研 究

研削とラッピングにおけるフェライトの破壊層*

——フェライトの加工変質層 (第1報)——

渡辺 純二** 上野 嘉之**

Fractured Layers of Ferrites by Grinding and Lapping

——Worked Layers of Ferrites (I)——

Junji WATANABE, Yoshiyuki UENO

In order to determine the working conditions in abrasive machining of ferrites used for magnetic recording heads, machinability of single crystal and poly-crystal ferrites is investigated through observation on the cracks originated by pyramidal scratching and indenting tests.

On the other hand, the depths of cracks generated by grinding or lapping are measured with a taper-sectioning method, and related to the results mentioned above.

Results obtained are as follows:

(1) The extent of the crack caused with scratching and indenting of diamond pyramids is related to the load by a power function.

(2) On the poly-crystal ferrites, the crack propagation is prevented at the grain boundaries.

(3) Depth of fracture layers in grinding can be predicted from scratching with diamond pyramid, but is constant in the region of the grinding parameters ordinarily used.

(4) Depth of fracture layers in lapping can be related to the depth of crack caused with indenting of diamond pyramid, when a mean diameter of abrasive particle is corresponded to the indenting load which act to each abrasives.

1. 緒 言

磁気記録を高速度、高密度化するために、浮動型磁気ヘッドと媒体との浮上すきま、およびコア先端ギャップ長をせまくしなければならない。ヘッド浮上面ならびにギャップつきあわせ面の加工における欠けや結晶ひずみ層は磁気特性を劣化させ、実質的に浮上すきまやギャップ長を拡げることになる。このため、フェライトの加工変質層を把握し、これを低減しなければならない。

フェライトの加工変質層を、研削、ラッピングなどの粗加工における破壊層（クラックの存在する層）を主体としたものとポリシング、超仕上げなどにおける非晶性流動層および結晶ひずみ層とにわけて考える。後二者については結晶構造の擾乱層とその磁気的な影響を測定する方法および結果を続報で述べる。

本報ではダイヤモンド角すいによる押しこみと引っかきで発生するクラックから材料特性を考察し、斜め切断で測定した研削とラッピングにおける破壊層を説明す

る。

従来、フェライトの砥粒加工に関しては、焼結およびホットプレスフェライトを軟質金属ラップやポリエステル砥石で鏡面加工する条件¹⁾や、超仕上げの加工性を他の硬ぜい材料のそれと比較した結果²⁾が報告されている。

一方、フェライト以外の材料の砥粒加工における機械的損傷を研究したものに、Si, Geの切断とラッピングにおける結晶構造のひずみ層を考察した報告³⁾、さらに押しこみと引っかきによるガラス内部へのクラックの侵入を観察して、加工作用との関係を考察したものがある⁴⁾。

しかし、これらの研究によっても、フェライトのラッピングや研削のさい、どの程度の破壊層が生じるのか明らかでなく、さらに単結晶フェライトと粒界のあることを特徴とする各種の焼結（ホットプレス）フェライト間の加工性の差異も明確ではない。

本報では、まず研削とラッピングのモデルとしてそれぞれダイヤモンド角すいによる引っかきと押しこみを行ない、単一砥粒作用によってクラックの発生する様子ならびに各種フェライト材料間の差異を明らかにする。つぎに、ダイヤモンド砥石による研削およびGC砥石によるラッピングのさいの破壊層深さを測定し、引っかき、

*原稿受付 昭和47年7月3日。昭和44年度精機学会関西地方定期学術講演会（昭和44年7月11日）、昭和45年度精機学会春季大会学術講演会（昭和45年4月5日）にて発表。

**正 会 員 日本電信電話公社 武蔵野電気通信研究所（武蔵野市緑町3—9—11）

押しこみで得られた結果と対照しながら, 加工条件と破壊層深さの対応を考察する。

2. ダイヤモンド角すいによる引っかきと押しこみ

2.1 実験条件およびクラック侵入深さの測定方法

試料はフェライト本来の性質を知る目的で単結晶を用い, 結晶粒界, 気孔欠陥, 硬さがクラックの発生, 伝ばに及ぼす影響をみるため, 焼結およびホットプレスフェライトを用いた。表1に各材料の特性を示す。試料面はピッチポリシングして, 表面あらさ $H_{\max} 0.05 \mu$ 以下とした。

