

## Mn-Zn 系フェライトのラッピング加工に関する研究\*

(第1報, 削除率および加工面性状に及ぼす固定および遊離砥粒の影響)

峰 瞳<sup>\*1</sup>, 大渕 慶史<sup>\*1</sup> 松尾 哲夫<sup>\*1</sup>  
上田 昇<sup>\*2</sup>, 前田 成夫<sup>\*3</sup>

### Lapping of Mn-Zn Ferrite (1st Report, Effect of Fixed and Loose Abrasive Grains on Removal Rate and Surface Roughness)

Mutsumi TOUGE, Yoshifumi OHBUCHI, Tetsuo MATSUO,  
Noboru UEDA and Naruo MAEDA

This paper describes the effect of the motion of diamond grains on the material removal rate and surface roughness in the lapping of Mn-Zn polycrystalline ferrite using a Sn lapping plate and 0.3  $\mu\text{m}$  diamond abrasives. The diamond grains can be classified into fixed and loose grains. The grains fixed to a lapping plate were confirmed by SEM and AFM observations. Among many experimental parameters, the change of the pitch of fine grooves on a lapping plate formed by the facing operation has a significant effect on the removal rate. This agrees well with the calculated number of loose grains under various pitches of groove. The average removal rate with fixed and loose grains was found to be about 2.7 times higher than that with only fixed grains. These results indicate that during lapping, the material is mainly removed by loose grains. It is evident from AFM images that the lapped surface with material removed by fixed grains differs very much from that with material removed simultaneously by fixed and loose grains.

**Key Words:** Lapping, Abrasive Grain, Surface Roughness, Mn-Zn Ferrite, Removal Rate, Fixed Grain, Loose Grain, AFM

### 1. 緒 言

電子部品用材料である Mn-Zn 系フェライトは比抵抗や高周波特性が高く、硬度や耐摩耗性などの機械的特性も優れている。しかし、フェライトは高脆性材であるため、加工の際加工表面にマイクロクラックやチッピング<sup>(1)</sup>、加工変質層などが生じやすく、加工能率と品質面で問題となっている。現在、生産現場では鏡面を得るための最終加工として、ラッピングが広く行われている。一般に、ラッピングは数値では表せない現場的な経験やノウハウが蓄積された技術を多く含んでおり、また実験的なパラメータがあまりにも多い<sup>(2)</sup>ため、加工能率の向上を目指した実験や被削材除去機構の解明にはぼう大な労力が要求され、報告も少ないので現状である。また、最近ではラッピングにより得られる加工面性状や面粗さを所定の値に近づける要望も強く、そのための基礎的なデータが求められている。

そこで本研究では、はじめに加工能率の向上を目的とし、多くの実験上のパラメータのうち、削除率に特に大きな影響を及ぼすラップ定盤上の細かい溝<sup>(3)</sup>について注目し、削除率に及ぼす溝のピッチの影響を調べた。さらに、供給されたダイヤモンド砥粒の動きを固定砥粒と遊離砥粒<sup>(4)</sup>に分けて考え、定盤上の任意の領域に含まれる固定および遊離砥粒の個数を計算し、実験結果と比較検討した。次に、固定砥粒あるいは遊離砥粒によって創成される加工面性状を把握するため、固定砥粒あるいは遊離砥粒の動きを実験上分離した上で、それぞれによる削除率や加工面性状に及ぼす影響を原子間力顕微鏡(AFM)などを用いて追究した。

### 2. 実 験 方 法

本研究では、ラッピング装置として図 1 に模式的に示すような修正リング式ラップマスター(LAPOLISH-15)を用いた。4×15 mm の被削材(多結晶 Mn-Zn 系フェライト)を試料台に 6 枚貼り付け、修正リングを用い、一定荷重のもとでラッピングを行う方式となっている。主なラッピング条件を表 1 に示す。ラップ剤には研削液に平均粒径 0.3  $\mu\text{m}$ (実測値, duPont 製, 1/2  $\mu\text{m}$  と表示)のダイヤモンド砥粒を混合させ、濃度 0.15 wt.%とした液を用いた。ラッピングの進行に伴

