破壊形態の異なる多結晶フェライトの溝研削に
おけるエッジチッピングの生成挙動*近 藤 啓 一^{*1}, 貴 志 浩 三^{*2}
市 田 良 夫^{*2}, 蓮 田 裕 一^{*2}Generation Behavior of Edge-Chipping of Polycrystalline Ferrites Having
Different Fracture Modes in Slot GrindingKeiichi KONDO, Kozo KISHI,
Yoshio ICHIDA and Yuichi HASUDA

Precise slot grinding experiments were conducted on two kinds of polycrystalline Mn-Zn ferrites, which showed intergranular and transgranular fracture, respectively, to investigate the influences on fracture mode of changes in size and shape of the edge-chipping. In the case of using fine grain, maximum chipping size of transgranular-fracture-type ferrite was smaller than that of the intergranular fracture type; however, in the case of using coarse grain, maximum chipping size was reversely to the case of using fine grain. This reversed phenomenon was explained based on the differences in fracture mode of the materials. The percentages of intergranular fracture of these materials were examined in detail by SEM observation. The transgranular fracture type was suitable for precise slot grinding using fine grain. On the other hand, the intergranular fracture type was suitable for normal slot grinding using coarse grain. As a result, new technology for reducing the edge chipping which controls the grain boundary strength using an additive was developed.

Key Words: Grinding, Abrasive Grain, Grinding Wheel, Slot Grinding, Polycrystalline Ferrite, Intergranular Fracture, Transgranular Fracture, Edge Chipping

1. 緒 言

磁気ヘッドの加工行程中には成形・溝入れ研削があり, それらの微細加工で創成されるエッジ部の形状が製品の信頼性に大きく影響する⁽¹⁾。特に, エッジ部に発生するチッピングは磁気ヘッドの磁気特性や機械的性質を著しく低下させるため, チッピングを抑制する精密加工技術が要望されている⁽²⁾⁽³⁾。

チッピングは発生したクラックによって創成されるものであるから, チッピングの形態は, 発生するクラックの伝ば形態に必然的に深くかかわってくる。例えばクラックがおもに粒界を伝ばする粒界破壊形(Intergranular fracture type)の材料と粒内を伝ばする粒内破壊形(Transgranular fracture type)の材料とでは同じ加工条件においても, チッピングの規模や形態に相違が生じることが考えられる。しかし, 単一の硬脆材料を用いてチッピングやクラックなどの加工損傷を抑制する最適な加工条件を論じる研究報告は見受けられるが, 個々の硬脆材料の破壊形態を考慮した例は極めて少ない⁽⁴⁾。

本研究では, 破壊形態がそれぞれおもに粒界破壊形と粒内破壊形を示す多結晶 Mn-Zn フェライトの精密溝研削を行い, 溝エッジ部に発生するチッピングの規模と形態に及ぼす材料の破壊様式と加工条件の影響などを検討した。その結果, チッピングサイズについて微粒砥石による加工では粒内破壊形フェライト<粒界破壊形フェライトであるが, 粗粒砥石では粒内破壊形フェライト>粒界破壊形フェライトになる逆転現象を得るとともに, そのメカニズムを検討した。

2. 実験方法

2.1 材料について 一般に, 多結晶 Mn-Zn フェライトの磁気特性を変える微量添加物については従来より CaO や SiO₂ のように粒界に析出するものがあり, 結晶粒界の強度も変えることが知られている⁽⁵⁾。そのため, 発生するクラックの伝ば形態も変わり, チッピングの破壊形態にも大きく影響することが考えられる。そこで, おもに粒内破壊を示す多結晶 Mn-Zn フェライトとその原料にある種の微量添加物を加え, 結晶粒界の強さを減じ, おもに粒界破壊を示すようにした材料を開発作製した。以降, 本論文ではそれぞれの材料を粒界形フェライト, 粒内形フェライトと呼ぶことにする。