引っかき実験は試作された試験機⁵⁾によって行なった。引っかき条件を表2に示す。設定した条件と研削における砥粒作用の相違は, 切削速度, 各砥粒間の相互作用, 砥粒形状および砥粒通過前の加工物表面であろう。したがって引っかきと研削の結果を比較するさいにこれらの点を考慮する必要がある。隣接砥粒間の相互作用については, 周辺へのもりあがり, みぞのうめこみなど表面の形状に与える影響は大きい。しかし, みぞ下部に発生するクラックの深さ, 形に対する影響は少ないと思われる。また砥粒形状のクラック発生に与える影響は大きい。

表1 試料の特性

フェライト	組 成	粒径 (μ)	気 孔 率 (%)	ビッカース微小かたさ* $H_v(\text{kg/cm}^2)$
単 結 晶	Mn-Zn 系	—	—	650~750
焼 結	Mn-Zn 系	8~15	<5	500~550
高 密 度	Mn-Zn 系	30~80	<1	700~750
	Ni-Zn 系	8~15	<1	700~800
ホット プレス	Ni-Zn 系	3~5	<1~5	900~1000
	Cu-Ni-Zn系	13~110	<2	700~800

*本実験における測定値

表2 引っかき実験条件

測 定 機	引 っ か き 試 験 機
引 っ か き 子 形 状	ダイヤモンド正三角すい, 底面三角形の一辺の長さ a , 三角すい高さ h のとき $\frac{a}{h}=0.127$, 1 頂角 112.4°
引 っ か き 方 向	すい面引っかき 単結晶 [100] 方向
引 っ か き 速 度	5 mm/min
垂 直 荷 重	2, 5, 10, 20 g
試 料 面	ピッチポリシ面 $H_{\max} 0.05 \mu$ 以下 単結晶 [100]

表3 斜め研摩—腐食法

加工面の保護	銀メッキ 3~5 μ 厚
斜め研摩治具	中央部の試料張付台に4度の傾斜をつける
斜め研摩	GC #400 錆鉄皿によるハンドラップ WA #6000 " " ピッチポリシ (ピッチ KR-3, 砥粒 α -アルミナ 1 μ)
腐 食	単結晶焼結用 高密度ホットプレス用
腐 食 液	HF 液 12% HF 液 46%
温 度	20~25°C 70~80°C
時 間	30~60 秒 5 ~ 8 分

い。ここでは実際の砥粒の作用にもっとも近いと思われるダイヤモンド三角すいのすい面を用いる引っかきを行なった。

クラックの侵入深さは斜め研摩—腐食法で測定した。その方法と測定手順を表3に示す。

おしこみ実験はビッカース微小硬さ試験で荷重を 25 g ~ 500 g に変化させて行なった。おしこみにおけるクラック深さの測定は検出を容易にするため平面上に 50 μ の間隔で同一荷重の圧こんをつけ, その後斜め研摩して求めた。

2.2 実験結果と考察

2.2.1 角すいによる引っかき

まず単結晶フェライトの引っかきの結果について述べる。図1に単結晶フェライトの引っかきこんを示す。(a)

(a) 垂直荷重 2 g

(b) 垂直荷重 15 g

図1 単結晶フェライトの引っかきこん

(a) 引っかかりこん (垂直荷重 20 g)

(b) クラック侵入状態 (垂直荷重 15 g)

図 3 焼結フェライトの引っかかりこんとクラック侵入深さ

は垂直荷重 2g (切込み深さ 0.2μ), (b)は 15g (0.7μ) の場合である。(a)の引っかかりこんを残すさいに微細なカールした切りくずの出ていることが光学顕微鏡によって確かめられた。一方、(b)の場合には切りくずは粉末状となり、みぞ側面における微細なクラックが示すように、(a)に比べてぜい性的に材料が除去されている。みぞ側面のクラックは角すいの側面切れ刃(稜)によって引張破壊を起こしたものと考えられる。図 1(b)に相当するみぞを斜め研摩して深さ方向のクラックの形態を観察したのが図 2(b)である。みぞ側面のクラックは浅く $1\sim 2\mu$ にすぎない。しかし、図 1(b)では流動こんでおおわれて観察できなかったクラックが底部より真下に長く成長し(約 1.5μ) ている。再び図 1(b)を詳細に観察すると、みぞ側面にある多数の細いクラックのみぞに直角な面からの傾きは約 10度である。さらに引っかかり方向に約 $7\sim 8\mu$ 間隔に傾き

