

薄刃ダイヤモンドブレードによるフェライトの溝加工 (第1報)*

—エッジチッピング生成に及ぼす砥石ボンド材の影響—

佐藤 彰** 黒部 利次*** 広崎 憲†

Edge-chipping Yielded by Grooving of Ferrite Using Thin Diamond Blade

Akira SATO, Toshiji KUROBE and Kenichi HIROSAKI

Edge-chipping yielded by grooving of ferrite using thin diamond blade is responsible for a deterioration of an electro-magnetic property of the magnetic head. Work damage such as chipping may be closely related to the mechanical property of bonding material of thin diamond blade. Edge-chipping yielded by grooving is examined using three types of thin diamond blade whose are made of metal, resin-metal and resin bonded materials. This paper focusses on the relationship between work damage and grinding force. Experiments show that chipping size is influenced by grinding conditions and mechanical property of bonding materials. It is found that the value of maximum normal grinding force per grain is made up of good correlation for edge-chipping size.

Key words : ferrite, thin diamond blade, edge-chipping, grinding force, grain density

1. 緒 言

電子・光学材料は一般に硬ぜい性材料が多く、それを所定の寸法に加工して機能素子とするには、薄刃ダイヤモンドブレードを使用して溝加工や切断加工を施さなければならない。しかし、砥石には各種のものがあり、使用する砥石によって加工特性(加工損傷等)が変わるのが普通で、最適な砥石を選定することは必ずしも容易ではない。そのため、何らかの合理的尺度で砥石の選定が行えれば都合がよい。

一般に、加工に供する硬ぜい性材料の材種によって、薄刃ダイヤモンドブレードのボンド材の材種を適宜変えている。例えば、磁気ヘッド用材料の一種であるフェライト(Mn-Zn多結晶)に溝・切断加工を施す場合、砥石としてメタルボンド砥石(M砥石)やレジン・メタルボンド砥石(MB砥石)、レジンボンド砥石(B砥石)を使用している。しかし、加工条件と砥石の材種(特にボンド材)によって、切断縁に発生するチッピング(エッジチッピングと呼ばれる)などの加工損傷が変わることが知られている。この加工損傷は、磁気ヘッドの電磁気特性を劣化させるばかりでなく歩どまりの低下も招来する。フェライトの溝加工や切断加工に伴って生じる加工損傷については、これまでも幾つかの報告¹⁾²⁾がなされている。しかし、砥石のボンド材がエッジチッピングなどにどのような影響を及ぼすのかまだあまり研究は進んでいない。

本報では、薄刃ダイヤモンドブレードを使用してフェライトに溝・切断加工を施した場合について、エッジチッピングがどのように発生するのか実験的視点から検討した。

2. 実験方法

2.1 溝加工条件

溝加工用薄刃砥石としては、M砥石、MB砥石、B砥石の3種類の砥石を使用した。実験は、#1500、#400の砥石を用いて行った。加工条件を表1に示す。実験に際して、初期条件を一定とするため、各実験ごとにGCボードを用いて砥石のツルーイングを行った。ツルーイング後の砥石の外周振れは $0.75 \pm 0.25 \mu\text{m}$ である。溝加工は、慣らし加工を行った後に行った。

研削抵抗の測定は、圧電型研削動力計(キスラー製9251A)を使用して行った。研削動力計の固有振動数は約28kHzである。この値は、砥石の回転速度(500Hz)に比して約1けた高い値であるので、砥石1回転当たりの研削抵抗の変動を検出することが可能である。一方、砥粒1個が加工物を削るときの周波数を計算すると、#1500砥石で1GHzオーダー、#400砥石で100MHzオーダーとなり、28kHzの値に比して格段に高い。したがって、砥粒1個当たりの研削抵抗を本研削動力計で直接検出することはできない。

2.2 砥粒密度の測定

薄刃ダイヤモンドブレードによる溝・切断加工は、砥石外周面にある個々の砥粒が切削作用を行うことによってなされる。エッジチッピングの発生の仕方は、これらの砥粒の切削作用状態に依存すると考えられる。そこで、加工損傷の発生機構を検討するため、砥石外周面の砥粒数を計測した。