* 原稿受付 1994年10月19日。

^{*1} 宇都宮大学大学院 [現: 日立金属(株)]。^{*2} 正員, 宇都宮大学工学部 (〒321 宇都宮市石井町 2753)。

(a) 粒界形フェライト

(b) 粒内形フェライト

図1 材料の破断面のSEM観察例

図1に試料の破断面のSEM観察例を示す。粒界形フェライトの破断面[図1(a)]には結晶粒の一つ一つの凹凸が明りょうに見られ、破断がおもに結晶粒界で行われていることがわかる。一方、粒内形フェライトの破断面[図1(b)]はほぼ平らで、結晶粒界にほぼ関係なく破断していることから、おもに結晶粒内で破断されていることがうかがわれる。粒界形および粒内形フェライトともに結晶粒径は均一で、ほぼ同じ大きさである。表1に実験に供したそれぞれのMn-Znフェライトの破壊形態・機械的性質を示す。破断試験において粒界形フェライトは約80%が粒界破壊・約20%が粒内破壊で破断するのにに対し、粒内形フェライトは約95%が粒内破壊・約5%が粒界破壊で破断した。両者の硬度および破壊靱性値もほぼ同様の値を示している。また、これらのMn-Znフェライトの化学成分のモル比は等しく、 $\text{Fe}_2\text{O}_3 : \text{MnO} : \text{ZnO} = 54 : 31 : 15$ である。このように化学成分・粒径および機械的性質がほぼ同じで、破壊形態のみが粒界形と粒内形を示す2種類のMn-Znフェライトを用意し、実験に供した。

2.2 実験条件 表2に実験条件を示す。#2500および#600の粒度の異なる2種類のダイヤモンド砥石を用いることにより、微粒砥石と粗粒砥石を用いた場合の溝研削におけるチッピングの生成挙動を調べた。実験では切込み一定($t=500\mu\text{m}$)で工作物速度を変え、アップカットとダウンカットについて行った。ドレッシングはSD2500N100M砥石の場合にはWA200Gを用いて、またSD600N100M砥石の場合にはGC150Lのスティック砥石を用いて、それぞれ切込み $t_d=600\mu\text{m}$ 、テーブル速度 $v=100\text{mm/min}$ で行った。

溝加工の際に生じるチッピングの評価は、その後のヘッドコア部の側面研磨やトラック幅の加工を考慮すると、チッピングサイズの平均値や面積よりも、最大サイズが大きく影響する。そこで、各条件下における

表1 材料の破壊形態および機械的性質

Workpiece	Intergranular fracture type Mn-Zn ferrite	Transgranular fracture type Mn-Zn ferrite
Percentage of fracture mode	Intergranular 80% Transgranular 20%	Intergranular 5% Transgranular 95%
HV	650	
Fracture toughness	1.51 $\text{MN/m}^{3/2}$	1.50 $\text{MN/m}^{3/2}$
Average grain size	$10 \pm 2\mu\text{m}$	

表2 おもな実験条件

Grinding method	Slot grinding Down cut, Up cut
Grinding wheel	SD600N100M, SD2500N100M Size : $52^D \times 1^T \times 25.4^H$
Peripheral wheel	$V=1320\text{ m/min}$
Work speed	$v=20 \sim 80\text{ mm/min}$
Wheel depth of cut	$t=500\mu\text{m}$
Grinding fluid	Soluble type (JIS W-2-2) 2% dilution

図2 エッジ・チッピングの測定

最大のチッピングサイズをSEM写真観察によって測定し、評価した。チッピングの形状は図2に示すように大小の差はあるものの円弧上の凹凸とみなされるので、ランダムに $200\mu\text{m}$ の測定長さを20箇所ピックアップし、研削方向と垂直に工作物表面に生成されたものについて行い、その中で最大のものをを用いた。

3. 実験結果および考察

3.1 最大チッピングサイズの変化と逆転メカニズム

図3にダウンカットとアップカットにおける工作物速度の増加に伴う最大チッピングサイズ C_m の変化を示す。図3(a)はダウンカットにおける最大チッピングサイズ C_m の変化を示している。最大チッピングサイズは工作物速度が速くなるに従い大きくなる傾向を示している。これは、材料に加わる加工時の負荷が工作物速度の増加とともに大きくなるため、より脆性的な破壊になるためと考えられる。また、各材料とも最大チッピングサイズは微粒砥石(#2500)による加工のほうが粗粒砥石(#600)よりも小さく、微粒砥石による工作物速度を遅くした加工がチッピングの発生を抑制することがわかる。次に、微粒砥石と粗粒砥石を用いた場合における各材料の最大チッピングサイズを比較してみた。#2500の微粒砥石では粒内形フェラ

