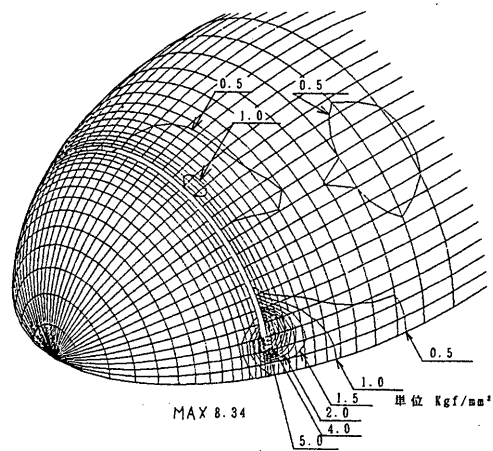


図 5.2 切断ホイールによる応力分布
(最大応力)

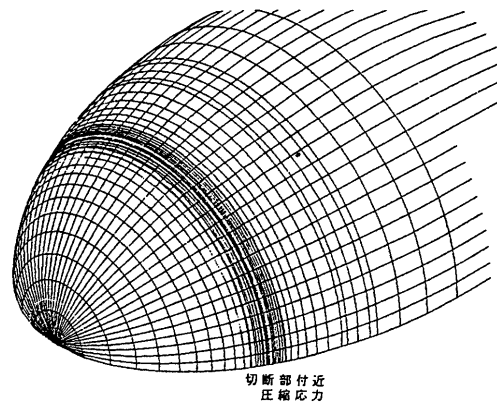


図 5.3 円筒状刃物による応力分布
(最大応力)

及び軸方向とも圧縮応力が発生し、離れた部分には周方向に引張り応力、軸方向に圧縮応力が発生する。このことから大きな切断力が作用した場合には、卵殻中央部より軸方向にクラックが発生すると考えられる。しかし卵殻の切断を行う場合は、この様な大きな力を作用させずに切断を行わなければならないので、切断部付近には圧縮応力が作用していることから、クラックは発生しないことがわかる。このことから卵殻切断方法は、円筒状刃物によることと決定した。

解析条件は、1)形状は卵殻切断部に概略一致し、相似であれば良いので卵殻を長径 80mm、短径 50mm の楕円(厚さは 0.43mm とした)と近似した。2)有限要素法は、線形四辺形薄肉シェル要素(HP9000 シリーズ Vode1 730, COSMOS/ M による)を用いた。3)弾性率 $E=7000\text{Kg}/\text{mm}^2$ 、ポアソン比 $\nu=0.29$ とした。4)卵殻の応力状態の違いを解析する目的であるので、薄い円盤状の刃物で横方向より切断する場合は、各切断点における力は 1 Kg (切断力 $=2\text{ Kg}$)とした。5)円筒状刃物の場合は、横方向切断と同じ加工圧力とするため、各分割点における力を 3.4Kg とした。

5.1.4 切断実験

円筒状刃物による卵殻の切断装置を試作し、鋸状の切断刃を円筒先端部に取り付けた切断工具を製作して実験を行ったが、刃物先端の摩耗が予想以上に激しく卵殻の割れが発生した。その様なことから円筒状工具先端にダイヤモンドを電着した砥石とする事により割れのほとんど発生しない卵殻の切断ができるようになった。

