



Mn-Zn フェライトの溝加工における チッピング発生機構 (第1報)*

——チッピングの定量的測定——

大 渕 慶 史** 西 健 治** 松 尾 哲 夫**
上 田 昇*** 峠 睦** 坂 田 稔†

Chipping Mechanism in Slot Grinding of Mn-Zn Ferrite (1st Report)
—Quantitative Measurement of Chipping—

Yoshifumi OHBUCHI, Kenji NISHI, Tetsuo MATSUO
Noboru UEDA, Mutsumi TOUGE and Minoru SAKATA

Mn-Zn(Manganese-Zinc) ferrite polycrystals have been widely used as a core material of magnetic heads in video cassette recorders or floppy disk drives of personal computers. In this research, slot grinding was performed to investigate the chipping generation mechanism at slot edge of Mn-Zn ferrite polycrystal with metal bonded diamond wheels. A high precision slicing machine with an air spindle of low friction and low thermal expansion was used. After grinding, the chippings at a slot edge was measured by means of a form tracer with a knife edge tip, and analyzed with a newly developed measurement method using a personal computer under various grinding conditions. On the other hand, by means of SEM observation, a material removal mechanism at the edge of Mn-Zn ferrite was investigated. The results are follows. Pre-process, such as lapping, before grinding can reduce chipping size. Most of chipping is generated by transgranular fracture. As chipping size depends on the removal per grain; $q_w = a \cdot \mu^2 (V_w/V_s)$, a decrease in removal q_w , chipping size after slot grinding could be reduced.

Key words : manganese-zinc ferrite, slot grinding, diamond wheel, chipping

1. 緒 言

高い周波数領域で優れた磁気特性を示すMn-Znフェライトは、ビデオカセットレコーダやパーソナルコンピュータの普及に伴い高密度記録用の磁気ヘッドとして広く用いられている。

現在、フェライトの加工は、ダイヤモンドホイールによる研削、ラッピング、ポリシングによって行われているが、生産性の向上のため、研削のみでラッピング仕上げ程度まで加工するラップレス化の検討がなされている。ここに、磁気ヘッドの更なる高精度化・高密度化に対応した加工技術の向上も要求されている。

フェライト磁気ヘッド加工工程の主だったものとして、素材の切断、トラック幅加工、巻線・ガラス溝加工、スライシングの工程がある。その中で特に重要なのがトラック幅加工（溝入れ）とスライシングである。しかし、一般にフェライトのような硬ぜい材料の研削では金属材料に比べ高効率かつ高精度な加工は困難であり、材料内部に生じるクラックやチッピングなど克服すべき課題が多い。磁気ヘッドの加工においては、トラック幅加工、すなわち溝入れの工程がヘッドの性能を左右し、この溝エッジ部に発生するチッピングは製品欠陥などの原因となるため、面記録密度の向上に伴うトラック幅の狭小化と共に加工はますます困難を極めているのが現状である。

しかしながら、フェライトの研削についての報告はまだ少ない¹⁾²⁾。硬ぜい材料の溝研削加工や研削切断におけるチッピングの発生に関する報告があるが³⁻⁵⁾、チッピングの抑制についての研究はあまり見られない⁵⁾。また、チッピングの測定は主

に顕微鏡観察によって行われ、個々のチッピングの長さ、幅等がある値以上のものを有する製品が不良と判断されているのが現状である。しかし、チッピングの発生自体が確率的なものと考えられるため、この方法では時間がかかる上にチッピング発生状態の定量的な評価が出来ない。このことはこれまでチッピング発生メカニズムを解明する妨げにもなっていた。

そこで、本研究は、ダイヤモンドホイールを用いてフェライトの溝研削加工を行った場合に発生するチッピングを定量的に評価する方法を考案し、実際の加工におけるチッピング発生状態を測定し、その妥当性を確かめた。また種々の要因と加工条件について検討を行い、チッピングの抑制を実現するための加工条件を予測するために、広範囲にわたる加工条件の下にチッピング発生メカニズムを調べた。

2. 実験方法および実験条件

溝研削加工には主軸にエアスピンドルを持つスライシングマシン (TSSK-2510B型、東京精機工作所) を使用した。被削材をテーブル上のジグの上にワックスで固定し、ダウンカットのクリープフィード研削で、1パスで1本の溝を成形する。