\* 原稿受付 1994 年 9 月 16 日。

\*1 正員、熊本大学工学部 (■ 860 熊本市黒髪 2-39-1)。

\*2 正員、熊本大学地域共同研究センター(■ 861-22 熊本県上益城郡益城町田原 2081-7)。

\*3 九州松下電器(株) (■ 865-01 熊本県玉名郡菊水町大字高野字早菜摘原 1080)。

って発生する定盤(直径 380 mm)の変形を修正し、かつ平坦度を確保するため、先端半径 300  $\mu\text{m}$  のダイヤモンドバイトを用いてフェーシングを行った。このフェーシングにより定盤上に設けられるスパイラル状の細かい溝については 3・1 節で詳しく説明する。定盤上に埋め込まれた固定砥粒を直接 SEM および AFM で観察するため、ラップ定盤の一部( $\phi 8 \text{ mm}$ )を抜き取ることができる分割式ラップ定盤を製作し、実験に供した。

デジタルマイクロメータ(分解能 0.1  $\mu\text{m}$ )により加工前後の試料高さを測定し、削除率を計算した。また原子間力顕微鏡 [Atomic Force Microscope (AFM),  $Z$  方向分解能 0.01 nm,  $X, Y$  方向分解能 0.20 nm] により加工面性状を詳しく観察し、あわせて仕上げ面粗さを測定した。

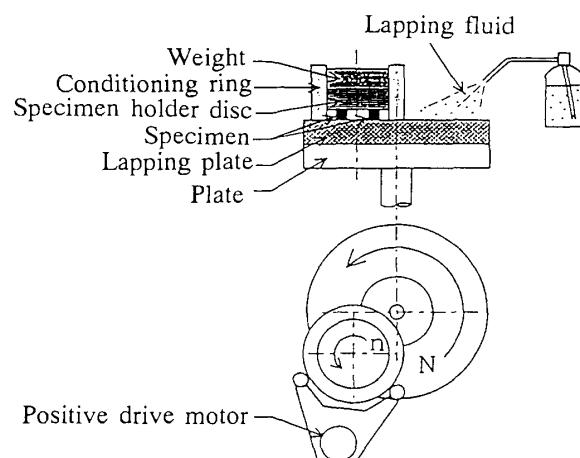


図 1 本研究で使用したラッピング装置の模式図

### 3. 実験結果および考察

**3・1 フェーシングによる溝形状と削除率に及ぼす影響** ラッピングにおける加工能率を示す削除率は多くの実験上のパラメータ、例えば定盤回転数、ラップ液濃度、圧力などの影響を受ける<sup>(2)</sup>。これらのパラメータの中で、上述のフェーシングにより定盤上に設けられる細かい溝のピッチは削除率に大きな影響を及ぼし、また被削材除去に関わる固定砥粒あるいは遊離砥粒の個数を考慮する場合、極めて重要な因子となる。そこで、ピッチと溝形状の関係を明らかにし、ピッチが削除率に及ぼす影響について調べた。なお、フェーシングにおける重要な設定値はダイヤモンドバイトの切込み、先端半径およびピッチ(定盤 1 回転当たりのバイト送り量)である。

図 2 は定盤の半径方向の任意断面を拡大して模式的に描いたものである。切込み一定のもとでピッチを変化させると、バイトの通過により形成される溝の交点の高さが切込みと一致する Stage II を境にして、Stage I および III に分けられる。Stage I では交点の高さは切込みより小さく、溝の両端には小さな山が形

表 1 実験条件

Workpiece	Mn-Zn Ferrite (Polycrystalline)
Material of lapping plate	Sn
Lapping abrasives	Diamond $d=0.3\times 10^{-6}\text{m}$ (0.3 $\mu\text{m}$ )
Lapping fluid	R-32 (Solution)
Revolution of lapping plate	$1.5\text{s}^{-1}$ {90 rpm}
Revolution of guide ring	$1.0\text{s}^{-1}$ {60 rpm}
Spray time	on-3s, off-20s
Lapping time	180s/1set {3min/1set}
Lapping pressure	41.6, 90.5kPa
Fraction of lapping abrasives	0.15wt%

