

放電加工による 薄刃砥石の機上 精密ツルueing の研究

*On-Machine High Precision Trueing for
Thin Grinding Wheels by EDM.*

キーワード

ツルueing, ドレッシング, 放電加工, 研削砥石,
ダイヤモンド砥石, 薄刃砥石, スライシング,
ダイシング, 磁気ヘッド, 光ファイバ

技術開発部
加工技術部
柳瀬辰仁

摘要

近年、磁気ヘッド、光ファイバコネクタなどに代表される電子部材および光通信関連部材は小型化、集積化、新素材の採用が急激に進み、それら部材の薄刃ダイヤモンド砥石による微細加工が困難になってきた。しかし一方では、一層の高効率・高精度加工が要求されている。これら問題を解決するには、研削機械上での薄刃砥石の精密ツルueingがきわめて重要である。

本研究において、既存の機上放電ツルueing法を薄刃砥石用に改良して適用した結果、 $1\mu\text{m}$ 以下の振れ取り、先端半径 $7\sim 12\mu\text{m}$ のV形あるいは片V形の微細形状の創成、側逃げ面の成形、厚さ 0.1mm の極薄砥石の成形を実現できた。また薄刃砥石の外周部および側面部の振れの除去により、 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiC}$ の切断加工で真直度の向上、大きいチッピングの発生の抑制などの効果を得た。さらに砥石電極法の採用により、SD200、600の粗砥粒砥石に対し精密ツルueingを実現できた。現在、各種製造工程にED-T法が導入・実用化されている。

Abstract

Rapid achievements have been made in recent years in the reduction of the size, integration, and use of new materials for electronic parts and optical communication related components, such as magnetic heads and optical fiber connectors. Currently-available sharp-edged diamond grindstones fail to meet the machining requirements of these parts even by today's standards, and moreover, the efficiency and precision requirements continue to become more stringent. Now precision trueing of sharp-edged grindstones used on grinding machines is critical in solving this problem.

In this study, we improved a conventional discharge trueing method and used it to produce sharp-edged grindstones. As a result, we removed vibrations below $1\mu\text{m}$, and created fine V-shapes and fine single-sided V-shapes with a 7- to $12\text{-}\mu\text{m}$ edge radius, a side relief, and a 0.1-mm thick super-sharp-edged grindstone. In addition, eliminating the OD and side wobble on sharp-edged grindstones allowed us the cut $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiC}$ more straightly and decreased the occurrence of large chipping. Using the grindstone-electrode method, we precision trued SD200 and SD600 grindstones with rough abrasive grains. Now the ED-T method is being used in various manufacturing processes.

1. はじめに

磁気ヘッド、光ファイバコネクタなどに代表される電子部材および光通信関連部材は、フェライト、 Al_2O_3-TiC 、ジルコニア、ガラスなどのセラミックスを主要材料としている。これら部材の製造行程では、薄刃ダイヤモンド砥石による微細切断加工や、薄刃総形ダイヤモンド砥石による微細溝入れ加工が行われており、高い寸法精度および形状精度を得るために重要な役割を果たしている。

近年、上記部材の小型化、集積化、新素材の採用が急激に進み、薄刃ダイヤモンド砥石による微細加工において、砥石の形状や切れ味を維持することが困難になってきた。しかし一方では、より一層の高エネルギー・高精度微細加工が要求されている⁽¹⁾。これらの問題を解決するには、研削機械上(機上)での砥石の精密ツールイングおよびドレッシングがきわめて重要である。しかし現状では、薄刃ダイヤモンド砥石に対する効果的な機上ツールイング法がまだ確立されていない。

一方、メタルボンド超砥粒砥石の機上ツールイング法として、マシニングセンタ(MC)やグラインディングセンタ(GC)などのNC研削機械上で放電加工を利用したいろいろの”機上放電ツールイング(ED-T)法”が鈴木らによって開発されている⁽²⁾⁻⁽¹³⁾。このED-T法は、複雑形状の総形メタルボンド砥石の高エネルギー・高精度機上ツールイング/ドレッシングが可能であり、すでに実用に供されている。ED-T法の特長として、非接触ツールイングのためツールイング時の加工圧力がきわめて小さいことが挙げられる。薄刃ダイヤモンド砥石の機上ツールイング法として、実用的見地からED-T法がきわめて有効と思われる。

本研究では、微細加工の一層の高エネルギー化・高精度化を図るため、既存ED-T法を薄刃砥石用に改良して適用し、薄刃メタルボンドダイヤモンド砥石に対する振れ取り効果および形状付与能力を調査した。また、放電ツールイングされた砥石の研削性能も調べた。