フェライトは一般に急激な温度変化に弱く30°C程度の温度変化によってもクラックを生じ破壊するため、潤滑作用よりも冷却作用が非常に重要となる。そのため加工液には冷却作用の優れたソリューションタイプを使用した。

ホイールの振れやアンバランスは、研削性能に大きな影響を及ぼす要因として考えられ、特にセラミックスのような硬ぜい材料の場合には、不測の切込みやたたきの原因となり、クラックやチッピングが多く発生する結果を招く。また、加工精度を悪化させるばかりでなく、砥粒の脱落やホイールの片減りを起こしたり、研削盤のスピンドルの損傷や軸受の寿命が短くなるなどの問題が起こる。そこで、この対策のためにフランジおよ

* 原稿受付 平成7年1月5日

** 正 会 員 熊本大学工学部 (熊本市黒髪2-39-1)

*** 正 会 員 熊本大学地域共同研究センター (熊本県上益城郡益城町田原2081-7)

+ 正 会 員 九州松下電器㈱ (熊本県玉名郡菊水町高野字早葉摘原1080)

Table 1 Experimental conditions

Wheel type	SD270N100M SD600N100M SD1000N100M
Work material	Mn-Zn Ferrite
(size)	(87 ^D -2 ^T -3.5 ^X -25.4 ^H mm)
(size)	(33×30×4 mm)
Grinding form	Down cut
Grinding fluid	Solution type
Wheel speed: V_s	18.2 - 59.2 m/s
Work speed: V_w	50 - 250 mm/min
Depth of cut: a	1.5 mm

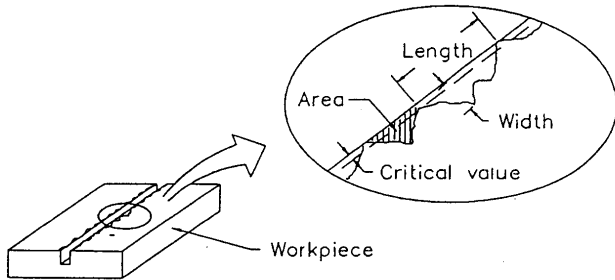


Fig.1 Edge chipping and definition of chipping size

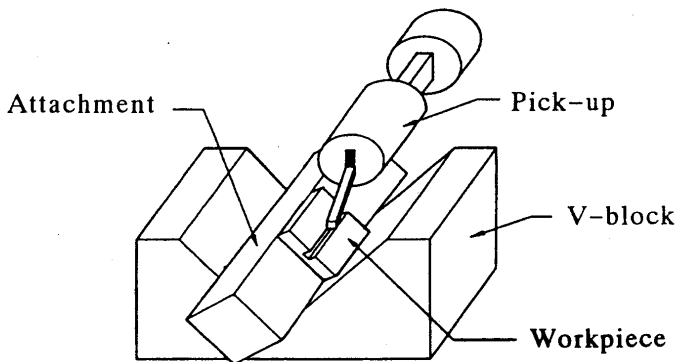


Fig.2 Measurement of chipping

びバランスをアルミニウム合金で製作し、フランジは主軸に接着固定後に機上でホイールとの接触面を切削加工し、スピンドルとの垂直を出した。バランスはフランジと共に主軸に取り付け、円周部の穴に取り付けたねじにより動バランスの調整を行った。ドレッシングはGC砥石のスティックを研削することで行い、ツルイニングには駆動回転ドレッシング装置（RD-IVH, ㈱エフエスケ）を使用した。

ダイヤモンドホイールは #270, #600, #1000 の3種類を使用した。なお、未使用の新品のホイールではドレッシング後もホイール表面に異常突起した砥粒が残るため、研削開始直後から研削距離500mmあたりまでは最大チッピング深さ100 μ m以上のかかなり大きい値を示すが、その後は安定する傾向がみられることが予備実験により確認された。このため、実験前に600mm以上の研削を行ったものを使用した。