測定は、表1の慣らし加工後に引っかき転写法³⁾を用いて行った。図1にその測定法を示す。i) 砥石の回転を止めて固定・静止させ、その状態のまま砥石を観察用試料(鏡面加工されたフェライトブロック)に押し付ける。押付け力は圧電型研削動力計で計測する。ii) 砥石を砥石回転軸の方向に少し動かし、引っかき痕を試料表面につける。iii) 引っかき痕の数を顕微鏡観察してカウントする。iv) 砥石とフェライトブロックの接触面積を求め、砥粒密度を算出する。

* 原稿受付 平成11年6月3日

** 正会員 (株)アルプス電気(現、(株)ユニオンツール:長岡市振田屋町字外川2706-6)

*** 正会員 金沢大学工学部(金沢市小立野2-40-20)

† 金沢大学大学院(現、石川県工業試験場:金沢市戸水口-1)

Table 1 Experimental conditions of grooving

Machine	Tokyo Seimitsu A-MD-2500B/C		
Blade Bond	Metal(M), Resinoid-Metal(MB), Resinoid(B)		
Grain Concentration	Diamond #1500, #400		
Size	φ54mm×t0.6mm		
Fluid	Water 1.7 l/min		
Revolution rate	500 1/s		
Workpiece	Mn-Zn polycrystalline ferrite (HIP)		
Truing	Use of GC#800 for #1500 blade		
Preliminary grinding #1500	Depth of cut : 0.75mm Grinding length : 500mm		
#400	Depth of cut : 0.75mm Grinding length : 1500mm		
	Measurement item	Depth of cut	Grinding length
Grooving	Chipping size Grinding force	0.5mm	15mm ×2 line

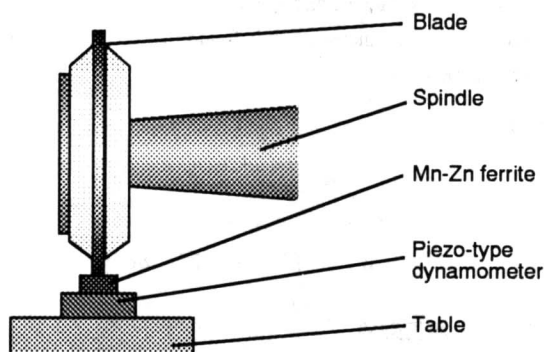


Fig.1 Scratching method

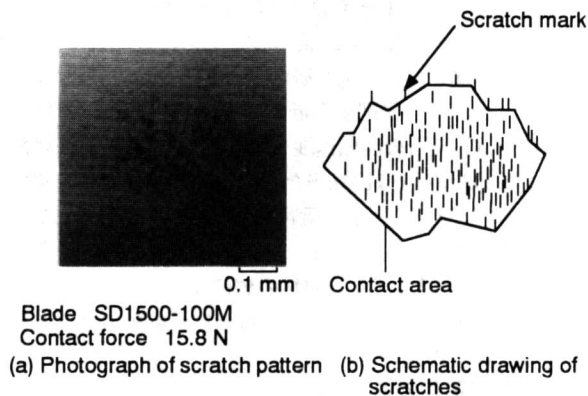


Fig.2 Scratch pattern of ferrite

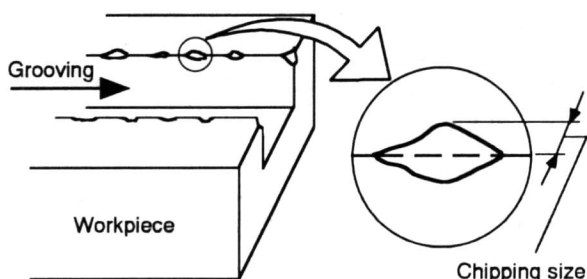


Fig.3 Schematic illustration of chipping size

図2(a)に、引っかき痕の光学顕微鏡写真を示す。図2(b)はその模式図である。砥石とフェライトブロックの接触面積は次のように求めた。図2(b)に示す最外周にある引っかき痕の一端をそれぞれ直線で結び、その直線で囲まれた領域を接触面積とした。

2.3 チッピングサイズの測定

加工に伴って生じるエッジチッピングの大きさ(チッピングサイズと呼ぶ)は、工具顕微鏡を用いて測定した。図3に、エッジチッピングの模式図を示す。測定は、同一条件で加工した2本の溝(溝の長さは15mm)について行った。観察は、溝に沿ってエッジ部を20か所(1か所あたり0.8mmの範囲)観察し、チッピングを測定した。そして、各箇所最大のチッピングサイズの平均値をもってチッピングの評価値とした。