30度のクラックが底部より発生している。このことは切削状態が周期的に変動し、角すいが進行方向に前後にふれながら進むことによると思われる。切削状態の周期的変動は切りくずの発生、脱落が断続的であることによるものと思われる。切りくずが排出されると圧子は姿勢を回復し、このとき傾き30度の細いクラックがはいる。この過程のくり返しを考えると以上の結果が定性的に説明でき、図 2(b)においてクラック伝は形状が 10μ 間隔で断続していることからその裏付けができる。以上総合すると垂直荷重 2g ではほぼ塑性的な切りくずの排出があり、このときの斜めの切断面(図 2(a))にみられるように内部へのクラック発生もなく、材料はそこがぎりで塑性的といえる。一方、15g になるとクラックが表出し、材料はひっぱりによるぜい性を示しているのみならず、下部にもクラックを残留させるといえる。材料の塑性限界という点から、今後さらに各種の微細切削の条件で実験することにより興味ある結果がでると思われる。

つぎに多結晶フェライトの引っかかりについて述べる。

図 3(a)は焼結フェライトの 20g 引っかかりこんである。単結晶と同様、みぞ側面に多数の微細クラックが発生して

いる。結晶粒径 ($8 \sim 15 \mu$) に比べて切込み深さはごく浅い (0.9μ) ので、結晶粒の掘りおしはほとんどないが、みぞ近傍で部分的に微小粒子が脱落している。図 3 (b) は深さ方向の観察結果である。側面ならびに直下に伸びるクラックは単結晶の場合に比べ浅くなっており、粒界で止まっているものが多い。これは結晶粒界が粒内に比して結合が弱く、クラックを伝ばさせるエネルギーが粒界の変位で吸収されてしまうためと思われる。押しこみ硬さの小さいことも粒界結合力の弱いことを裏づけている。

一方、製造条件のちがいに、粒界の結合が強固であるとともに粒内かたさも大きいホットプレスフェライトの引っかきこみを図 4 に示す。みぞ周辺の破壊が著しく引張りにもろいぜい性の大きいことを示している。みぞが蛇行し、破壊が一樣でないことは結晶粒の異方性によるものと思われる。図 5 に材料別の垂直荷重とクラック幅および深さとの関係を示す。深さ、幅ともに垂直荷重との関係がべき関数で表示できる。ここで、引っかき子の底面三角形の一辺と高さの関係から各垂直荷重におけるみぞ幅を切込み深さに換算して図 5 を書きかえたのが図 6 である。同じ切込み

引っかきこみ 垂直荷重 20 g
図 4 ホットプレスフェライト (Cu-Ni-Zn 系 II)

図 5 圧子引っかきによるクラック

(a) 単結晶 荷重 200g
(HF12% 液にて 60 秒腐食)

(b) ホットプレス (Cu-Ni-Zn 系)
荷重 500g

(c) 高密度 (Mn-Zn 系) 荷重 300g
(HF12% 液にて 60 秒腐食)

(d) 焼結 荷重 500g
(HF12% 液にて 60 秒腐食)

図 7 ピッカース圧こん形状 (明石微小硬度計, 荷重保持 120 秒)

深さに対して到達クラック深さはホットプレス材がもっとも深く、つぎが単結晶で、焼結材は浅い。前二者ではホットプレス材のほうが単結晶よりクラックは大きくなっているが、ホットプレスした結晶 (Ni-Zn 系) そのものが単結晶 (Mn-Zn 系) より硬く、ぜい性が高いうえに、粒界の結合も強固で、クラック伝ばの抑止効果がわるいためであると思われる。しかし、ゆるい粒界結合をもつ焼結材の粒界のクラック伝ばに対する抑止効果は明らかである。

2.2.2 角すいによる押しこみ

図 7 に材料別の圧こんおよび周辺へのクラック伝ば状態を示す。材料によってクラックの形態が異なっている。単結晶は垂直荷重 50g 以上でクラックが発生し、腐食するとすべり面に沿った伝ばが著しい。すなわち、クラックの伝ば方向は途中で変化せず、特定の選択方向に

図 6 圧子引っかきによるクラック

図 8 単結晶 {100} 面の押しこみによるクラック

のみ伝ばすることを示す。ホットプレス材は高荷重で周辺破壊部がはく離する。一方、高密度材では粒内に起源をもつクラックが粒界において停止し、クラック伝ばに対して粒界の障害が明らかとなっている。また焼結材では腐食すると圧こん周辺の粒子が脱落し、粒界におけるすべり破壊の発生を示している。単結晶について、おしこみ荷重とクラック幅、深さの関係、およびその比を測定した結果を図8に示す。深さ、拡がりとも荷重に対してべき関数表示ができ、深さと拡がりの比は一定である。このことはおしこみ中心から三次元的に拡がったクラック到達範囲が相似的に拡大することを示しており、前段の考察と一致している。