被削材についても、予備実験により密度の違う2種類のHIP材およびホットプレス材を比較し、有意差があることが確認されたため、チッピングの発生が一番少ないHIP材(密度5.3 g/cm³)を使用した。本実験では前加工の影響をみるために超精密研削加工とラッピング加工を表面に施したものを使用した。実験は、被削材前加工とホイールの粒度および加工条件に対し、チッピング発生状態の比較を行った。表1に実験条件の詳細を示す。

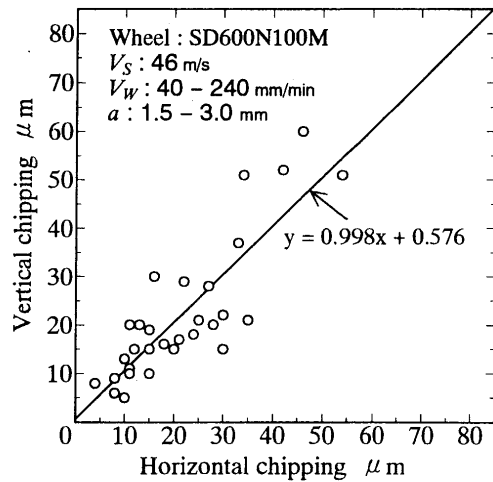


Fig.3 Relation between horizontal and vertical chipping size

3. チッピングの測定方法

チッピング名称についての概略を図1に示す。チッピング測定は図2に示すように加工後の被削材をVブロック上で45°に傾け、ナイフエッジ型ピックアップを取り付けた表面粗さ計（SE-3型, ㈱小坂研究所）でトレースすることによって行った。粗さ計からのプロフィールライン信号をA/Dボードを介してパソコンに取り込み、後に述べる方法で解析した。測定時のトレース速度は0.2mm/sで、サンプリング間隔を20msとすることで4 μ mごとのサンプリングとなり、フレーム長8192で約33mm分のデータが取り込める。

チッピングの深さは、チッピングが全く発生しない時に創生されるであろう溝コーナーのエッジを基準としているので、基準線を明確にしておく必要がある。そのため、取り込んだデータに傾き補正を施した後、凹凸の山の最も高い2点を結んだ直線が基準線と一致すると仮定した。極端な加工条件を除けば、チッピングが無い理想的なエッジに極めて近い部分が相当残っていることが顕微鏡観察で確認され、測定においても最も高い部分は同じ高さで複数個存在したため基準線の設定に問題はないと思われる。

実際はすべてのチッピングが必ずしも材料表面から45°方向に発生するわけではないが、生成された溝と垂直方向の断面の顕微鏡観察によりほぼ45°方向に発生していることを確認した。また、図3は数種の切込みとテーブル送り速度で溝加工を行い、発生した同一のチッピングに対して溝表面と側面から顕微鏡観察で幅を測定した結果である。多少のばらつきはあるものの、いずれの条件においても2方向からの測定は近い値を示し、チッピングは45°に近い方向に発生していることが分かる。さらに、粗さ計により取り込んだデータを顕微鏡観察の結果と比較したところ、測定された45°方向のチッピング深さに $\sqrt{2}$ を乗じた値と材料表面のチッピング幅は良い対応をみせた。

実際の測定では図4に示すように、エッジ基準面から下方に臨界値を設定しプロフィールラインが臨界線を下方に超え、再び上方に超えるまでを1個のチッピングとして定義し、図のA-Bをチッピング長さ、A-B間で基準面から最も深い点までをチッピング幅、A-B間の面積をチッピング面積として、測定長さ内に含まれるすべてのチッピングについてこれらの値を求め、さらにこの中でチッピング長さ・幅・面積についてそれぞれ平均値・最大値・合計値、およびその分布を算出する。また

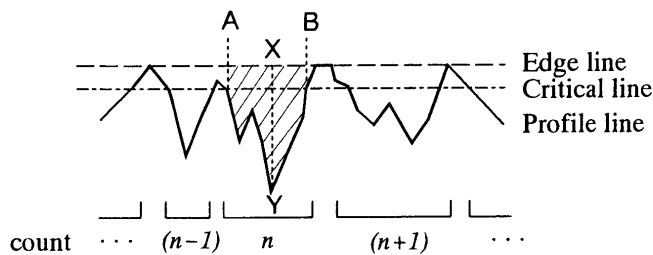


Fig.4 Definition of chipping

チッピング長さや面積についてはトータルの値も求めるようにした。なお、以下で用いるチッピング幅は図3の場合と異なり45°方向に測定した深さで置き換えたものである。

ただし、このチッピングのカウント方法では、臨界値の取り方により、複数のチッピングをひとつと見なす場合や、その逆の場合もあるため、チッピング数、個々のチッピング長さ、個々の面積は臨界値の取り方で大きく影響を受ける。そのためこれらの値は今回の評価対象からは除外した。