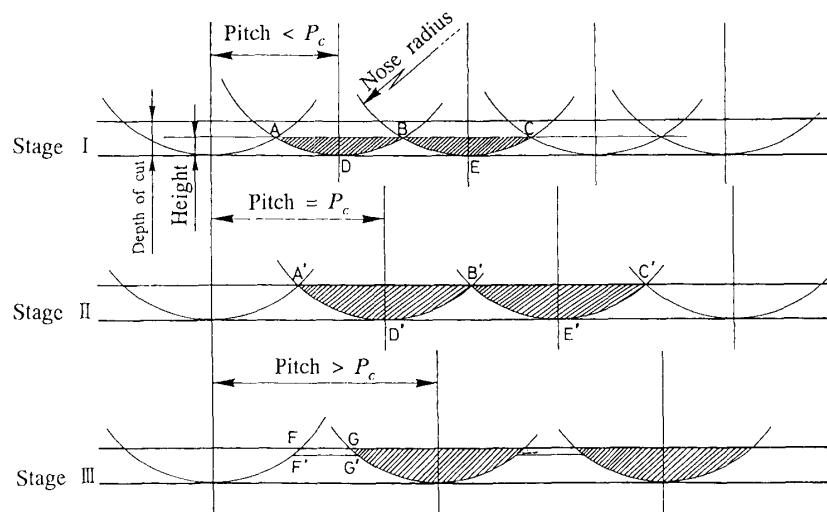


図 2 フェーシングにより定盤上に導入される細かい溝の模式図

成される。これに対して、Stage III では各溝の間に FG で示す平坦部が形成され、その高さは切込みに一致する。ここで、供給されるダイヤモンド砥粒が単純に固定砥粒と遊離砥粒に分かれて被削材除去に関わると考えると、Stage III の平坦部に固定化された(実際には埋め込まれた)ダイヤモンド砥粒が固定砥粒として働く。一方、図中斜線を施した溝の底部に溜まる(保持される)ラップ液中に含まれるダイヤモンド砥粒は遊離砥粒として働き、ラッピング加工中に被削材と平坦部の微小な間げきに供給される。したがって、削除率は固定砥粒と遊離砥粒の個数に、それぞれが加工に関わる確率を乗じた値の和に比例すると推察できるため、図 2 における平坦部 FG の幅および斜線部分の面積は重要な意味を持っている。

図 3 はラップ定盤上に任意の領域( $10 \times 10 \text{ mm}^2$  の正方形で、一辺は定盤の半径方向に平行)を想定し、その領域内に保持されるラップ液の量  $Q$  と平坦部の面積  $S$  についてピッチを変化させて計算したものである。参考のため、図 3 の下図にはそのときの溝の深さ  $d$  と平坦部の幅  $B$  を示している。なお、フェーシングにより平坦部の両側にばりが発生するが、通常、これらのばりは修正リングにより除去する。図 3 ではその深さを  $1 \mu\text{m}$  として計算している。例えば図 2 に示したように、このばり取りにより平坦部 FG は  $F'G'$  に変化し、高さが低くなるとともにその幅は若干広がる。

図 3 の条件(切込み  $30 \mu\text{m}$ )では、Stage II に相当す

るピッチ  $p_c$  は  $261 \mu\text{m}$  と計算される。ピッチが  $p_c$  より小さい Stage I の領域では、ピッチの増加に伴って溝の深さ  $d$  が大きくなるため溝に保持されるラップ液の量は増加する。平坦部の幅は図 2 より明らかのように減少し、任意の領域内に含まれる平坦部の面積も減少する。ピッチが  $p_c$  を越える(Stage III)と、溝の深さは一定となり、任意の領域における溝の本数はピッチの増加に伴って減少するため  $Q$  は減少する。一方、 $B$  は溝の間隔が増加するため大きくなり  $S$  も増加する。このように、 $Q$  と  $S$  は全く逆の変化を示すことがわかる。

上述の遊離砥粒および固定砥粒の個数が削除率に及ぼす影響について、図 3 を用いて数式化すると以下のようになる。

いま、平坦部に埋め込まれた固定砥粒の密度を  $C_f$ 、ラップ液中のダイヤモンド砥粒の密度を  $C_i$  とし、これらが被削材除去に関わる確率をそれぞれ  $\eta_1, \eta_2$  とすると、削除率  $Z$  は

$$\begin{aligned} Z &= \alpha_f \eta_1 C_f S + \alpha_i \eta_2 C_i Q \\ &= \alpha_f N_f + \alpha_i N_i \end{aligned} \quad \dots \quad (1)$$

と表される。ここに、 $\alpha_f$  および  $\alpha_i$  はそれぞれ固定砥粒および遊離砥粒 1 個の削除率、 $N_f, N_i$  は被削材除去に関わる固定および遊離砥粒の個数である。なお、式(1)は定常状態で成立すると考えられ、 $C_f$  は  $C_i$  の値(ラップ液の濃度に依存)およびラッピング開始からの経過時間により変化する。また、式(1)にはラップ定盤回転数、圧力などの因子は入っていないが、これらはいずれも被削材除去に関わる確率  $\eta_1, \eta_2$  に直接影響するものと推察される。