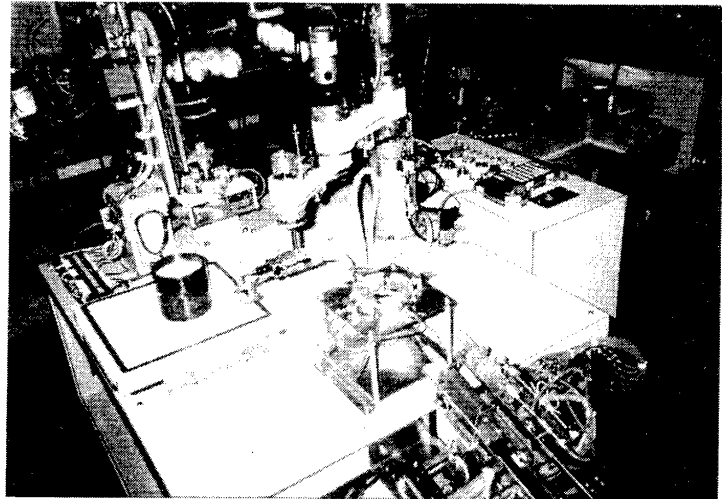


図 5.4 卵殻自動切断装置

5.1.5 まとめ

円筒状工具先端にダイヤモンドを電着して、卵殻自動切断システムとしてまとめた装置を図 5.4 に示す。その結果は、良好な卵殻の切断ができた。

5.2 硝子ネジ加工

県内企業より相談のあった硝子雄ネジの加工について、加工装置を試作し実験を行った。これについては、本年度の研究報告(ファインセラミックス研削加工技術—硝子雄ネジの加工—)にて報告する。

第 6 章 まとめ

セラミックスの高品位研削加工は、砥石結合材弾性率の小さい砥石を用い微小切り込みを与えることにより達成できる。超音波振動を付加するとより有効である。また突発的に発生する大きな研削傷は、最大砥粒切込み深さ g を小さくすると軽減されることが判明した。これらのことから研削傷を発生する主たる要因は、破碎もしくは脱落砥粒であると考えられるので、研削傷を完全に防止するには、微細砥粒砥石を使用するか、破碎、脱落のサイズを小さくすることのできる砥石の開発が必要である。また本研究中に研削砥石及び卵殻切断装置について特許を出願できたことは幸いであり、関係された方々のご協力の賜であります。

最後になりますが本研究の遂行に当たり、客員研究員として御指導、御教示頂いた茨城大学教授江田弘氏、品質工学について御指導頂いた工業技術院計量研究所 松田次郎氏、ORT 研修生としてご協力頂いた(株)オーソボテクノサービス 大滝英幸氏、当時(株)大坪製作所 戸張雄一郎氏、(株)朝日精機製作所 朝日洋氏、(株)三友製作所 小松崎哲郎氏、及び水戸旭ファイン硝子(株) 立原改憲氏に厚くお礼申し上げます。

参考文献

- (1) 江田,左右田,佐川,高島, ファインセラミックスの研削加工変質層に関する研究, 1990 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, 951
- (2) 江田,鈴木,久保田,佐川,高島, ファインセラミックスの超精密研削加工に関する研究,1990 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, 953
- (3) 佐川,江田,セラミックスの塑性研削加工に関する研究, 日立地方講演会論文集(1990-9)132
- (4) 佐川,江田,高島, ラミックスの塑性研削加工に関する研究, 日本機械学会論文集 (C 編) 57, 538(1991-6)2160
- (5) 江田,佐川,セラミックスの延性モード研削理論とその検証実験,機械の研究,養賢堂, 45,4(1993)470
- (6) 佐川,高島,江田,セラミックスの高精度・高能率・塑性研削加工に関する研究,第 68 期通常総会講演会論文集(C),日本機械学会, (1991-3)590
- (7) 江田,佐川,大村,セラミックスの A E 研削に関する研究,1991 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集,785
- (8) 佐川,大滝,戸張, ファインセラミックス研削加工技術研究,茨城県工業技術センタ-研究報告, 18(1990)1
- (9) 佐川,松田,セラミックス加工面の最適加工条件 - パラメータ設計の適用 -, 機械の研究,養賢堂, 43,6(1991)683

- 10) 佐川, 松田, パラメータ設計による研創傷の改善, 日本設計工学会誌, 28, 2(1993)85
- 11) 佐川, 朝日, ファインセラミックス研削加工技術研究 - 窒化珪素の研削加工 -, 茨城県工業技術センター-研究報告, 19 (1991)49
- 12) 佐川, 高島, 松田, 品質工学による研創傷の検討 - 窒化珪素の場合 -, 1992 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, 441
- 13) 田口玄一編, 品質工学講座(4), 品質設計のための実験計画法, 日本規格協会(1988) 4
- 14) 佐川, 小松崎, ファインセラミックス研削加工技術研究 - ダイヤモンドワイヤソーによる鶏卵切断装置の試作 -, 茨城県工業技術センター-研究報告, 20 (1992)115
- 15) 精密工学会硬脆材料の精密加工に関する調査・研究分科会編著, ファインセラミックス 硬脆材料の精密機械加工, マシニスト出版(1984)62