臨界値および解析長さは任意に設定可能であるが、予備実験によりチッピング数を精度よく反映する臨界値2.4 μm を採用し、解析長さはピックアップの形状の制限より15mmとした。そのため、測定時間は75秒で、データの取り込み後直ちに解析プログラムによりチッピングの各特性値を得ることができる。

図5は、測定結果の一例を示したものである。2つの加工条件に対して測定されたプロフィールラインとそれに対する各チッピングの測定項目の値が顕微鏡写真とともに示されている。それぞれの波形に対して、妥当な測定結果の値であると考えられ、本方法による測定はチッピングの定量的評価を可能にするものであると言える。なお、チッピング数に関しては測定長さが同一であるため、大きなチッピングが発生する場合の方が個数が小さくなっていることに留意されたい。

4. 結果および考察

図6は、#270と#1000のホイールを用いて、溝研削に先立ち表面を荒研削したもの($R_a=480\text{nm}$)とラッピングを施したもの($R_a=2\text{nm}$)についてチッピング深さの発生頻度を示したものである。テーブル送り速度(100mm/min)とホイール周速度

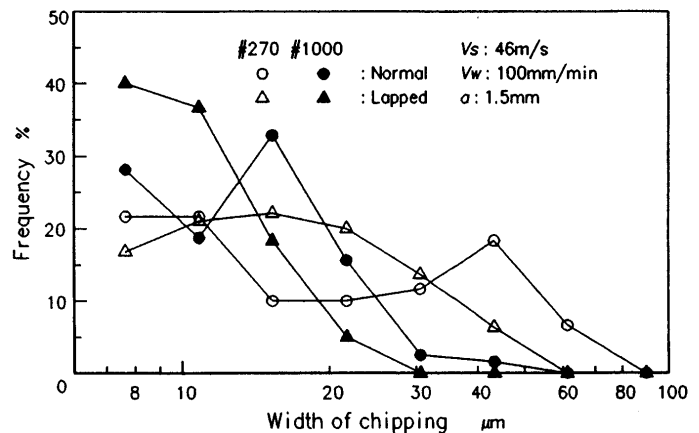


Fig.6 Frequency of chipping

(46m/s)は一定である。表面にラッピング処理を施していないものは、深さが58~82 μm とかなり大きいチッピングが5%ほど発生しており、41~58 μm のものも14%ほど発生していることがわかる。それに対して、ラッピングを施したものは、発生しているのは深さが41~58 μm までであり、その頻度も5%ほどである。これより、ラッピングを施したほうがチッピング深さの小さいものが発生していることが分かる。#1000のホイールによるチッピング深さでは、表面処理を施していないものは最大41~58 μm のものが発生しているのに対して、ラッピングを施した方は最大20~28 μm までしか発生していない。また、14 μm 以上の範囲でも表面処理を施していないものは発生頻度は高く、明らかにラッピングを施したほうがチッピング深さは小さくなっている。これらのことより、ラッピングを施すことはチッピング抑制に著しい効果があると思われる。

表面処理を施していないものは、前工程の研削条痕が肉眼でもはっきりとわかるほど残っているが、この被削材に微粒砥粒カップ砥石を用いて精密研削加工仕上げを行い($R_a=16\text{nm}$)#600のホイールで同一の実験を行ったものを図7に示す。超精密研削を施した表面は鏡面状態で、肉眼ではラッピングを施したものと区別するのは難しいほどであったが、チッピングの発生頻度は荒研削した場合と比較して有意差は認められなかった。そのため、表面粗さの違いよりも、加工方法の影響が大きく、低い加工速度や遊離砥粒の作用による内部クラックの発生の有