図 4 は削除率に及ぼすピッチの影響を調べたものである。ダイヤモンドバイトの設定切込み量および先端

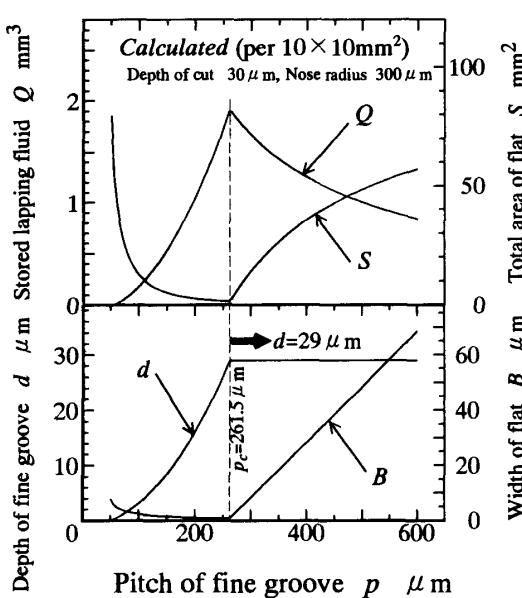


図 3 定盤上の任意の領域( $10 \times 10 \text{ mm}^2$ )内に保持されるラップ液の量および平坦部面積の計算値

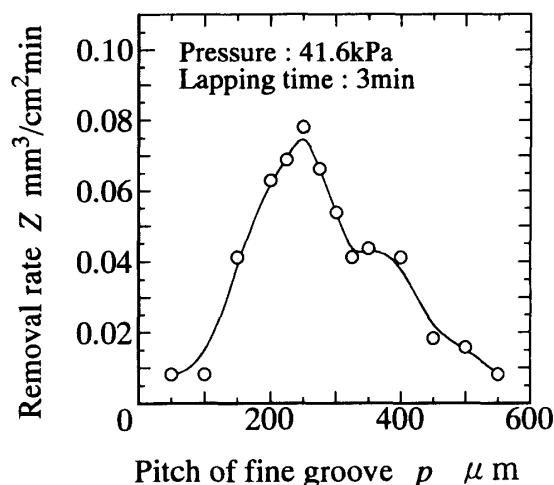


図 4 削除率に及ぼすピッチの影響

半径は 30  $\mu\text{m}$  および 300  $\mu\text{m}$  であり、図 3 と同じである。削除率は約 250  $\mu\text{m}$  を極大とする曲線となり、削除率はピッチの変化の影響を強く受けることがわかる。削除率が約 250  $\mu\text{m}$  で最大となることは、フェーシング時の切込みと溝の深さがほぼ一致し、しかも溝の本数が多いときに高い加工能率が得られることを示している。また、その曲線の形状は図 3 のラップ液の量のそれと極めてよく一致している。したがって、削除率はラップ液中に含まれる遊離砥粒の個数に大きく依存して変化することがわかる。このことは、本研究の実験条件の範囲内では、固定砥粒より遊離砥粒のほうが被削材除去により多く関わっていることを示している。

図 3 および図 4 より、 $S$  がもっとも小さい、すなわち平坦部がほとんど存在しない溝形状のときに加工能率が高くなる理由は以下のように考えられる。被削材-定盤間の相対速度が一定のもとで平坦部の幅が狭くなると、被削材-定盤間の間げきにおけるラップ液の流速が上昇し、遊離砥粒が被削材と衝突する頻度が高まったためと考えられる。これらには間げき部分におけるラップ液の流れの層流から乱流への変化や、二次元的な図 2 の概念を三次元的に問題を展開したときの流

れなどの問題も含めて、今後解明していく予定である。

**3・2 ラップ定盤上に埋め込まれた固定砥粒** 砥粒の埋め込み状態を観察するため、図 1 の実験装置において修正リングだけを定盤上で回転させ、ラップ液を修正リングの内側に噴霧しながら砥粒の埋め込み作業を 1800 s{30 min} 間行った。その後、分割式ラップ定盤により、平坦部に埋め込まれた固定砥粒を SEM および AFM で観察した。結果の一例を図 5 および図 6 に示す。図 5 は SEM で観察したもの [(c) の BEI は反射電子像] であり、直径 0.5~1.0  $\mu\text{m}$  の黒い点は固定砥粒としてラップ定盤の平坦部に埋め込まれたダイヤモンド砥粒と考えられる。埋め込まれた固定砥粒の密度は場所により若干差があるが、1.5~2.0 個/ $\mu\text{m}^2$  の範囲内であった。

