ポリシングによる加工変質層と その磁気特性に与える影響*

——フェライトの加工変質層（第2報）——

渡 辺 純 二** 上 野 嘉 之** 篠 山 誠 二***

Magnetic Characteristic Changes in Polished Ferrites

——Worked Layers of Ferrites (2nd Report)——

Junji WATANABE, Yoshiyuki UENO, Seiji SHINOYAMA

The worked layers of polished ferrites were estimated by electron-diffraction method and the principal mechanism of magnetic characteristic changes was clarified. Effective non-magnetic layer of abraded ferrites can be estimated by measuring reluctance of a toroidal core with worked layers perpendicular to magnetic path: the depth of the layer was obtained by the method as $0.2\mu\text{m}$ for polished Ni-Zn ferrites, when its plastic deformation layer was $0.6\mu\text{m}$ from the measurement by the electron-diffraction method. On the other hand, the change of permeability in the ferrite thin plate with abraded surface can be explained by magnetostrictive effect caused by residual stress of worked layer. In this work, the relation between permeability and stress is deduced, and is proved by measuring the residual stresses, magnetostriction constants and permeabilities of Mn-Zn ferrite single crystal.

1. 緒 言

研削やラッピングのように、おもにフェライトのぜい性破壊現象に基づく加工では表面下に多数の潜在クラックが発生し、その深さは砥粒の作用深さに依存することを前報で示した¹⁾。一方、フェライトの塑性変形領域の加工であるポリシングではクラックをほとんど生じることなく材料が除去されるので加工変質層（以下加工層とする）も極めて薄くなる。しかし、フェライトの透磁率は構造敏感であるため、このような薄い加工層の影響をもうけると思われる。

フェライト結晶の加工層を評価する方法には、大別して、加工面の電子回折像の解析²⁾、エッチ速度変化の測定³⁾など結晶表層のじょう乱を直接評価する方法と、初透磁率⁴⁾、ヒステリシス特性（曲線）および磁気ヘッドの記録再生特性などの実用的な諸特性への影響から評価する方法とがある。多くの場合これらは別個に扱われている。そこで両者の量的関係を説明しうるモデルを明らかにするとともに、これを基礎として加工層またはその

影響を低減する加工法、条件の研究を進める必要がある。

本報では、おもにポリシングで生ずる加工層を電子回折像によって評価するとともに、加工層と磁気特性の関係を明らかにした。特に後者では、フェライトコアの磁気回路に対して加工層が平行な表面下にあるか垂直な表面下にあるかによって透磁率に影響を与える機構が異なることを示した。このため、磁気回路に垂直な面内の加工層の等価的な磁気抵抗の測定法を考案して用いた。一方、平行な面内の加工層は結晶構造のじょう乱で生じる残留応力とつりあうバルク内の応力に基づく逆磁歪効果の関係で透磁率を低下させるとするモデルを考え、一部解析と実験によって証明した。

このモデルにより、各種性質の異なる加工層が透磁率変化に与える影響を考察した。

2. ポリシングによる加工層

軟質ポリシャの表面に埋込まれた砥粒の微小引っかかりでフェライトをポリシングしたとき、砥粒の作用深さは条痕深さから $0.1\mu\text{m}$ 以下と推定される。前報でダイヤモンド角すいの微小引っかかりを行ったとき、 $0.2\mu\text{m}$ の条痕深さに対し内部に潜在クラックはないが、 $1.7\sim 2.0\mu\text{m}$ の深さまで砥粒の痕跡がみられた。このように条痕深さの10倍に及ぶ加工層の構造はKranertらの提案した模型⁵⁾が基本となるが、材料の性質や砥粒の作用形態

* 原稿受付 昭和51年8月11日、昭和45年度精機学会秋季大会学術講演会（昭和45年10月8日）および昭和48年度精機学会秋季大会学術講演会（昭和48年10月8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）

*** 日本電信電話公社武蔵野電気通信研究所

表1 各種ポリシ条件と加工変質層深さ

ポリシ条件 (皿, 砥粒, 濃度, 圧力)	加工変質層 (μm)
鋳鉄, WA#6000, 20%, 0.4 kg/cm ²	1.2~1.4
鉛, WA#6000, 10%, 0.3 kg/cm ²	0.4~0.6
ピッチ (K-1), WA#6000, 10%, 0.38 kg/cm ²	0.3~0.4
ピッチ (K-1), WA#6000, 20%, 0.38 kg/cm ²	0.3~0.4
ピッチ (K-1), WA#6000, 砥粒埋込み後水供給, 0.3 kg/cm ²	0.25~0.3
ピッチ (K-1), アルミナ 1 μm, 10%, 0.3 kg/cm ²	0.2~0.25

によっても異なると考えられる。そこで各種ポリシャによるポリシングで生ずる加工層を電子回折像から評価した。試料は Mn-Zn 単結晶フェライトを用いた。

ピッチポリシャと平均粒径 2~3 μm のアルミナでポリシした表面の電子回折像はスポットをほとんど見分けられないハローである。この層厚さは 100 Å 前後で、その下は約 0.1 μm まで広がりのあるスポットがリング状に尾をひくアステリズムとなり、結晶のひずみとわずかな回転が起きていることがわかる。表層から 0.1~0.3 μm と深くなるにつれて、スポットは尖鋭になり、しだいに菊池線がみえはじめる。ポリシャの粘弾性が強くなるにつれて、表層でのリングパターンが明りょうになり、アステリズムの残る層が厚い。加工面において砥粒通過痕の消失するエッチ深さとして観察すると、ポリシャの違いによって 0.1~0.3 μm まで差がある。したがって砥粒の作用深さとしては 0.1 μm 以下しか変わらないが、それによる加工層深さの差は拡大されているといえる。表1に各種ポリシ条件に対応する加工層の深さを示す。平均砥粒径を微小にし、均一に作用させるほど加工層は浅くなっている。