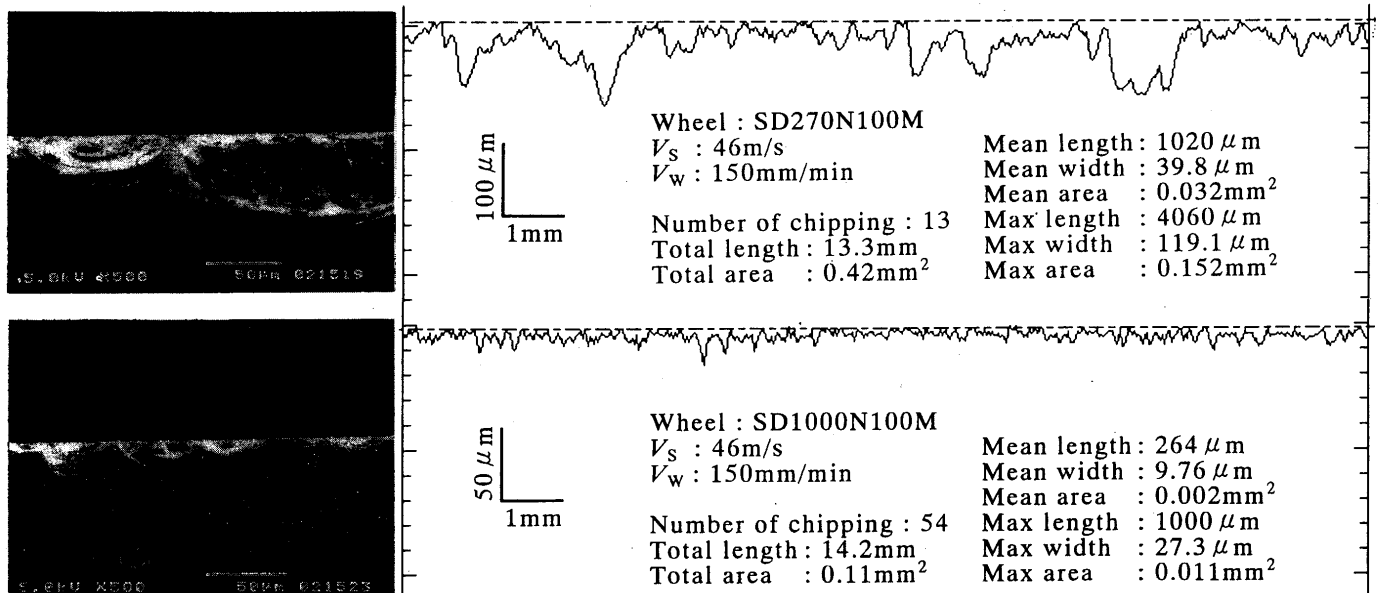


Fig.5 Sample of chipping measurement

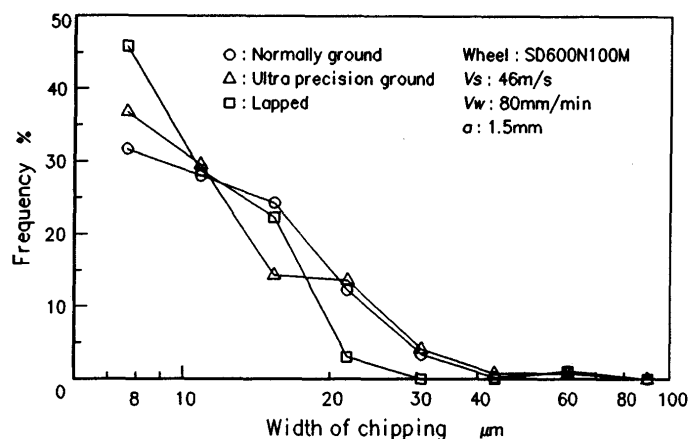


Fig.7 Frequency of chipping

無が大きく影響していると考えられる。

チッピングは同一条件で加工を行っても、材料の欠陥、ホイールのふれ、ホイールの状態、機械の振動、その他の要因で多少のばらつきが必ず生じる。しかし、そのばらつきが大き過ぎると傾向そのものがばらつきに埋もれてしまう結果となる。よって、このばらつきを最小限に抑えることが必要である。ラッピングを施すことによりこのばらつきが生じる要因となる表面状態の影響を取り去ることが可能であると思われる。また、それはチッピングの抑制にもつながると考えられる。よって今後の実験では、被削材はすべてラッピングを施したものを採用する。