2. 薄刃砥石の機上放電ツールイング法

磁気ヘッドおよび光ファイバコネクタ加工用薄刃砥石の先端は、平形、V形、片V形などの単純形状が多い。しかし、その形状精度は、砥石の水平面または斜面の真直度が数百nm~数 μm 、砥石のエッジまたは先端部の半径が数~数十 μm 、Vまたは片V形状砥石の先端角度が $\pm 0.1 \sim 1.0^\circ$ と厳しい。既存のED-T法は、主に軸付き砥石とストレート砥石を対象としてきたこともあり、これらの微小形状を成形することはきわめて困難である。解決策として、砥石と電極の相対移動により砥石形状が決定するED-T法(図1、図2、図3)を採用した。電極装置として、固定タイプ(図1)と回転タイプ(図2、図3)を検討した。回転タイプで薄刃砥石の外周部を成形する場合は、電極装置を図2に示すように設置する。薄刃砥石側面部を成形する場合は図3に示すように電極装置を設置し、図4に示すように電極を砥石に対し相対移動させればよい。

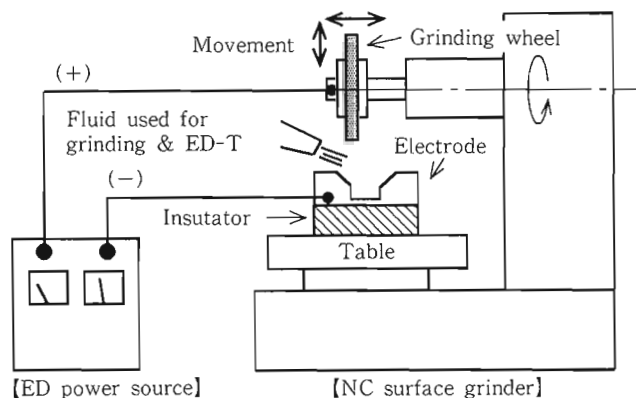


図1. 薄刃砥石の機上放電ツールイング法原理図

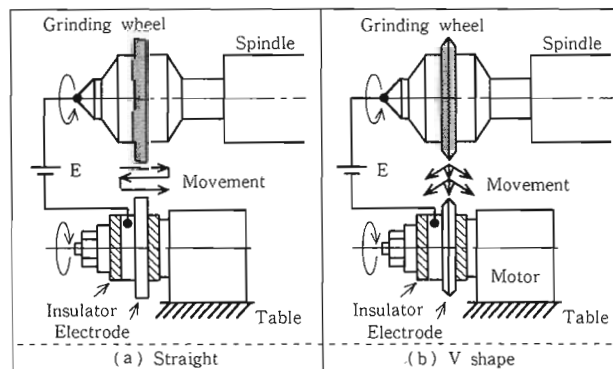


図2. 砥石外周部の機上放電ツールイング法

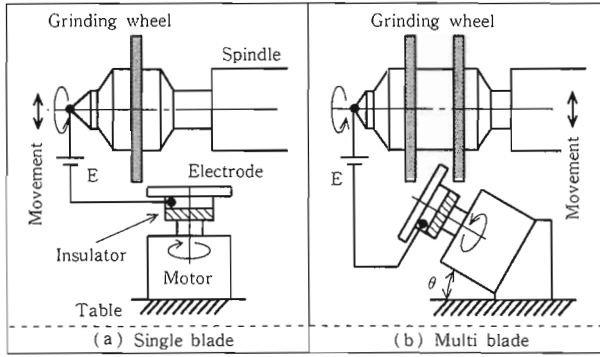


図3. 砥石側面部の機上放電ツルージング法

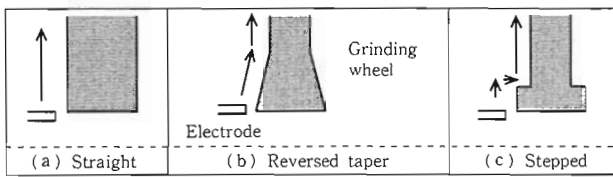


図4. 砥石側面の各種形状に対する電極移動軌跡

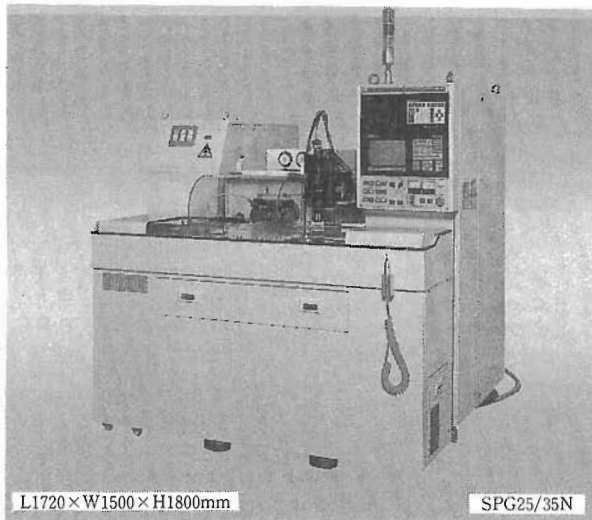


図5. 実験に使用したCNC精密平面研削盤

3. 実験方法および装置

実験は、CNC精密平面研削盤(図5)⁽¹⁴⁾の主軸に薄刃メタルボンドダイヤモンド砥石を装着し、研削盤のテーブル上に電極装置を取付けて行った。電極はテーブルから絶縁されている。放電電源は放電ツルージング専用電源(図6)を用いた。図7に回転電極装置を、図8に砥石外周部成形の場合の回転電極装置の設置状況を示す。