- :SD600N100M, Intergranular fracture type ferrite
- :SD600N100M, Transgranular fracture type ferrite
- :SD2500N100M, Intergranular fracture type ferrite
- :SD2500N100M, Transgranular fracture type ferrite

(a) ダウン・カットにおける C_m (b) アップ・カットにおける C_m 図 3 工作物速度の増加に伴う最大チップングサイズ C_m の変化

イトのほうが粒界形フェライトよりも最大チップングサイズが小さな値を示すのに対し、#600の粗粒砥石では逆に粒内形フェライトの方が粒界形フェライトよりも大きくなっている。この逆転現象は数字的には、微粒砥石から粗粒砥石に加工を変えた場合、粒界形フェライトの最大チップングサイズは各工作物速度とも5μm程度大きくなるだけであるが、粒内形フェライトの最大チップングサイズは15μmと粒界形の3倍も増加しているためである。

図3(b)にアップカットにおける最大チップングサイズを示す。ダウンカットよりも全体的に最大チップングサイズは大きい値を示すが、ダウンカットの場合と同じく、ここでも逆転現象が認められる。このように、砥石が微粒から粗粒に変えることによってチップングサイズに逆転現象が見られるのは、粒内形フェラ

(a) SD 2500 N 100 M,
 $v=20$ mm/min(b) SD 600 N 100 M,
 $v=80$ mm/min

図 4 粒内形フェライトのダウンカットにおけるチップング

(a) SD 2500 N 100 M,
 $v=20$ mm/min(b) SD 600 N 100 M,
 $v=80$ mm/min

図 5 粒界形フェライトのダウンカットにおけるチップング

イトは粒界形フェライトよりも加工時の負荷に対して敏感であるためと思われる。つまり、それぞれの破壊様式に基づくチップング生成のメカニズムが大きく違うことが考えられる。そこで、それぞれの材料についてチップングの形態をSEM観察し、破壊のメカニズムを検討してみた。図4は粒内形フェライトのダウンカットにおける加工後に見られるチップングのSEM観察例を示したものである。図4(a)は#2500砥石、 $v=20$ mm/minの場合で、チップングは小規模である。いずれのチップングも粒内破壊が多くを占めているが、結晶粒の凹凸に沿って発生しているものも若干見られ、粒界破壊も含まれることが観察される。図4(b)は#600砥石、 $v=80$ mm/minの場合で#2500砥石の結果に比べ、チップングはかなり大きい。チップングは結晶粒の凹凸に関係なく円弧状に大きくはく離し、粒内破壊がほとんどすべてを占めている。図5に粒界形フェライトのダウンカットにおける加工後に見られるチップングのSEM観察例を示す。図5(a)は#2500砥石、 $v=20$ mm/minの場合でいずれのチップングもほぼ100%結晶粒の凹凸に沿って発生しており、結晶粒のはく離によってチップングが生成されている。図5(b)は#600砥石、 $v=80$ mm/minの場合を示

しているが、チップングは#2500 砥石の結果に比べ、かなり大きくなっている。この条件においても、チップングは結晶粒単位のはく離によってのみ生成される粒界破壊がほとんどである。このように、粒内形フェライトでは個々のチップングを構成する破壊形態は一定でなく、チップングの規模が大きくなるにつれ粒界破壊をわずかに含むものから粒内破壊に破壊様式が移行する傾向が見られる。また、粒界形フェライトはチップングの規模に関係なく、個々のチップングの生成はほとんどすべて、粒界破壊によるものであることがわかる。