この状態を AFM で観察したものが図 6 (a) および (b) である。図 6 (a) は測定領域を 10  $\mu\text{m}$  としたもので、また (b) は測定範囲を 1.6  $\mu\text{m}$  まで狭めたものである。(a) より多数の突出した部分が砥粒と考えられ、(b) よりダイヤモンド砥粒の突出し量は約 0.1~0.3  $\mu\text{m}$  程度であることがわかる。しかし、この AFM 像からはダイヤモンド砥粒と定盤の境界や埋め込みに伴う

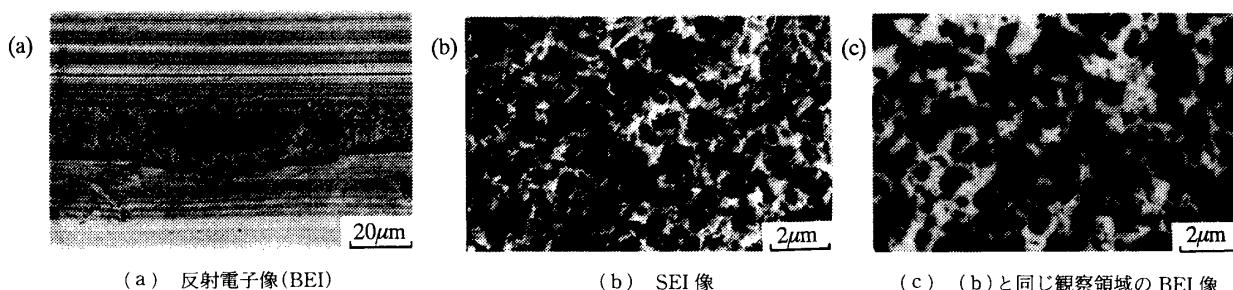


図 5 定盤上の平坦部に埋め込まれ、固定砥粒として働くダイヤモンド砥粒の SEM 写真  
(フェーシング条件：切込み 30  $\mu\text{m}$ 、ピッチ 400  $\mu\text{m}$ )

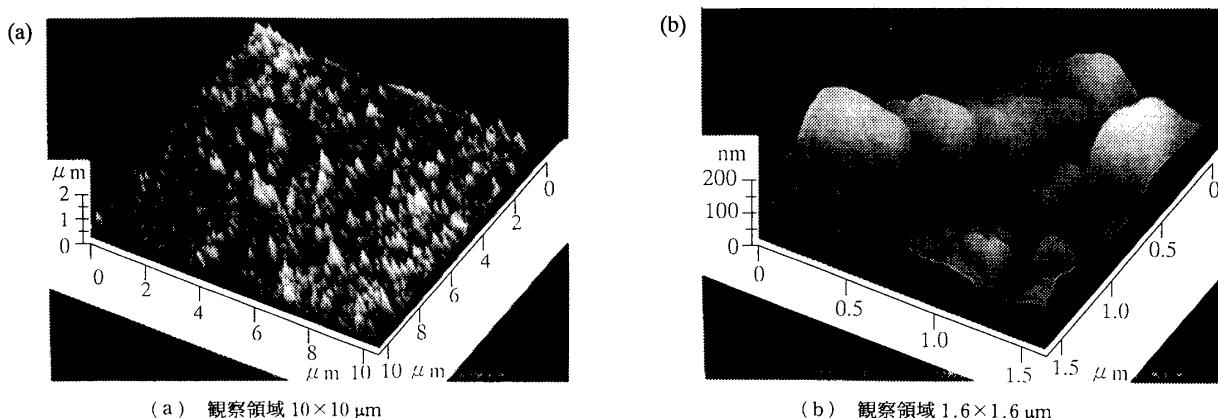


図 6 固定砥粒の AFM 像  
(フェーシング条件は図 5 と同じ)

定盤平坦面の変形までは明確にすることはできなかつた。

### 3・3 固定および遊離砥粒の個数シミュレーション

図5および図6より、平坦部に埋め込まれた固定砥粒の密度は $1.5\sim2.0\text{ 個}/\mu\text{m}^2$ であることがわかった。この値をもとに、図3で示した $10\times10\text{ mm}^2$ の任意の領域内に含まれる固定砥粒の個数を計算したのが図7である。なお、遊離砥粒の個数はダイヤモンド砥粒を直径 $0.3\mu\text{m}$ の球と近似し、比重、ラップ液の濃度から算出した。これから明らかのように、固定砥粒の個数は平坦部面積 $S$ が極小値を示すピッチ $260\mu\text{m}$ を極小とする曲線となるが、その個数は比較的多く、ピッチ約 $360\mu\text{m}$ 付近で計算上は遊離砥粒の個数と等しくなっている。