3. 実験結果

3.1 砥粒密度

砥粒密度の測定結果を図4、図5にそれぞれ示す。図4は、砥粒粒度#1500の砥石の測定結果を、図5は#400の結果を表す。いずれの図も、縦軸は砥粒密度を表している。それは、観測された引っかき痕の数を砥石とフェライトが接触した面積で割った値である。一方、横軸は押付け圧力を表している。押付け荷重を接触面積で割った値である。

図4、図5から、押付け圧力が増すにつれて、砥粒密度が両対数グラフ上で直線的に増加することがわかる。しかし、砥粒径の違いにより砥粒密度の絶対値が著しく違う。また、いずれの砥粒径の場合でも、メタルボンド材の砥粒密度が最も小さく、次にレジンメタルボンド材、レジンボンド材の順に大きな値になることがわかる。

3.2 研削抵抗

図6に、フェライトに溝加工を施した場合の研削抵抗(法線

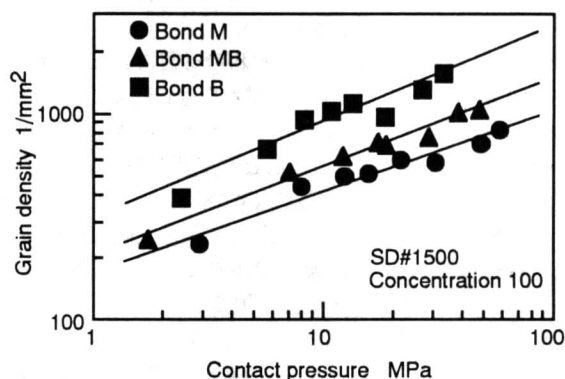


Fig.4 Relationship between grain density and contact pressure

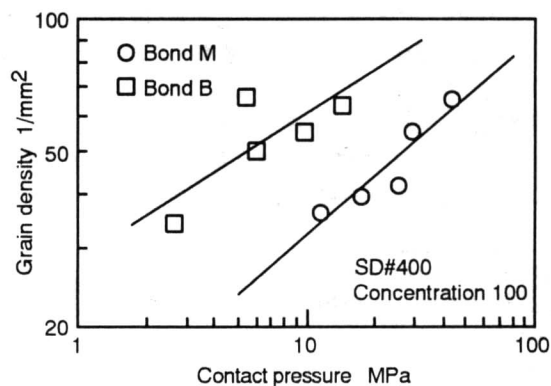


Fig.5 Relationship between grain density and contact pressure

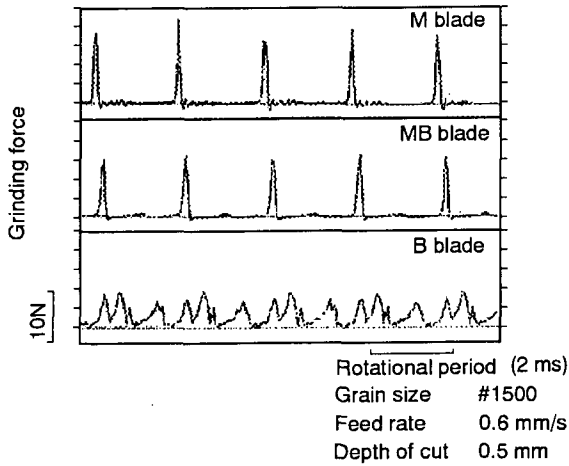


Fig.6 Signals of normal grinding force

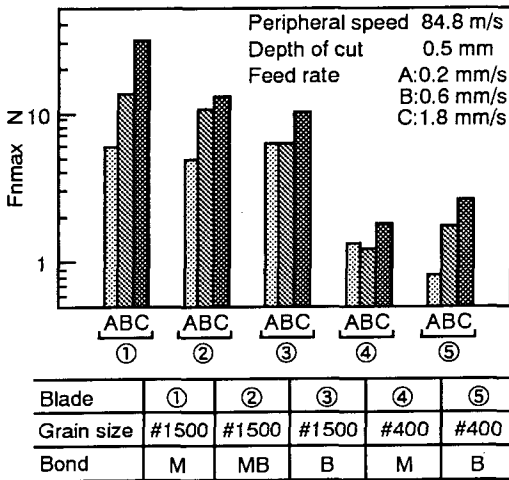


Fig.7 Effect of blade and feed rate on maximum normal grinding force

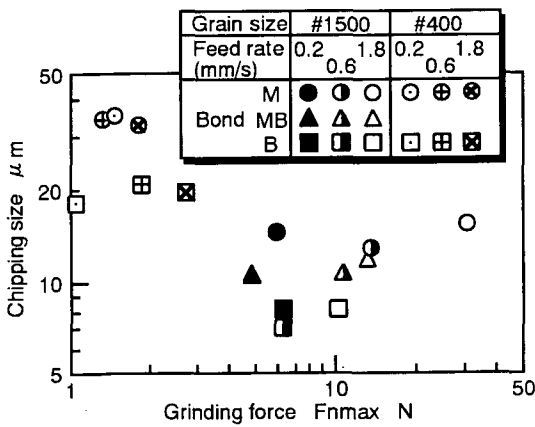


Fig.8 Effect of grinding force on chipping size

研削抵抗の測定結果の一例を示す。図6は、#1500の砥石に関する結果を表す。実験は、砥石の切込み量を0.5mm、テーブルの送り速度を0.6mm/sとして行った。図6から、ポンド材によって研削抵抗の出力波形が異なることがわかる。Mポンド砥石、MBポンド砥石の場合には、パルス状の出力波形が観察される。それらの波形はほぼ砥石の回転周期に同期する形で現れる。一方、Bポンド砥石の場合には、砥石が1回転する間に幾つものパルス波形が現れる。しかし、そのパルスのピーク値（出力強度）は前二者に比してかなり小さい。