ED-T法の効果は、テーブル上のGC砥石ブロックを削る従来のドレッシング(以下GCドレス)法と比較した。ツルージング後の砥石形状の評価は単結晶フェライトまたは



図6. 放電ツルージング専用放電電源(400×500×700mm)

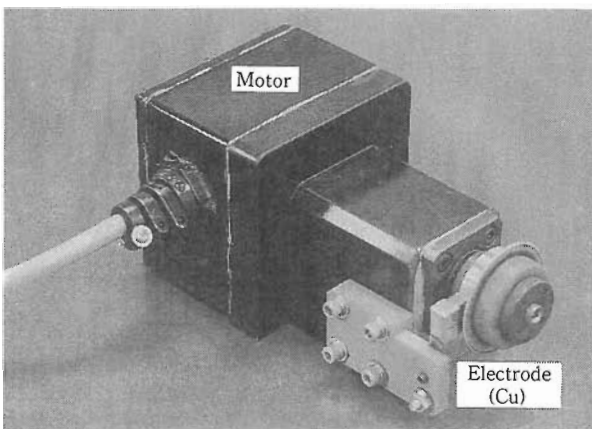


図7. 放電ツルージング用電極回転装置

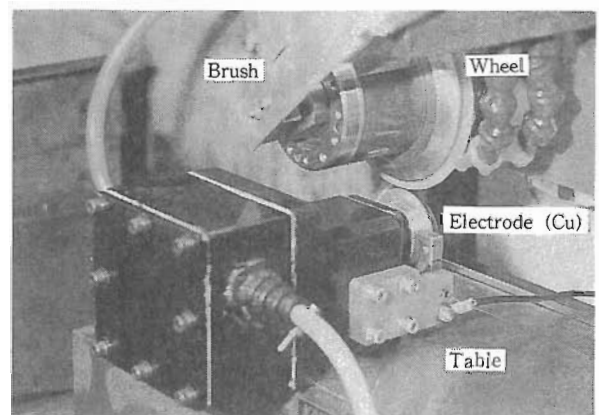


図8. 電極回転装置の取付け状況(砥石外周部成形の場合)

Al₂O₃-TiCに形状を転写して行った。

研削実験では主要磁気ヘッド材Al₂O₃-TiCを被削材とした。

放電ツルーイング条件は、予備実験の結果から砥石周速 $v_{sd}=1414\text{m}/\text{min}$ 、電極周速(回転タイプ) $v_{ed}=57,188\text{m}/\text{min}$ 、追込み量 $\Delta a_d=0\sim 5\mu\text{m}/\text{pass}$ 、無負荷電圧 $E_o=150\text{V}$ 、設定ピーク電流 $I_p=5\sim 30\text{A}$ 、パルス幅 $\tau_{on}/\tau_{off}=2/2$ 、 $8/8\mu\text{s}$ とした。

実験装置の仕様および実験条件を表1に示す。

4. 実験結果

4.1 固定電極による外周ツルーイングの効果

(a) 振れ取りおよび形状修正効果

固定電極を用いて薄刃砥石の放電ツルーイングを行い、既存GCドレス法に対する優位性を確認した。その結果を図9に示す。

ツルーイング実験は、厚さ $t=0.6\text{mm}$ 、初期外周振れ $E_w=14\mu\text{m}_{p-p}$ の平形薄刃砥石(SD4000)に対し、まず従来法のGCドレス(条件A)を行った。砥石振れは $E_w=6\mu\text{m}_{p-p}$ まで減少したが、砥石形状はエッジ半径 $r_e=100\mu\text{m}$ と悪化した。このGCドレスされた砥石に対し、平形のED-Tを行った(総追込み量 $a_d=200\mu\text{m}$ 、ツルーイング時間 $T_d=10\text{min}$)。砥石振れは $E_w=1\mu\text{m}_{p-p}$ まで減少し、同時にエッジ半径 $r_e=15\mu\text{m}$ 以下の平形砥石に形状修正できた。

(b) 固定電極によるED-Tの限界

固定電極は電極装置が安価で、小スペースでも取り付け可能という特長を持っている。しかし、V形、片V形などの総形薄刃砥石に対するED-Tでは、砥石フランジからの砥石突出し量または砥石先端角度が小さい場合に、砥石フランジと電極が接触する問題がある。接触を避けるには電極幅を小さくすれば良いが、電極の減りが速いという問題が発生する。これらの問題は薄板の回転電極を用いることにより解決を図った。

4.2 回転電極による形状創成ツルーイング

薄刃砥石の外周部および側面部に対し、回転電極によるED-Tを行った。振れ取り実験では、固定電極の場合と同様、砥石振れ $E_w=1\mu\text{m}_{p-p}$ まで除去できた。ここでは、回