図7の計算結果と図4の削除率に及ぼすピッチの影響

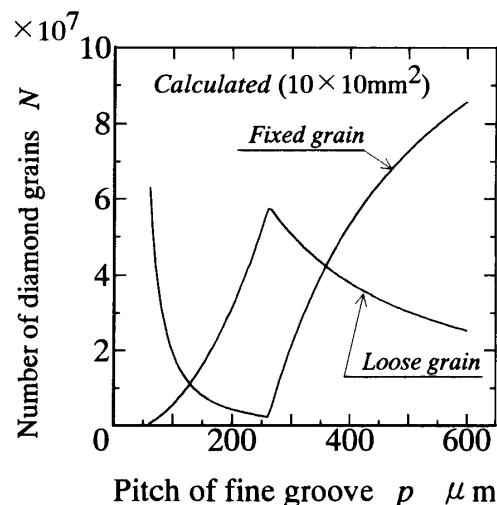


図7 ラップ定盤上の任意の領域内に含まれる固定および遊離砥粒の個数(計算値)

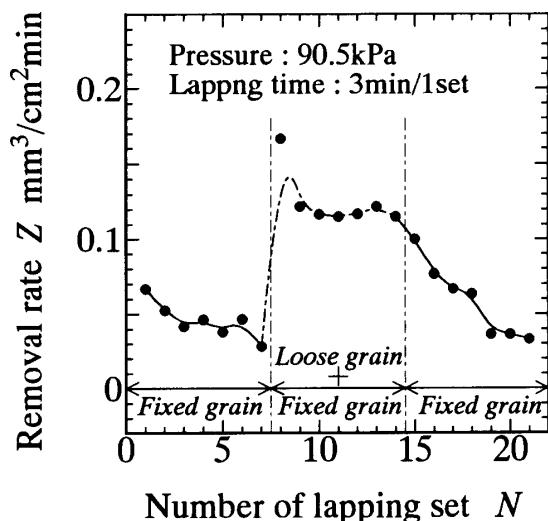


図8 削除率に及ぼす固定および遊離砥粒の影響

響を調べた実験結果を比較すると、削除率は遊離砥粒の個数と傾向が良く一致しているのがわかる。したがって、上述のように、被削材除去には遊離砥粒が多く関与していると考えることができる。式(1)で考えれば、固定砥粒が被削材除去に関わる確率 $\eta_1$ が小さく、 $N_f$ が少ないとになる。この原因の一つに被削材-定盤間の間げき量が比較的大きいことが考えられ、定盤回転数や被削材の強制駆動による自転数、あるいはラップ液の粘性率などを変化させ、この間隙量を小さくできれば、確率 $\eta_1$ は大きくなり、 $N_f$ の増加による削除率の増加が期待できる。したがって、設定したラッピング条件が式(1)の確率 $\eta_1$ や $\eta_2$ に及ぼす影響を明確にすることが今後の大きな課題と考えられる。

なお、図4ではフェーシング後のはり取りは行っているが、前もって $1800\text{ s}(30\text{ min})$ 間のダイヤモンド砥粒の埋め込みは行っておらず、ラッピング時間も $180\text{ s}(3\text{ min})$ と短い。のことから、固定化された砥粒の密度 $C_f$ が少ないとされることが考えられ、この結果からただちに被削材除去が遊離砥粒を主体として行われていると考えることには無理があるようと思われる。

**3・4 固定砥粒のみ、ならびに遊離砥粒を添加したときの削除率および加工面性状** 削除率、加工面性状に及ぼす固定および遊離砥粒の影響を明確にするため、以下の実験を行った。3・2節と同様に切込み $30\mu\text{m}$ 、ピッチ $400\mu\text{m}$ としてフェーシングを行った後、ダイヤモンド砥粒を定盤上に固定化し、1 set $180\text{ s}(3\text{ min})$ として各setごとの削除率および加工面性状を調べた。埋め込まれた固定砥粒のみによる被削材除去量を厳密に調べるために、各set間では定盤を水で洗浄し、定盤表面および溝部に残留する遊離砥粒(固定砥粒が脱落したものも含む)の影響をできるだけ除去した。そ