研削抵抗の出力信号がパルス波形を示すのは、砥石外周面が一樣（全周に渡って）に加工物と干渉作用を営んでいないことを表している。いま、砥石を円盤状の剛体と仮定して、図6に示す条件の下で、研削が行われた場合について、砥石が全周に渡って加工物と干渉するための条件を計算してみた。その結果、砥石の外周振れ量を0.036 μm以下に押さえることが必要なことが明らかになった。しかし、実際に砥石の外周振れをそのような小さな値に制御することは一般に困難である。本実験の場合、ツルニング後の砥石外周振れ量は0.5~1 μmとなり、その他は0.036 μmに比べて1けた大きい。それにも関わらず、Bポンド砥石の場合には幾つものパルス波形が現れ、Mポンド砥石やMBポンド砥石の信号モードとかなり異なった形になった。これは、砥石外周振れの影響の外に、ポンド材の違いによって砥石と加工物との干渉の仕方（接触状態）が変わったためではないかと推察される。

ここで、波形のピーク出力の値を F_{max} と記し、その値を実測した結果を図7に示す。実験は、送り速度を0.2(A), 0.6(B), 1.8(C)mm/sと3通りに変えて行った。図7から、若干のばらつきはあるものの F_{max} の値は、Mポンド砥石が最も大きく、次にMBポンド砥石、Bポンド砥石の順に小さくなるのがわかる。一方、#400砥石の場合に関しては、B、Cの条件の下ではBポンド砥石の方がMポンド砥石よりも F_{max} 値が大きくなっている。これは、前述した砥石の外周振れの影響が現れたためと思われる。テーブルの送り速度が大きくなると、概して F_{max} の値も大きくなる。

3.3 チッピングサイズ

研削加工後に溝縁に生成するチッピングの大きさ（チッピングサイズ）と F_{max} の間にどのような関係が成り立つのか調べた。図8に測定結果を示す。図8から、チッピングサイズと F_{max} の間には明確な相関関係がないように思われる。

そこで、砥粒1個当たりの最大法線研削抵抗について考えてみることにする。法線研削抵抗の値が、砥石1周期内のピーク値 (F_{max}) に達したときの作用砥粒数を正確に測定するのは困難であるので、ここでは便宜的に図4、図5に示す測定結果を利用して求めた。次式で表される n の値を作用砥粒数とした。

$$n = \rho \cdot L_c \cdot B \quad (1)$$

ここで、 L_c は砥石と加工物の接触弧長さ、 B は砥石幅、 ρ は砥粒密度で、押付け圧力が $F_{max}/(L_c \cdot B)$ のときの値を表す。