これらの知見をまとめてみると、微粒砥石による加工において、粒内形は塑性変形を含むと思われる微少な粒内破壊で材料除去が行われるので、チップングは少ない。ところが、粒界形フェライトは結晶粒単位のはく離によってチップングが生成される脆性破壊で材料除去が行われるので、チップングは粒内形フェライト<粒界形フェライトになると考えられる。一方、粗粒砥石において粒界形は結晶粒単位のはく離によってチップングが生成されるため、クラックが隣接する結晶粒子へ伝ばすることがほとんどない。また、同時に#600 砥石による大きな破壊エネルギーも緩和される。しかし、粒内形フェライトは大きな破壊エネルギーが加わると、クラックが隣接する結晶粒子へ容易に伝ばする劈開破壊のため、粒界形のようにクラックが結晶粒界で止まることができない。そのため、砥粒切れ刃の接触近傍で発生したクラックが高速に材料内部に進展し、大規模な脆性破壊に結びつく。したがって、#600 砥石ではチップングが粒内形フェライト>粒界形フェライトになることが推測される。このことは、粗粒砥石による粗い溝加工には粒内形フェライトよりも粒界形フェライトが適しており、一方、微粒砥石による微細な溝加工には粒内形フェライトのほうが粒界形フェライトよりも適していることを示しており、加工目的によって材料と砥石の選択が必要である。また、前述したように多結晶 Mn-Zn フェライトは微量添加物により、結晶粒界の機械的性質を調整することが可能である。したがって、添加物によって結晶粒界の強さを操作し、チップングを抑制することも可能であると考えられる。

3.2 チップングの増大に伴う破壊様式の変化

前述したように、チップングサイズが大規模な場合と小規模な場合を比べてみると、粒内形フェライトでは破壊様式が変化しているが、粒界形フェライトの破壊様式は常に粒界破壊が多くを占める傾向が示され、個々の破壊様式とチップングの形態にも密接な関連が

図 6 チップングのプロファイル例

存在することが考えられた。図 6 は光学顕微鏡で観察撮影したチップングのプロファイルの一例を示したものである。同一の加工条件において、チップングのプロファイルに若干の相違は認められるが、チップングは同じサイズのものが一様に帯状に生成されるのではなく、ほぼ円弧状のものが周期的に見られ、チップングの規模が大きくなるに従い、その周期が長くなっているのがわかる。

また、周期的に見られる円弧状のチップングの輪郭は微小な凹凸で形成されているが、粒界形フェライトのほうが粒内形フェライトよりも微小な凹凸が顕著である。このように、破壊様式の違いによってマクロ的にもチップング形態に相違が見られる。そこで次に、

図 7 チッピングサイズの増大に伴う破壊形態の変化

チップングサイズの増大に伴う各材料の破壊形態の変化を SEM により観察を詳細に求めた。周期的に見られる円弧状のチップングを一つ一つのブロックとみなし、個々のチップングに占める粒界破壊の割合を求めた。図 7 に SD 600 N 100 M 砥石を用いたときのダウンカットにおけるチップングサイズの増大に伴う各材料の破壊形態の変化を示す。粒界形フェライトは 20 μm 以下の小規模のチップングでは粒界破壊が 80% を超え、チップングの増大とともにわずかなではあるが、粒界破壊の割合が低下する。チップングが 20 μm を超えるあたりから粒界破壊の割合は一定になり、約 80% を保つ。一方、粒内形フェライトは小規模のチップングでは約 40% が粒界破壊し、チップングの増大とともに急激に粒界破壊の割合が低下し、粒内破壊へ移行していく。チップングの増大とともに粒内形フェライトの破壊様式が変化するのは、破壊エネルギーが比較的小さく、チップングが小規模の場合、おもに、結晶体で強度の少ない結晶粒界でチップングが生成されるため、粒内破壊形の材料であっても粒界破壊を半分近く示すことが考えられる。特に、溝加工により結晶粒の多くを分断され、溝端部に結晶粒の一部をわずかに残す場合には、粒界破壊しやすいことが SEM 写真観察の結果からも示されている。粒内形フェライトは破壊が増大するのに伴い、結晶粒界でチップングが生成されることが少なくなり、粒内破壊の占める割合が多くなる。一方、粒界形フェライトの場合、破壊エネルギーが比較的小さく、チップングが小規模のときには、粒界破壊に拍車がかかるため粒界破壊が多くを占める。また、粒内形および粒界形フェライトともチップングの増大とともに破壊の割合が一定値に集束していくが、それらの値は表 1 に示した破断試験の値とほぼ同じであることから、チップングの増大に従い破壊は破断での形態に近似されていくことがわかる。なお、ここでは、チップングサイズを広範囲にとるため、