3. 研削とラッピングによる破壊層

3.1 研削による破壊層

研削が単粒切削の集合とすると破壊層発生の特性は単粒引っかけの結果から予測できるはずである。単粒引っかけで、クラック深さは切込み深さのべき関数となることを明らかにし、また微小な切込みの場合、破壊層のない加工も可能であることを示した。

研削における砥粒切込み深さは幾何学的計算から

$$g = 2a \frac{v}{V} \sqrt{\frac{A}{V}}$$

- a : 連続切れ刃間隔 (mm)
 g : 砥粒切込み深さ (mm)
 V : 砥石周速 (m/min)
 v : 加工物送り速度 (m/min)
 D : 砥石直径 (mm) A : 設定切込み深さ (mm)

である。表4の本実験の研削条件(セラミック研削における常用条件)によれば、 $A=5\mu$ のとき $g=0.02\mu$ となり角すい引っかけの結果からこの程度の切込みでは塑性的な切削こんが得られるはずである。ところが図9に示すようにこの条件で研削したときの単結晶とホットプレス材の加工面はともに $6\sim 8\mu$ の破壊層を有している。その理由として①連続切れ刃間隔が計算の場合よりずっと大きい。②砥粒形状が引っかけに用いた角すいよりは

表4 研削条件

研削盤	岡本 PSG 5 BV
加工物送り速度	0.6 m/min
砥石周速	1400 m/min
切込み深さ	1~40 μ
砥石の種類と大きさ	D 320* P 50 M**, 125 ϕ × 15
研削液	ユシロケン N2% 水溶液

* 砥粒突き出し高さ 3μ 、砥粒を球形と考えたときの平均切れ刃径 20μ

** 単位面積当り砥粒数 1250個/cm²

単結晶 {100} 面 (研削方向 [100])

図9 研削による破壊層

ホットプレス (Cu-Ni-Zn系)

表5 設定切込み深さに対する砥粒切込み深さ

設定切込み深さ $A(\mu)$	1	5	10	20	30	40
砥粒切込み深さ $g(\mu)$	0.9	2.1	3	4.2	5.2	6

(ただし切れ刃間隔を砥石1円周とした場合)
他の条件は表4による

砥石 D 320 P 50 M, 砥石周速 1400 m/min, 加工物送り速度 0.6 m/min, 研削液 ユシロケン N 2% 水溶液)

図10 研削による破壊層深さ

るかに鈍く、みぞ底部の引張り破壊が大きいたことが考えられる。①については使用した砥粒の平均突き出し高さ

砥石 D 600 P 50 M, 切込み 10μ , 送り 0.6 m/min , 周速 140 m/min

図 11 研削面の電顕写真

が 3μ あるにもかかわらず、研削後に砥石面を観察したところボンド面がえぐられていたことから確実である。角すい引っかきとの対応づけをするためには砥粒切れ刃間隔を実測してやる必要がある。いま仮に、極端な場合として切れ刃間隔を 1 円周として砥粒切込み深さを計算しなおしてみると表 5 に示す設定切込みと計算値の対応を得る。ここで砥粒突き出し高さは 3μ であるから、 3μ を越える砥粒切込み深さはすべて 3μ と考える。このように考えて角すい引っかきの結果から推定した破壊層と実際の研削における測定値を図 10 に示す。全体を比較すると研削の破壊層が小さくなっている。これは、砥粒先端が鈍いため、角すいに比べ、小さな砥粒切込みでクラックが発生する反面、引張り応力の集中がなく、切込みが増してもそれほどクラックの伝ばは深くないとも考えられる。

つぎに材料による研削特性のちがいを考察する。図 11 に各材料の研削面電顕写真を示す。単結晶と高密度では砥粒条こんとへき開ステップをとまなう破砕面が観察できる。一方、焼結材と微粒のホットプレス材では結晶粒子の脱落面が大部分であり、この点はおしこみにおける粒界破壊の発生と対応づけられる。さらに図 10 において焼結材の破壊層がもっとも浅いのは、角すいによる引っかきの結果と同じく、焼結粒界がクラック伝ばの障害になっているためと推定できる。