また、図6より#270と#1000のチッピング深さの発生頻度を比較してみると、#1000では深さが最大20~28μmのものまでしか発生していないのに対して、#270では最大41~58μmのものまで発生しており、明らかに#1000の方が小さいチッピングが発生している。ホイールの粒径が小さくなるとチッピングも小さくなることが分かる。これは粒径が小さくなると、砥粒切れ刃の切込みが小さくなり、研削抵抗が減少するためであると思われる。

図8は、各テーブル送り速度(20~250mm/min)における溝エッジ部のチッピングのSEM観察写真を示したものである。ホイール周速度(46m/s)は一定である。写真のフェライトは溝研削加工を行った後でエッチングしたもので、亀甲状に現れているものがフェライトの結晶粒である。これまでの研究で予想されていたとおり、チッピングは粒界破壊よりも粒内破壊によって発生している場合が多く、どの条件においてもほとんどを粒内破壊が占めていることがこれらの写真からわかる。焼結方法などの違いによっても材料の粒界の強さは異なるが、本実験で用いたフェライトはホットプレスの後にHIP焼結を行ったものであるから、粒界はかなり強いと考えられる。粒界の強さは常温において一般に粒内よりも高いが、非晶質であるため高

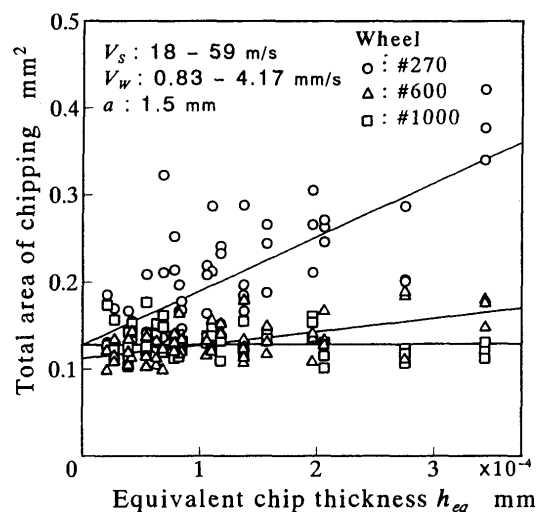


Fig.9 Total area of chipping vs. equivalent chip thickness

温では強さが著しく低下し、溶融点付近ではほとんどゼロになる。一方、結晶粒は溶融直前まである程度の強さを保有するため、粒内破壊は溶融点以下で起こる現象と考えられ、研削液による冷却効果が得られていることがわかる。加工条件で比較するとテーブル送り速度が大きいほど大規模のチッピングが発生していることが明らかである。また、ホイール周速度の影響も大きく受け、周速度が小さいと同程度の大規模なチッピングが発生することが明らかになった。そのため、チッピングの大きさは材料の除去単位に大きく影響を受けると理解される。

図9は、各ホイールの相当切りくず厚さ $h_{eq} = a \cdot V_w / V_s$ と総チッピング面積の関係を示したものである。また図中の直線は、データの近似計算を行い一次式にしたものである。#270では h_{eq} が増加すると、総チッピング面積も増加する傾向が顕著にみられる。#600では#270のように顕著には現れないが、 h_{eq} が増加すると総チッピング深さは若干の増加傾向が見られる。#1000では本実験の h_{eq} の範囲内ではチッピングはほぼ一定である。これは、 h_{eq} が増加するとホイール1回転あたりの加工量が增加するため研削抵抗が大きくなり、クラックが発生しやすくなるためであると思われる。また、ホイールの粒度が細かくなると、直線の傾きが減少することもわかる。これは、粒径が小さくなると、砥粒切れ刃の切込みが小さくなるため、それによる抵抗が減少し、その結果テーブル送り速度やホイール周速度による影響が小さくなるためである。また h_{eq} の高いところでは、ホイールの粒度が細かくなるとチッピングは小さくなる傾向が顕著にあらわれていることが分かる。なお、最大チッピング幅、平均チッピング幅に対しても全く同様の傾向を示した。