表1. 実験装置の仕様および実験条件

研削機械:	CNC精密平面研削盤 (SPG25/35N, エアスピンドル, 2.2kW, 不二越)
薄刃砥石:	メタルボンドダイヤモンド砥石 ($d_s=100\text{mm}$, ノリタケダイヤ&新日産ダイヤモンド) (1) SD4000N100MF9 ($t=0.6, 0.3, 0.15\text{mm}$) (2) SD1200N75MF12 ($t=5.0\text{mm}$) (3) SD600,2000J75MY3 ($t=0.6\text{mm}$) (4) SD200,600,2000J75MY3 ($t=1.5\text{mm}$)
放電電源:	放電ツルーイング専用電源 (HTD-FY or SUE-87, 3kVA, ソディック)
電極:	(1) ブロック(銅) (2) 回転円盤 ($d_e=60\text{mm}$, $t=0.3\sim 1.0\text{mm}$, 銅) (3) メタルボンドダイヤモンド砥石 ($d_e=60\text{mm}$, $t=1.0\text{mm}$, SD200J75MY3)
加工液:	水溶性研削液 (放電・研削共用, ノリタケケールAFG-M, 50倍希釈)
被加工材:	(1) Al ₂ O ₃ -TiC ($50\times 50\times 4\text{mm}$) (2) ZrO ₂ ($50\times 50\times 4\text{mm}$)
GCドレス条件:	ドレッシング砥石: GC600 砥石周速: $v_{sd}=1414$ (条件A), 2827 (条件B) m/min 切込み深さ: $a_d=1$ (A), 5 (B) mm 送り速度: $v_{wd}=500$ (A), 200 (B) mm/min ドレス距離: $L_d=400$ (A), 100 (B) mm
放電ツルーイング条件:	砥石周速: $v_{sd}=1414\text{m}/\text{min}$ 電極周速: $v_{ed}=57, 188\text{m}/\text{min}$ 送り速度: $v_{wd}=5\sim 150\text{mm}/\text{min}$ 追込み量: $\Delta a_d=0\sim 5\mu\text{m}/\text{pass}$ 無負荷電圧: $E_o=150\text{V}$ ピーク電流: $I_p=5\sim 30\text{A}$ パルス幅: $\tau_{on}/\tau_{off}=2/2, 8/8\mu\text{s}$

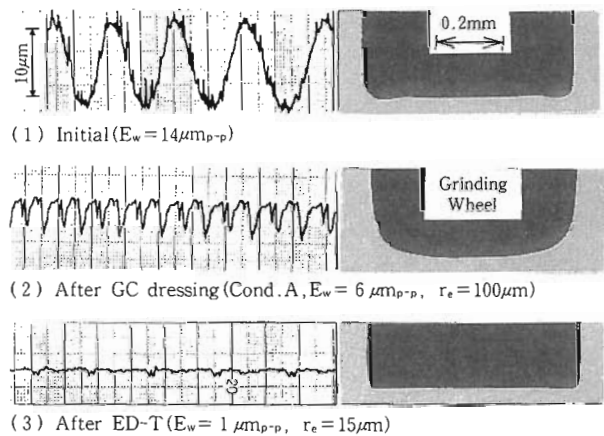


図9. 薄刃砥石の外周振れ精度および砥石形状 (SD4000, $t=0.6\text{mm}$, E_w =振れ, r_e =エッジ半径)

転電極によるED-T法の形状創成能力について調査した。

4.2.1 外周ツルーイング

厚さ $t=0.6\sim 0.15\text{mm}$ の平形薄刃砥石(SD4000)の外周部に対し、平形・V形・片V形の形状創成ツルーイングを行った(図10, 図11)。その結果、いずれの形状においても先端半径 $r_t=7\sim 12\mu\text{m}$ の微細形状を高精度に創成できた。厚さ $t=0.15\text{mm}$ の薄刃砥石に対し15度片V形状を机上創成できた(図11(5))。これは、ED-Tが非接触ツルーイングで砥石に負荷がかからないためである。ツルーイング時間は $T_d=10\sim 30\text{min}$ であった。

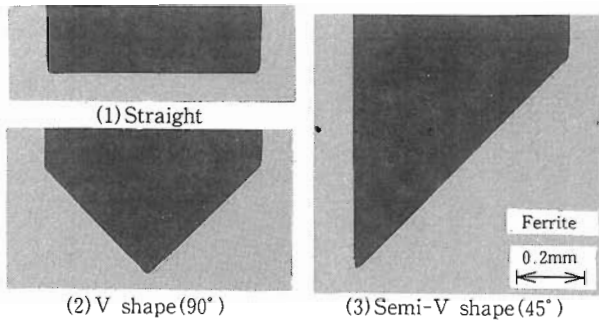


図10. ED-Tにより機上成形された薄刃砥石の形状 (SD4000, $t=0.6\text{mm}$)