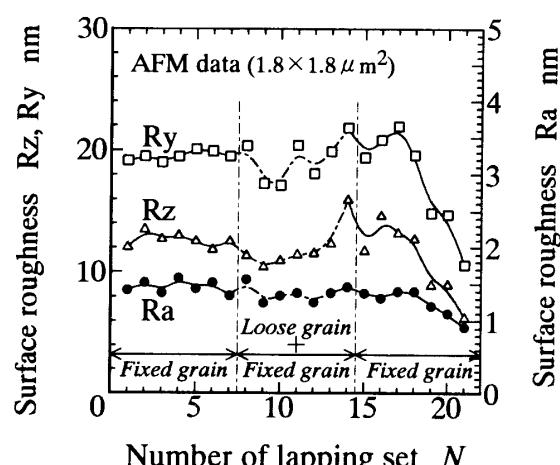


図9 仕上げ面粗さに及ぼす固定および遊離砥粒の影響

の結果を図8および図9に示す。なお、図9ではAFMにより加工面性状を観察し、同時に得られた面粗さデータを示している。ダイヤモンド砥粒は8~14 setのみ供給し、1~7 setおよび15~21 setではダイヤモンド砥粒を含んでいないラップ液を使用した。したがって、各setにおいては固定砥粒は被削材除去に関与しているが、遊離砥粒は8~14 setにおいてのみ作用している。

図8より、1~7 set(固定砥粒のみ)ではset数の増加とともに削除率は低下している。そのときの仕上げ面粗さを見ると、 $R_a$ は1.4~1.5 nmの範囲にあり、 $R_z$ ,  $R_y$ にもそれほど大きな変化は見られない。これはこの過程で固定砥粒の脱落、砥粒先端の摩耗、あるいは柔らかいスズ定盤への押し込みによる突出し量の低下が起こり、削除率が低下したものと考えられる。しかし、仕上げ面粗さが良くならないのは固定砥粒の密度低下にもかかわらず、依然として突出し量の大きな固定砥粒が残留しているためと考えられる。このことは図10に示す6 set時のAFM像からわかるように、固定砥粒によると考えられる深さ10 nm程度の直線

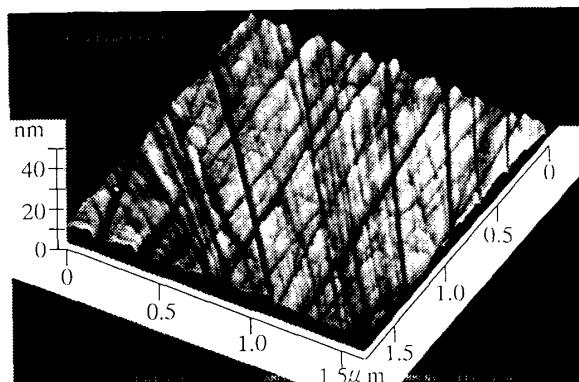


図10 固定砥粒のみによりラッピングされた加工面のAFM像( $N=6$  set,  $R_a=1.34$  nm,  $R_{\max}=16.9$  nm)

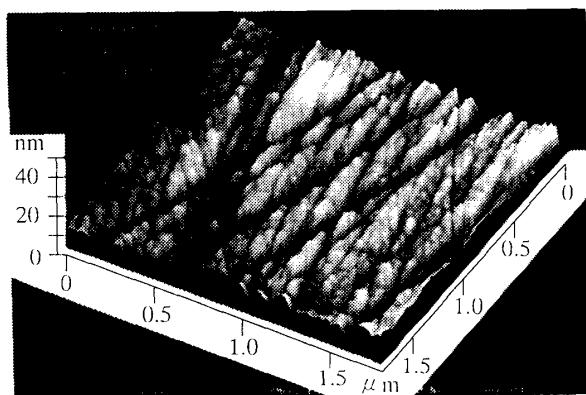


図11 固定および遊離砥粒が同時に使用したときの加工面のAFM像( $R_a=0.90$  nm,  $R_{\max}=10.8$  nm)