3.2 ラッピングによる破壊層

角すいおしこみの場合、単結晶では押しこみ荷重 25 g までクラックは発生していなかった。ここで、今中らの

図 12 ラップ砥粒に作用する荷重と破壊層深さ

表 6 ラッピング条件

ラ ッ プ 盤	レンズ研摩機 (修正輪式に改造)
ラ ッ プ の 種 類	铸铁
ラ ッ プ, 修正輪の大きさ	ラップ外径 200ϕ , 内径 50ϕ , 修正輪外径 85ϕ , 内径 60ϕ
ラ ッ プ 回 転 数	$36\sim 60\text{ rpm}$
砥粒の種類と平均粒径	GC系 #320(50μ) #600(28μ) #1000(16μ) #2000(8μ) #4000(4μ)
加 工 圧 力	$0.3\sim 0.8\text{ kg/cm}^2$
加 工 液	水
砥 粒 濃 度	$15\sim 25\%$ (重量比)

研究結果⁷⁾を参考にして、ラッピングにおける平均砥粒径に対する有効作用砥粒数を計算し、単一砥粒の荷重を求めると平均砥粒径 4μ (#4000), 8μ (#2000), 16μ (#1000), 27μ (#600), 50μ (#320) に対して 2, 4, 13, 25, 70 g となる。これより、少なくとも #1000 より小さい砥粒でラップした場合、破壊層は発生しないはずである。そこで表 6 に示すラッピング条件でラップした場合の焼結材とホットプレス材について斜め研摩して測定したところ、図 12 に示す破壊層が発生していた。この結果はおしこみの場合よりずっと軽荷重から破砕が発生していることを示している。この違いは押しこみの変形過程が準静的であるのに対して、ラッピングでは砥粒が転動しており、高応力の圧こん周辺がつぎつぎに加工されることによるものと思われる。そこで実際の場合には微小荷重でもクラックが発生していると考えて、図 8 における単結晶の場合のクラック深さの直線を下方に延長して推定すると、 $5\text{ g}\sim 2.6\mu$, $10\text{ g}\sim 4\mu$, $50\text{ g}\sim 12\mu$ と実際の測定値と大差のないことが明らかとなる。

4. 結 論

磁気ヘッド用単結晶ならびに多結晶フェライトの高精度加工を目的に、ダイヤモンド角すいの引っかきとおしこみから材料特性を明らかにし、研削とラッピングにおける破壊層発生の機構を考察して、以下の点を確認した。

(1) 単粒の押しこみと引っかきにおいて、クラックの拡

がりは庄子への垂直荷重のべき関数で表示しうる。また単結晶において押しこみではクラックの形は荷重によらず、相似的に広がる。

(2)クラックの発生と伝ばの形態は材料特性に依存する。すなわち硬さの小さい焼結フェライトでは多数の微細クラックが発生しやすいが、粒界でその伝ばは阻止される。硬さの大きいホットプレス材、単結晶において数は少ないが、クラックは長く発達し、破碎、はく離がおこる。

(3)研削における破壊層の値は設定切込みを砥粒切込みを砥粒切込み深さに換算することにより、引っかきの結果から推定できる。実用研削条件では、破壊層深さは砥石切込みによらずほぼ一定となる。また材料による差は引っかきの特性における相違と対応している。

(4)ラッピングでは単一砥粒の負荷が材料のおしこみにおける臨界荷重以下でもクラックは発生し、荷重とクラック深さの関係はおしこみの場合の外挿上で推定しても大きな誤りはない。

以上に明らかにした引っかき、おしこみと研削、ラッピングの対応をもとに今後はさらに引っかき押しこみの変形過程を定量的に追求し、破壊層発生機構をより明確にしていく予定である。

本研究を進めるにあたり、常にご指導、ご配慮いただいた当研究所井田一郎工務部総括担当調査役に感謝します。

参 考 文 献

- 1) 小宮昇: フェライトの精密加工法(1), (2), 砥粒加工, **2**, 8 (1965) 421 および **2**, 10 (1965) 520.
- 2) 松井正己: 硬脆材料の超仕上げに関する研究Ⅱ(第2報), 精密機械, **35**, 3 (1961) 184.
- 3) 小野員正ほか: ゲルマニウム, シリコン単結晶の加工ひずみ, 通研実報, **10**, 5 (1961) 925.
- 4) Klaus Peter; Sprundbruch und Mikroplastizität von Glas in Eindruckverschen, **37**, 7 (1964) 333.
- 5) 井田一郎ほか: 超微小引っかきかたさ測定機の試作とGaAs加工面への適用, 精密機械, **35**, 2 (1969) 107.
- 6) たとえば砥粒加工技術便覧, 日刊工業新聞社(1966)133.
- 7) 今中治: ガラスのラッピングに関する研究(第5報), 電気試験所彙報, **25**, 4 (1961) 283.