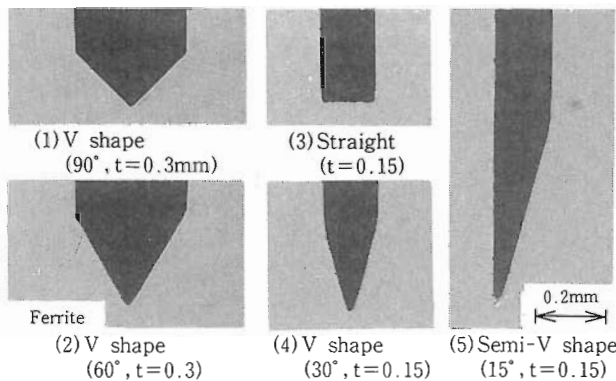


図11. ED-Tにより機上成形された薄刃砥石の形状 (SD4000, $t=0.15\sim0.3\text{mm}$, $T_d=10\sim15\text{min}$)

4.2.2 側面ツルーイング

薄刃砥石による切断、溝入れ加工では、砥石の反りや振動の発生により、被削材の切断面や溝側面がテーパ形状になったり、溝幅が大きくなったりする。防止策として、砥石側面に逆テーパや段付き形状の側逃げ面を設けた砥石が用いられている。ここでは、薄刃砥石の側面部に対しED-Tを行い、側逃げ面の成形、さらに極薄砥石の成形の可能性を調べた。

(a) 側逃げ面の成形

逆テーパあるいは段付き形状の側逃げ面の成形は、SD1200, $t=5\text{mm}$ の砥石の側面に対し行った。成形形状の評価は、成形された砥石の側逃げ面を単結晶フェライトに押し当てて形状転写することにより行った。ツルーイング時間 $T_d=30\sim60\text{min}$ で図12に示す砥石側逃げ面形状を創成できた。

(b) 極薄砥石の成形

厚さ $t=0.6\text{mm}$ の薄刃砥石 (SD2000) の側面にED-Tを行い、厚さ $t=0.5, 0.4, 0.3, 0.1\text{mm}$ の極薄砥石を機上成形した。ED-T法が非接触ツルーイングのため、図13に示すように、砥石の変形、破損などは

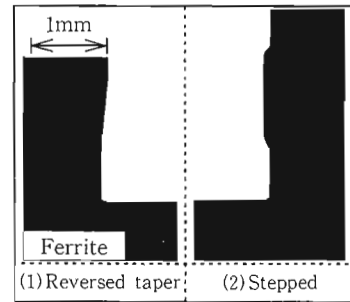


図12. ED-Tにより機上成形された砥石側面の形状 (SD1200)

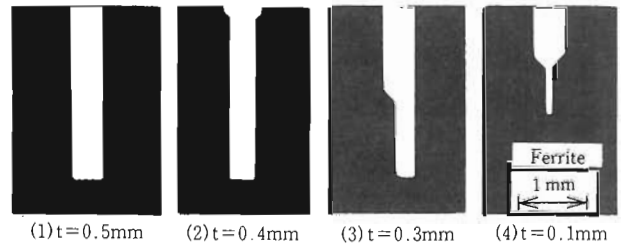


図13. ED-Tにより機上成形された極薄砥石の形状 (SD2000, 成形前の砥石厚さ $t=0.6\text{mm}$)

発生せず、高精度に成形できた。

4.3 複合ツルーイングされた砥石の研削性能

4.3.1 複合ツルーイングの必要性

切断・溝入れ加工におけるチップング発生の原因は、砥石外周部および側面部の振れによるところが大きい。従来の薄刃砥石に対する振れ取りは砥石外周部に対してのみ行ってきたが、チップングを避けるには砥石外周部と側面部の両方の振れ取りを行う必要がある。ここでは、薄刃砥石に対し外周ED-Tと側面ED-Tの両方(複合ED-T)を行い、その砥石の研削性能をGCドレスおよび外周ED-Tの場合と比較した。

4.3.2 複合ツルーイングの効果

厚さ $t=0.6\text{mm}$ の薄刃砥石 (SD600) に対しGCドレス (表1中の条件B), 外周ED-T (外周のみ) あるいは複合ED-T (外周+側面) を行い、 $50\times50\times t4\text{mm}$ の $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiC}$ を $50\times1\times t4\text{mm}$ の短冊状に切断加工した。研削条件は、砥石周速 $v_s=2827\text{m}/\text{min}$, 送り速度 $v_w=50\text{mm}/\text{min}$, 切込み深さ $a=4\text{mm}$ である。この時の溝幅, 砥石軸モータ負荷電流(\propto 接線方向研削抵抗), 切断ワークの真直度およびチップング深さを比較した。

(a) 溝幅 (図14)