以上のことから、チッピングの発生が、除去単位に大きく影響されることが明らかになった。そこで、除去単位を粒度の異なるホイールで比較するために、砥粒1個あたりの削除量を考

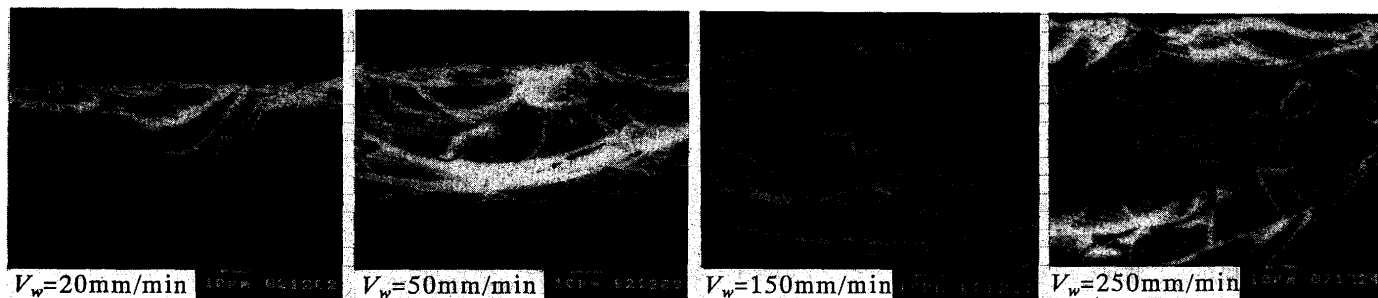


Fig.8 SEM observation of chipping when ground with different work speeds

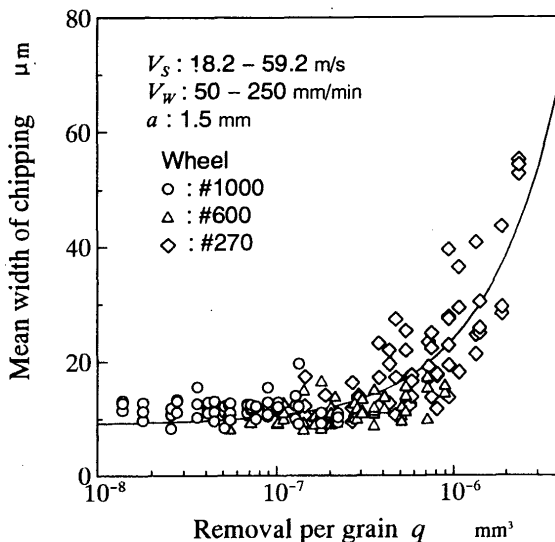


Fig.10 Mean width of chipping

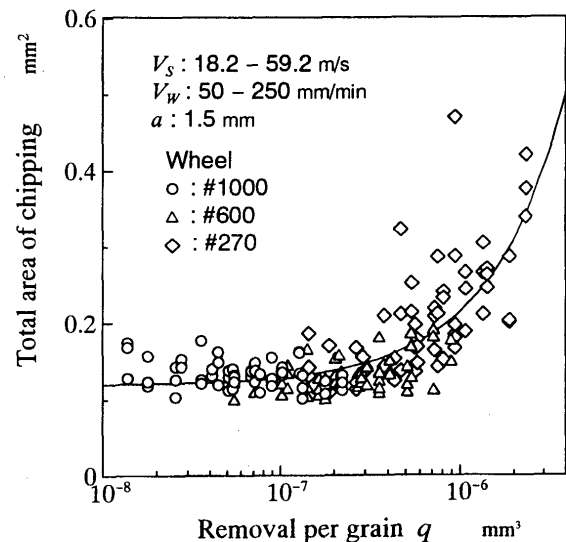


Fig.11 Total area of chipping

える。砥粒あたりの削除量は、粒径、集中度、切込み、ホイール周速、テーブル送りより理論的に計算される値で、砥粒の切りくず除去機構を考察する上で非常に重要である⁶⁾。実際はホイールの振れにより変動する値であるが、ここでは平均値として理論値を用いた。ホイール幅 b 、切込み a とすると、単位時間あたりのホイールによる削除量は次式のようになる。

$$Q' = b \cdot a \cdot V_w \quad (1)$$

また平均砥粒間隔を μ とすると、単位時間に作用する砥粒数は、

$$Z' = b \cdot V_s / \mu^2 \quad (2)$$

であるから、砥粒1個あたりの加工量 q_w は次式となる。

$$q_w = Q'/Z' = b \cdot a \cdot V_w / (b \cdot V_s / \mu^2) = a \cdot \mu^2 (V_w / V_s) \quad (3)$$