図 8 最大チップングサイズ増大に伴うチップング面積の変化

SD 600 N 100 M 砥石のダウンカットの結果を用いたが、同砥石を用いたアップカットの場合や SD 2500 N 100 M 砥石を用いた場合においても、破壊様式の変化は図 7 に示したものとほぼ同様であった。

3.3 チッピング面積に及ぼす破壊様式の影響

次に、最大チップングサイズと面積の関係を求め、チップング面積に及ぼす破壊様式の影響について検討してみた。図 8 に最大チップングサイズ増大に伴うチップング面積の変化を示す。チップング面積は図 3 に示した最大チップングサイズの測定時に同時に求めたものである。粒内形および粒界形フェライトとも最大チップング幅と面積には、ほぼ一義的な関係が見られる。また、粒内形フェライトのほうが粒界形フェライトよりも面積は若干多くなる傾向が得られたが、これは、同じサイズのチップングでも粒界形フェライトのほうがチップングの輪郭の凹凸の分だけ面積が少なくなることと、粒内形フェライトのほうが幅広くチップングするためと考えられる。また、最大チップングサイズが小規模のとき、面積の差が少なくなっているのは、図 7 で示したように、チップングが小さいときには粒内形フェライトも粒界破壊する割合が半分近く含まれるため、チップング形態が粒界形フェライトに近くなるからと思われる。このように、粒内形フェライトでは破壊形態の変化がチップングの規模や面積にも大きく影響している。

以上のように、本研究では、破壊形態がそれぞれおもに粒界破壊形と粒内破壊形を示す 2 種類の多結晶 Mn-Zn フェライト溝研削を行い、溝エッジ部に生成するチップングの規模と形態に及ぼす材料の破壊形態と加工条件の影響などを検討した。これらの結果は、加工精度・加工能率・加工コストなどの立場から非常

に有利な面を有しているので、溝加工だけではなく他の精密成形加工の分野においても応用されることが期待される。

4. 結 論

破壊様式の異なる多結晶 Mn-Zn フェライトの溝研削を行い、エッジチップングの規模および破壊形態の変化などの生成挙動を評価することにより、次の結果を得た。

(1) 最大チップングサイズは# 2500 砥石の場合、粒内形フェライト<粒界形フェライトであったが、# 600 砥石の場合、粒内形フェライト>粒界形フェライトになる逆転現象が見られた。この逆転現象はそれぞれの材料のクラックの伝ば形態に基づく破壊様式が違うため、粒内形フェライトは粒界形フェライトよりも加工時の負荷に対して敏感であると考えられた。

(2) 粒内形フェライトではチップングが小規模の場合、粒界破壊が少し含まれるがチップングの増大に伴って粒内破壊に遷移する傾向が認められるが、粒界形フェライトの場合はチップングの規模にあまり関係

なく、チップングのほとんどは粒界破壊で生成されている。

(3) 粗粒砥石による粗い溝加工には粒内形フェライトよりも粒界形フェライトが適しており、一方、微粒砥石による微細な溝加工には粒内形フェライトのほうが粒界形フェライトよりも適している。

(4) 添加物によって結晶粒界の強さを操作し、チップングを抑制する新技術が考えられた。

(5) 最大チップングサイズに伴うチップング面積は粒内形フェライトの方が粒界形フェライトよりも若干大きくなる。

文 献

- (1) 木下, 精密工学会誌, 54-11 (1988), 11.
- (2) 貴志・市田・日野・樋口, 昭和 63 年度精密工学会春期大会学術講演会論文集, (1988), 153.
- (3) 貴志・市田・蓮田・佐藤, 1991 年度精密工学会春季大会学術講演会論文集, (1991), 39.
- (4) 貴志・市田・蓮田・新村, 1991 年度精密工学会春期大会学術講演会論文集, (1991), 37.
- (5) 平賀・ほか 2 名, フェライト, (1986), 47, 丸善.