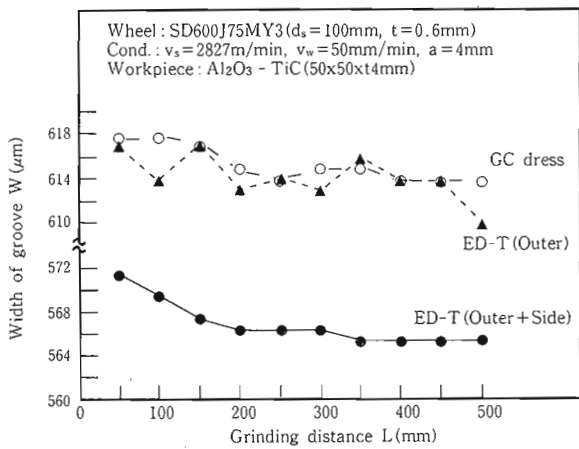


図14. Al_2O_3 -TiC切断加工時の溝幅の推移

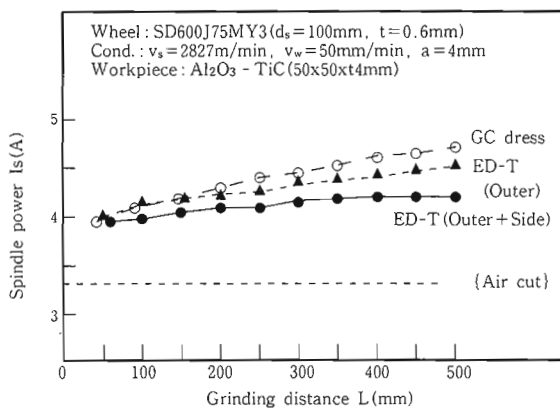


図15. Al_2O_3 -TiC切断加工時の砥石軸モータ負荷電流の推移

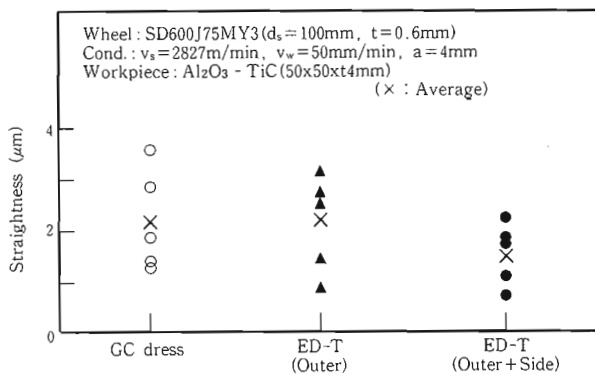


図16. 切断加工された Al_2O_3 -TiCの真直度 (測定長さ40mm)

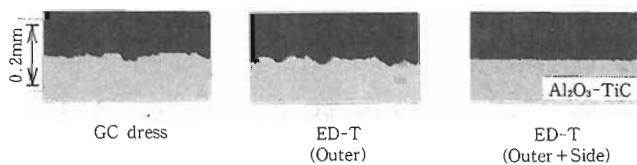


図17. 切断加工された Al_2O_3 -TiCのチッピング状況

複合ED-Tされた砥石では、側面成形により溝幅が小さくなっているが、溝幅の減少傾向はGCドレスおよび外周ED-Tの場合と同様であり、研削距離 $L=200\text{mm}$ で溝幅は約 $5\mu\text{m}$ 減少して安定した。

(b) 砥石軸モータ負荷電流 (図15)

砥石軸モータ負荷電流値は接線方向研削抵抗に比例するが、その上昇率は、ED-Tされた砥石、特に複合ED-Tされた砥石が低く、砥石切れ味が持続した。複合ED-Tされた砥石では、外周ED-Tの場合より砥石軸モータ負荷電流値の上昇率が低いが、これは砥石側面の切れ味が向上したためと考えられる。このことは、より高能率な加工条件が選択可能であることを示唆している。

(c) 真直度 (図16)

切断された短冊状 Al_2O_3 -TiCの切断面の真直度 (砥石送り方向、測定長さ $=40\text{mm}$)を測定した結果、GCドレスおよび外周ED-Tの場合は真直度が約 $2.2\mu\text{m}$ (平均値)となり、ばらつきも大きくなったのに対し、複合ED-Tの場合では、真直度が $1.6\mu\text{m}$ と減少し、ばらつきも小さくなった。これは、複合ED-Tで砥石側面に対し $1\mu\text{m}$ 以下の振れ取りとドレッシングを行ったことにより、砥石軸方向の研削抵抗が均一に、しかも小さくなったためと考えられる。

(d) チッピング

切断された Al_2O_3 -TiCのチッピング発生状況を図17に示す。GCドレスおよび外周ED-Tでは砥石側面振れの影響で切断縁に大きいチッピングが発生した。砥石側面振れは砥石および砥石フランジの側面振れ精度から $5\mu\text{m}$ 程度発生していると推測される。複合ED-Tでは砥石側面振れが $1\mu\text{m}$ 以下となり、大きいチッピングの発生を抑制できた。

4.4 砥石電極法の提案

4.4.1 砥石電極の必要性

ED-T法は不導体の砥粒を放電加工しないため、砥粒にダメージを与えず、鋭い切れ刃を残したまま砥石成形できる特長を持っている。しかしその反面、高能率研削が達成できる粗砥粒砥石に対しED-Tを行った場合、砥石の砥粒径が大きいため、エッジ半径あるいは先端半径が小さい砥石形状を得にくい、研削面粗さが悪い、という問題が発生