いま、 F_{max} を n で割った値を f_{max} と記し、その値を砥粒1個当たりの最大法線研削抵抗の値と近似する。（厳密に言えば、

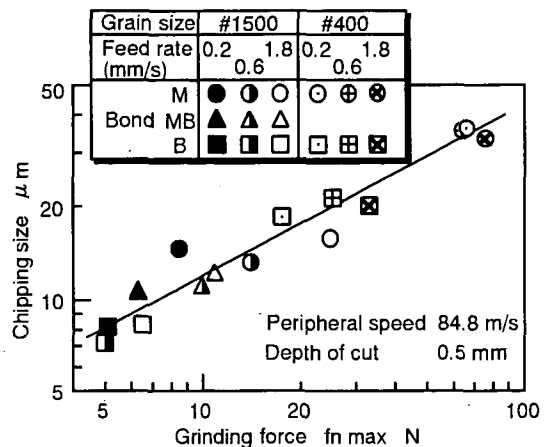


Fig.9 Effect of grinding force on chipping size

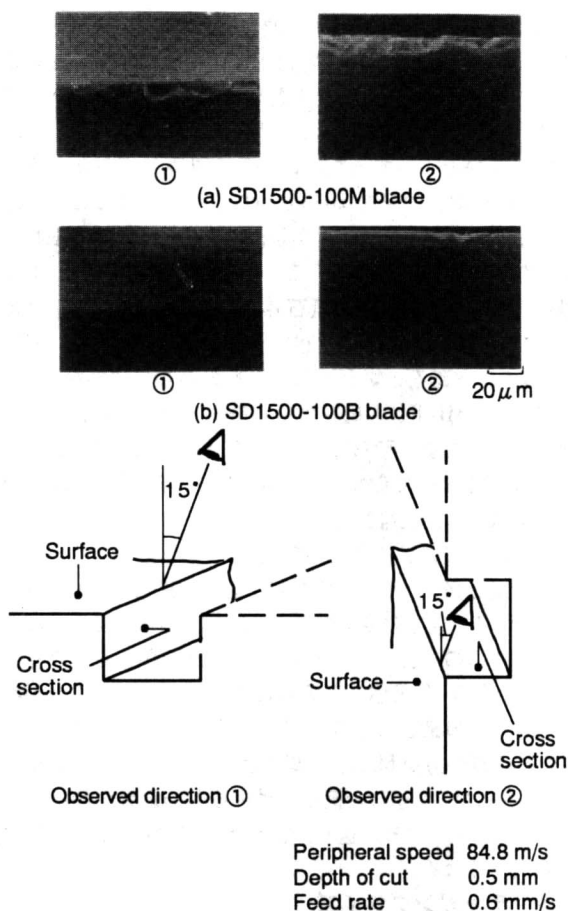


Fig.10 SEM photographs of grooved edge

F_{nmax} 値の中に加工物と砥石ボンド材の接触抵抗も入っているため、実際の砥粒1個当たり最大法線研削抵抗の値は f_{nmax} 値よりも小さいと考えられる。図9に、チップングサイズと f_{nmax} の関係を示す。図9から、チップングサイズと f_{nmax} の間には、両対数グラフ上で直線関係が成り立つことがわかる。

図10に溝縁部のSEM観察例を示す。図10はM砥石(#1500)とB砥石(#1500)とを対比して示しているが、両者でエッジチップングの様態に大きな違いがあることが認められる。すなわち、M砥石では溝縁に沿って比較的大きなチップングが連続的に生じているが、B砥石では溝縁に沿って離散的にチップングが生じており、その大きさも小さい。

図11に各種砥石の f_{nmax} の値を整理した結果を示す。M砥石、MB砥石、B砥石の順に f_{nmax} の値が小さくなることが認められる。例えば図10のM砥石(#1500, 送り0.6mm/s)とB砥石(#1500, 送り0.6mm/s)とを比較すると、後者の f_{nmax} の値は前者の1/3程度になっている。図10でエッジチップングの様態に大きな違いがみられたのは、このことが理由と考えられる。

4. 考 察

図8に示すように、チップングサイズと最大法線研削抵抗 F_{nmax} の間には明確な関係はみられないが、砥粒1個当たりの最大法線研削抵抗 f_{nmax} との間には両対数グラフ上で直線関係(図9)が成り立つことがわかった。これは次のような理由によるものと考えられる。