なお、 μ の値は実験後にホイールの表面を顕微鏡観察し、観察した面積中で実際に加工に関与していると推定される砥粒の数から得られる値と、いくつかの提案されている理論式による値とがよい一致を見ることを確認し、#270, #600, #1000 に対しそれぞれ 107, 57, 33 μm を使用した。

図10,11に計算した砥粒1個あたりの削除量と平均チッピング幅および総チッピング面積の関係を示す。実験条件が広範囲にわたるので、データは対数目盛にプロットされているため、一次式で近似したラインがカーブしているが、削除量 q_w とチッピングの大きさには直線的な関係がある。また、最大チッピング幅に対しても全く同様の傾向がみられた。これより、発生するチッピングの大きさは、異なる粒径においても砥粒あたりの削除量に大きく依存していることが明らかである。

なお、その他の測定項目では、平均チッピング面積と最大チッピング面積は幅の自乗に比例して変化するため q_w の変化に対して直線関係が得られず、ばらつきが大きかった。チッピング長さに関するすべての項目は臨界値に大きく依存したため定量的評価には適さない。また、総チッピング長さはチッピングの規模と相関を見せず、加工条件に対してあまり変化しなかった。そのため総チッピング面積が平均チッピング幅と同じ直線関係になったと考えられる。また、最大チッピング幅と平均チッピング幅が同じ傾向を示すことより、チッピングの発生が確率的なものであることが分かる。

以上、本研究で開発した方法により総チッピング面積か平均チッピング幅を測定することによりチッピングの定量的評価が可能であることが分かった。生産現場では最大チッピング幅が評価の規準として使用されることが多いようであるが、他の2項目と比較すると、測定点の散乱が大きいため要求される値を実現するには図10のラインから得られる q_w の値よりかなり安全側での加工が必要であると言える。

5. 結 論

- (1) チッピングを定量的に評価する測定方法を考案し、これによって測定された値は実際のチッピング発生状態とよい対応をみた。
- (2) 被削材の表面に前加工処理としてラッピングを施すことにより、チッピングの発生が抑えられた。超精密研削加工を施した場合もラッピングに近い良好な面粗さが得られるが、チッピング抑制にはあまり効果がない。
- (3) ホイールの粒度の違いによりチッピングの発生は大きく影響され、粒径が小さいほど発生するチッピングは小さい。
- (4) チッピングは等価切りくず厚さ h_{eq} によって大きく影響され、 h_{eq} が減少すると発生するチッピングは小さくなる。
- (5) 砥粒1個あたりの削除量 q_w で整理すると、チッピングのサイズはテーブル送り速度、ホイール周速、粒度に関係なく q_w の値が減少すると抑制される。

最後に、この研究を行うに当たり実験に協力頂いた当時本学院生中山達臣君に厚く御礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) S.Chandraseker, M.C.Shaw and B.Bhushan: Comparison of Grinding and Lapping of Ferrite and Metals, Trans. ASME, Ser.B, 109 (1987) 83.
- 2) 三宅正二郎, 渡辺純二, 上野嘉之, 鶴田兼吉: フェライトの精密研削 (第1報), 精密工学会誌, 43, 12 (1977) 1415.
- 3) 松井正己, 庄司克雄, 寺本仁: 薄形外周刃砥石による精密研削切断に関する研究 (第1報), 精密工学会誌, 53, 7 (1987) 1051.
- 4) T.Matsuo and Y.Ohuchi: Slot Grinding of Steels and Ceramics with Superabrasive Wheels, Ann. CIRP, 37, 1 (1988) 315.
- 5) J.Ikeno, Y.Tani and A.Fukutani: Development of Chipping-Free Dicing Technology Applying Electrophoretic Deposition of Ultrafine Abrasives, Ann. CIRP, 40, 1 (1991) 351.
- 6) 小野浩二: 研削仕上, 積書店 (1962).