する。解決策として、電極にメタルボンドダイヤモンド薄刃砥石（砥石電極）を用い、放電と研削の両作用による機上ツルーイング（EDG-T）法を提案した。

4.4.2 砥石電極法の効果

(a) 粗砥粒砥石の形状創成能力

SD200の砥石を電極として用い、比較的粗砥粒であるSD600の薄刃メタルボンドダイヤモンド砥石 ($t=0.6\text{mm}$) に対し、 90° V形状の機上創成ツルーイングを行った (図18)。EDG-Tされた砥石は、先端半径 $34\mu\text{m}$ 、斜面真直度 $0.7\mu\text{m}$ の形状が得られ、ED-T法の場合(先端半径 $50\mu\text{m}$ 、斜面真直度 $1.3\mu\text{m}$)より高精度に成形された。

(b) 砥石摩耗状況

図18の砥石を用い、ジルコニアの溝入れ加工を行った。研削条件は、砥石周速 $v_s=2827\text{m}/\text{min}$ 、送り速度 $v_w=60\text{mm}/\text{min}$ 、切込み深さ $a=0.2\text{mm}$ 、研削距離 $L=2000\text{mm}$ である。溝入れ加工後の砥石形状を図19に示す。図18の研削前の状態と比較して、ED-Tの場合の斜面真直度は $1.3\mu\text{m}$ から $2.4\mu\text{m}$ に悪化した。これは、研削初期に発生する砥粒の脱粒の影響と考えられる。EDG-Tの場合、ツルーイング時に砥石電極の砥粒で脱粒しやすい砥粒を除去するため、溝入れ加工後の斜面真直度は $0.9\mu\text{m}$ と $1\mu\text{m}$ 以下を維持した。

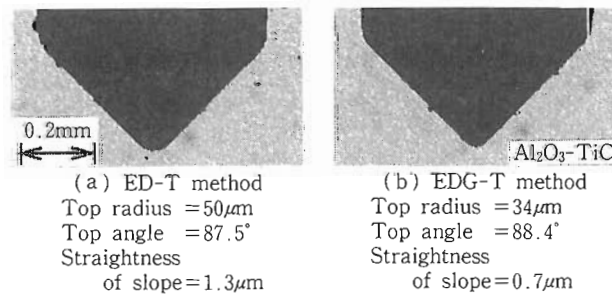


図18. 90° V形に成形された薄刃砥石の形状 (SD600, $t=0.6\text{mm}$)

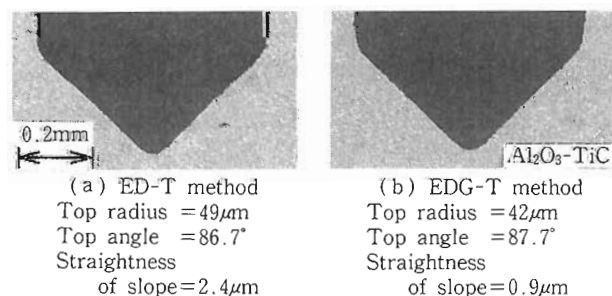


図19. 溝入れ研削後の 90° V形薄刃砥石の形状 (SD600, $t=0.6\text{mm}$)

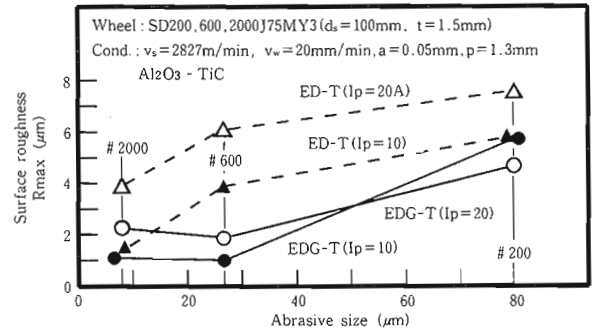


図20. 平面研削された $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiC}$ の研削面粗さ

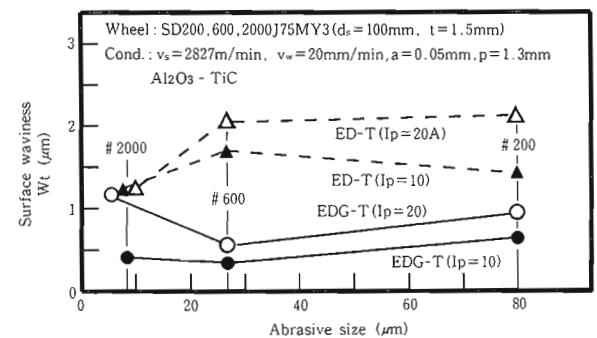


図21. 平面研削された $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiC}$ の研削面うねり

(c) 加工精度の向上

ED-TあるいはEDG-TされたSD200, 600, 2000の平行砥石 ($t=1.5\text{mm}$) を用い、 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiC}$ を平面研削 (研削条件: $v_s=2827$, $v_w=60$, $a=0.2$) した時の砥石軸方向の研削面粗さを図20に、うねりを図21に示す。EDG-Tされた砥石は、ED-Tの場合と比較して、同程度～最大4倍 (SD600, $I_p=10\text{A}$) の面粗さおよび面うねりの改善が認められた。