山川ら⁹⁾は、GC砥石を用いて硬ぜい性材料(超硬合金)の平面研削加工を行い、試料の端末部に生じる欠け(エッジチップング)の生成機構について、有限要素法を用いて理論的解析を行っている。そして、エッジチップングは端末部における砥粒

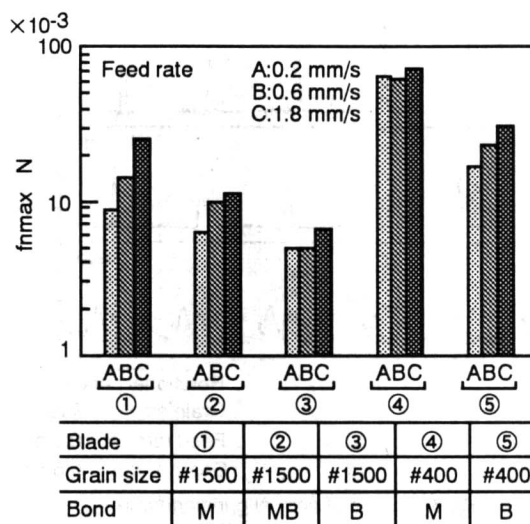


Fig.11 Effect of blade and feed rate on f_{nmax}

切れ刃近傍の応力状態に強く影響されることを明らかにしている。

薄刃ダイヤモンドブレードを用いてフェライトに溝加工を行ったとき、溝端末部に生じるエッジチップングも、山川らが指摘する機構によって起こるのではないかと考えられる。すなわち、砥石の切込みに伴って研削に参与する砥粒の切れ刃近傍では応力が誘起される。そして、砥石の回転に伴って砥粒切込み深さが次第に増加するにつれて、誘起される応力の値もますます大きくなる。砥粒が試料表面(溝縁)に近づくにつれて応力集中の影響でさらに切れ刃近傍の応力が大きくなり、その応力値が材料の破壊強度を越えるとそのところでき裂が発生し、欠けが生じることになる。 f_{nmax} の値が大きい場合、砥粒切れ刃近傍の応力も大きくなるから、溝縁からいくぶん離れた位置に砥粒が到達した段階でき裂が発生して、大きな欠けが生じるようになる。 f_{nmax} の値とチップングサイズとの間に明確な相関関係が成り立ったのは、このことが原因していると考えられる。

図11から、 f_{nmax} の値が砥石のボンド材種によって違うのは次の理由によるものと考えられる。 f_{nmax} の値は、 F_{nmax}/n で定義されているので、法線研削抵抗のピーク値 (F_{nmax}) が大きくなったり、砥石外周面の砥粒密度が小さくなると、 f_{nmax} の値が大きくなる。図4、図5、図7を通観すると、M砥石の場合は、他の砥石に比べて F_{nmax} の値が最も大きく、砥粒密度が最も小さい。逆に、B砥石では F_{nmax} の値が最も小さく砥粒密度が最も大きい。 f_{nmax} の値が、M砥石、MB砥石、B砥石の順に小さくなったのはこのことが原因していると考えられる。

図6から、砥石のボンド材種によって法線研削抵抗の波形が著しく異なる様子がみられた。すなわち、M砥石、MB砥石の場合には、砥石1回転当たりたった一つのパルス波形が現れるのに対して、B砥石の場合には、砥石1回転当たり幾つものパルス波形が現れた。これらの現象は、ツルーイング直後(砥石の外周振れ $0.75 \pm 0.25 \mu m$) の砥石の場合にも観測された。先に述べたように、これらの観察結果が得られたのは、砥石外周振れの影響の外にボンド材が異なることによって、砥石と加工物との接触状態が変わったためではないかと推察される。

一般に、砥石の弾性係数の値は、M砥石、MB砥石、B砥石の順に小さいと言われている⁹⁾。本研究で使用した砥石についてもそのことが当てはまるとすれば、B砥石の場合には、溝加工時に砥石が弾性変形して、砥石の外周振れの影響を幾分緩和させたのではないかと推察される。このため、M砥石やMB砥石