状の微小な溝が多く認められることからも確認できる。

8~14 set(固定砥粒のみの状態に遊離砥粒を供給)における削除率の平均値は固定砥粒のみの場合(1~7 set)の平均値と比べて約2.7倍増加し、削除率に及ぼす遊離砥粒の効果は極めて大きいことがわかる。このことは図3, 4および図7の結果と良く一致している。仕上げ面粗さは $R_a$ がわずかに向上するが、 $R_z$ ,  $R_y$ は大きな変動を伴いながら全体的には若干悪くなっている。15 set以降、遊離砥粒の供給を停止すると削除率は次第に減少している。このときの仕上げ面粗さは急速に良くなっている。この段階で面粗さが良くなるのは、埋め込み初期に存在した突出し量の大きな砥粒が8~14 setの間で脱落するか、定盤内にさらに押し込められ、砥粒の突出し高さが揃ってきたためと考えられる。

図9で観察した一連のAFM像(観察領域 $1.8 \times 1.8 \mu\text{m}$ )のうち代表的なものを図10~12に示す。図10は上述のとおりであるが、直線的な微小な溝の存在と平坦部との境界部(肩部)が鋭利であることが特徴として挙げられる。これに対して、図11(8 set)では、遊離砥粒を加えたため微小な溝の深さは8 nmまで減少し、平坦部の肩部の形状は滑らかになり、全体的にも柔らかい面性状になっている。これは図8より削除率が増加していることから、全体的によく削られ、平坦部と微小な溝の相対的な段差がなくなったためと説明できる。図12の21 setのものでは、微小な溝の深さは5 nmと小さくなり、その密度も減少している。したがって、これらのAFM像から、固定砥粒の突出し量はset数の増加とともに減少し、被削材を除去できる時間、すなわち固定砥粒の寿命は比較的短いことがわかる。また、式(1)の $\eta_1$ ,  $\eta_2$ が実験上のパラメータを変

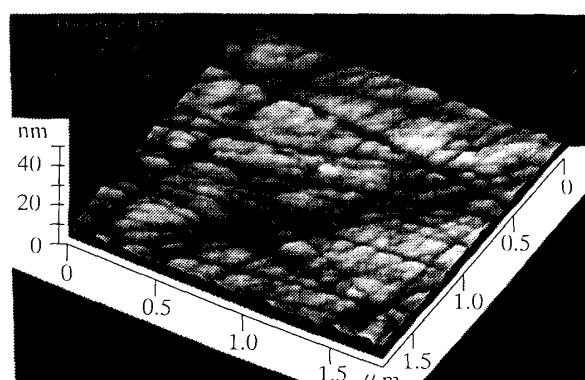


図12 固定砥粒のみによりラッピングされた加工面のAFM像( $N=21$  set,  $R_a=0.90$  nm,  $R_{\max}=10.8$  nm)

化させることにより増減できることが明確になれば、ラッピングされた加工表面を要求される加工面性状に近づけることが可能となると考えられる。

#### 4. 結 言

電子部品用材料である Mn-Zn 系フェライトをラッピング加工し、削除率に及ぼす溝のピッチおよび形状の影響、ならびに削除率および加工面性状に及ぼす固定および遊離砥粒の影響を明らかにした。以下に、得られた主な結果を示す。

(1) 削除率はフェーシングにより定盤に設けられる細かい溝のピッチおよびその形状の影響を受け、溝の深さが最大で、かつ溝の本数が多いときに最大となる。

(2) 定盤上の任意の領域内に含まれる固定および遊離砥粒の個数に関する計算結果および固定砥粒のみによる削除率の測定結果は、いずれも被削材除去には遊離砥粒がより多く関わっていることを示す。

(3) AFM を用いた加工面観察により、固定砥粒のみのときの加工面は直線状の微小な溝が多く認められた。遊離砥粒を添加すると溝の深さは減少し、溝の肩部の形状も滑らかになり、固定砥粒のみのときの加工面性状とは著しい違いがある。

(4) 埋め込まれた固定砥粒は加工時間とともに砥粒先端部の摩耗が進行し、また一部脱落するため、被削材を除去できる時間(寿命)は比較的短い。

#### 文 献

- (1) Ohbuchi, Y., ほか 8 名, Chipping Generation Mechanism in Slot Grinding of Ferrite, *Int. J. JSPE*, 28-1 (1994), 43.
- (2) Touge, M., ほか 3 名, Studies on Lapping of Mn-Zn Ferrite, *Proc. Int. Conf. Machining Technology in Asia & Pacific Regions*, (1993), 164.
- (3) 落合・ほか 2 名, 異種材料間の加工段差, 精密工学会誌, 59-4 (1993), 643.
- (4) Hagiuda, Y., ほか 2 名, Manufacturing of a Sintered Cast Iron Lapping Plate with Fixed Abrasives and its Lapping Abilities, *CIRP Ann.*, 30-1 (1981), 227.