5. おわりに

磁気ヘッド、光ファイバコネクタなどの電子部材、光通信関連部材の一層の高精度微細加工を実現するため、これら部材の切断・溝入れ加工に使用されている薄刃メタルボンドダイヤモンド砥石の外周部および側面部に対し、砥石と電極の相対移動を利用した機上放電ツルーイング法を適用した。その結果、機上放電ツルーイング法が下記に示す能力および効果を持っていることが明らかになった。

- (1) $1\mu\text{m}$ 以下の振れ取りと同時に形状修正が可能である。
- (2) 回転電極の採用により、V形、片V形の総形薄刃砥石

を先端半径 $r_t = 7 \sim 12 \mu\text{m}$ の微細形状に機上創成できた。

- (3) 砥石側面に対するツルーイングでは、逆テーパあるいは段付き形状の側逃げ面の成形や厚さ $t = 0.1\text{mm}$ の極薄砥石の成形を実現できた。
- (4) 砥石外周部および側面部に対する複合ツルーイングの実施により、 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiC}$ の切断加工で真直度の向上、大きいチッピングの発生の抑制などの効果を得た。
- (5) 砥石電極法の採用により、SD200, 600の粗砥粒砥石に対し精密ツルーイングを実現できた。

これら結果から、機上放電ツルーイング法を薄刃砥石に適用することにより、微細加工の一層の高能率化・高精度化を十分実現できるものとする。今後の課題として、当社では、いろいろの用途に使用されているメタルボンド砥石に対し、ED-T法の適用を検討している。

ED-T法の成果として、次の用途に使用されるメタルボンドダイヤモンド砥石に対しても導入・実用化されている。

- ① 微細切断・溝入れ加工用マルチ砥石
(形状：平形，V形)
- ② 精密金型のプロファイル研削用砥石
(形状：先端半径 0.1mm 程度の片V形，
粒度：SD170~800)⁽¹⁹⁾⁻⁽²²⁾
- ③ 平面研削用カップ形砥石
(外径：150~300mm，粒度：SD325~4000)

謝 辞

本研究を行うに当たり、ご指導頂いた富山県立大学植松哲太郎教授および日本工業大学鈴木清教授、ならびに、実験設備について、ご協力頂いたノリタケダイヤ(株)、(株)ソディック、各位に厚く御礼申し上げます。

文 献

- (1) 鶴原吉郎, 日経ニューマテリアル, (95), 8-27 (1991)
- (2) 鈴木, 植松ら, 精機学会秋季大会講演論文集, 575 (1985)
- (3) 鈴木, 植松ら, 精密工学会秋季大会講演論文集, 657 (1986)
- (4) 鈴木, 植松ら, 精密工学会春季大会講演論文集, 585 (1987)
- (5) 植松, 鈴木ら, 精密工学会秋季大会講演論文集, 97 (1987)
- (6) 鈴木, 植松ら, 精密工学会春季大会講演論文集, 503 (1988)
- (7) 鈴木, 植松ら, 精密工学会春季大会講演論文集, 505 (1988)
- (8) 植松, 鈴木ら, 精密工学会春季大会講演論文集, 507 (1988)
- (9) 植松, 鈴木ら, 精密工学会秋季大会講演論文集, 45 (1988)
- (10) 植松, 鈴木ら, 精密工学会春季大会講演論文集, 709 (1989)
- (11) 浅野, 植松ら, 精密工学会春季大会講演論文集, 715 (1989)
- (12) 柳瀬, 植松ら, 精密工学会秋季大会講演論文集, 355 (1989)
- (13) 鈴木, 植松ら, 精密工学会春季大会講演論文集, 989 (1990)
- (14) 柳瀬, 金井ら, 機械と工具, 35 (7), 38-43 (1991)
- (15) 柳瀬, 薄木ら, 精密工学会春季大会講演論文集, 45 (1992)
- (16) 柳瀬, 薄木ら, 精密工学会春季大会講演論文集, 47 (1992)
- (17) 柳瀬, 薄木ら, 精密工学会秋季大会講演論文集, 847 (1992)
- (18) 柳瀬, 坂下ら, 精密工学会秋季大会講演論文集, 935 (1993)
- (19) 植松, 柳瀬ら, 精密工学会秋季大会講演論文集, 849 (1992)
- (20) 植松, 柳瀬ら, 精密工学会春季大会講演論文集, 141 (1993)
- (21) 植松, 柳瀬ら, 精密工学会秋季大会講演論文集, 939 (1993)
- (22) 植松, 柳瀬ら, 精密工学会春季大会講演論文集, 831 (1994)



柳瀬辰仁