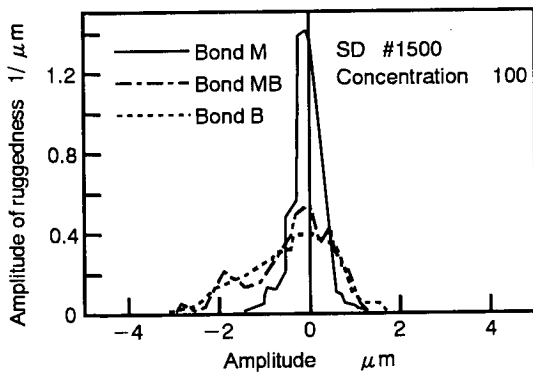


Fig.12 Distribution modes of wheel surface ruggedness after pre-grinding

に比べて、砥石1回転当たり加工に関与する砥石外周の長さが長くなり、幾つものパルス波形（法線研削抵抗）が現れたものと思われる。一方、 F_{nmax} の値が小さくなったのは、加工に関与する砥石外周長さが長くなることによって、砥石外周単位長さ当たりの除去量が小さくなったことが原因していると考えられる。

次に、砥粒密度について考えてみる。砥石外周面の砥粒密度は、砥粒の3次元分布形態と砥粒を保持する砥石の弾性に大きく影響を受けると言われている³⁾。そこで、砥石外周面の砥粒の分布状態を次の方法で調べてみた。慣らし加工後（砥粒密度測定前）の砥石外周面に高分子フィルム（トリアセチルセルロース）を押し当ててレプリカを採り、触針式粗さ計でそのレプリカフィルムの断面曲線を測定した。図12は、その断面曲線をもとに砥石外周面の振幅分布を求めたものである。分布密度の一番高いところを0レベルとして、右のプラス領域が凸側、左のマイナス領域が凹側を表している。分布曲線と横軸に囲まれる面積が1になるように縦軸を目盛っている。

図12から、M砥石、MB砥石、B砥石の順に砥石面の凹凸が大きくなっている。図1に示した砥粒密度測定法の場合には、砥石外周面の凹凸が小さい砥石ほど、砥粒密度の値が大きくなると思われる。しかし、図4に示す測定結果を見ると、予測と

は逆に、B砥石、MB砥石、M砥石の順に砥粒密度が小さくなっている。この実験結果から考えて、砥粒密度の測定結果（図4）には、砥粒を支持している砥石の弾性が強く影響を及ぼしていると思われる。すなわち、砥粒支持系の弾性変形量が、M砥石、MB砥石、B砥石の順に大きいことが測定結果に反映したものと考えられる。研削加工時にフェライトブロックに接触する砥粒の数は、砥石面の砥粒数（分布）を単に幾何学的に求めた値よりも砥石の弾性変形のみで多くなるものと推量される。

5. 結 論

フェライトに溝加工を施した場合、溝縁にエッジチップングがどのように発生するのか実験的検討を行った。その結果、以下の結論が得られた。

- (1) 砥粒密度や法線研削抵抗の値は、砥石の材種によって異なる。Mボンド砥石では、砥粒密度は小さく最大法線研削抵抗 F_{nmax} の値は大きい。一方、Bボンド砥石では砥粒密度は大きく F_{nmax} の値は小さい。また、砥粒1個当たりの最大法線研削抵抗 f_{nmax} の値はMボンド砥石、MBボンド砥石、Bボンド砥石の順に小さくなる。
- (2) チッピングサイズと f_{nmax} の値の間には両対数グラフ上でリニヤな関係があり、 f_{nmax} の値が増すにつれてチッピングサイズは大きくなる。

参 考 文 献

- 1) 蓮田裕一，貴志浩三：フェライトの溝研削におけるエッジ・チップングの創成，精密工学会誌，**62**, 4 (1996) 559.
- 2) 佐藤 彰，黒部利次，滝澤俊太郎：フェライトの微小破壊挙動と加工損傷，精密工学会誌，**65**, 2 (1999) 240.
- 3) 樋口誠宏，矢野章成，田中行雄：接触域における砥石弾性に関する一考察，精密機械，**43**, 7 (1977) 801.
- 4) 山川純次，井川直哉，河村末久，奥山繁樹：研削端末部の形状変化に関する研究（第5報），精密工学会誌，**55**, 11 (1989) 2005.
- 5) 佐藤 彰，黒部利次，広崎憲一：精密切断用薄刃ダイヤモンド砥石の機械的性質，精密工学会誌，**56**, 7 (1990) 1235.