一般に加工層を低減させるには、砥粒の引っかきと化学的溶去作用を複合させることが有効である。そこでフェライトを溶解させる塩酸液を加工液として、アルミナ砥粒 (平均粒径 1 μm) とピッチポリシャによるポリシングを行い、その加工層を評価した。塩酸濃度が 20% のとき、加工能率は 10 倍 (10 μm/60 min, 通常のピッチポリシングでは 1 μm/60 min), 加工面も電子回折像では明らかな菊池線を示した。一方、加工液中への浸漬を行ったときのエッチ深さは、加工液の温度に著しく依存することを認めた (図1)。これらの結果から、砥粒引っかきおよびポリシャとの摩擦による材料のごく表層の温度上昇で化学反応が促進され、引っかき痕周辺および下部の材料の弾塑性ひずみ層が溶去されたと推定できる。このように本加工法で砥粒引っかきによる周辺部のひずみ層は除去できるが、深部への砥粒の力学的作用による影響は残るので、砥粒作用深さの微小・均一化が望ましい。

図1 Mn-Zn フェライト単結晶 (100) 面の塩酸液による溶去特性

図2 磁路内の加工変質層の磁気特性を測定するためのコア

3. 加工変質層の磁気特性への影響

3.1 磁路に垂直な面内の加工層の影響

加工層のうち結晶が微細化されていたり、回転してモザイク状になった層では結晶粒径と磁区の大きさが等しくなるいわゆる単磁区構造となり、磁性が著しく劣化する。さらに結晶のひずんだ部分の透磁率も逆磁歪効果により低下する。環状の磁路内に非磁性層が挿入されたコアの磁気抵抗は

$$R = \frac{l_1}{\mu_1 S} + \frac{l_2}{\mu_2 S} = \frac{l_1}{\mu_1 S} \left(1 + \frac{\mu_1 \cdot l_2}{\mu_2 \cdot l_1} \right) \quad (1)$$

と表せる。ここに、 l_1, l_2 : バルク部, 非磁性部の磁路長, μ_1, μ_2 : バルク部, 非磁性部の透磁率, $\mu_2 = 1$, S : 磁路断面積である。

同一形状の均質なコアとの差は式 (1) の第 2 項で $\mu_1 = 3000$ のフェライトを使ったとき磁路長 10 mm のコアに 1 μm の非磁性層があると 30% の磁気抵抗変化として検出でき、感度が高い。

3.1.1 実験方法

図2に示す二つのコの字型コアの突き合わせ面をポリシングして対象面とした。突き合わせ面のすきまを数段階に変化させて、すきまと磁気抵抗の関係を把握し、密着させたときの値と同一形状の切断していないコアの値

図3 コアすきまと磁気抵抗の関係を測定する装置

表2 使用したコアの材料特性および加工条件, 表面精度

材料特性	Ni-Zn 系高密度フェライト 硬さ: $H_V 650$ 透磁率: 1800 (100 kHz)
加工条件*	皿: 鉛, 砥粒: WA#6000 加工圧力: 0.3 kg/cm^2
表面精度	表面粗さ: $R_{\max} 0.07 \mu\text{m}$ 以下 平面度: $0.2 \mu\text{m}/3 \text{ mm}$ □ 以下

* 表1中鉛皿を使った加工条件と同一

との差を加工層による影響とした。数段階に変化させたすきまとそのときの磁気抵抗を測定するために図3の装置を使用した。中央のセラミック台上に上下コアを密着させておき、上から半球圧子をつけたレバーを接触させて圧子と上コアを接着剤で固定する。左のマイクロメータでレバーを持ちあげて、コア中心上のレバー部にセットされた粗さ計の交換器により、上下コア間のすきまを調節し、このときのコアのインピーダンスと位相を読取るものである。使用したコアの材料特性、突き合わせ面の加工条件、表面精度を表2に示す。表面粗さ、平面度とも余分なすきまを生じさせない精度である。

3.1.2 実験結果と考察

図4は測定結果で、実効すきまとインダクタンスおよび磁気抵抗との関係である。すきまの小さい範囲では漏れ磁束も少なく、抵抗 R とすきま g の関係は

$$R = R_0 + kg \quad (2)$$

と近似できる。 R_0 は切断しないコアの抵抗、 k は定数である。図4の抵抗直線の傾きから $k=0.22$ となる。図における A_1 点はレバーをのせた状態で、実験開始点であるが、磁気的には加工層と突き合わせ面の幾何学的不整による空隙によるすきまをもつので、横軸の座標を a とした。 A_2 点は突き合わせ面に約 1 kg の荷重を与えた後除荷したときの値である。 A_2 点を磁気的空隙に変化のない密着した状態として、 R_0 と R_a (A_2 点での抵抗値) の抵抗値の差を式(2)からすきまに換算すると $0.8 \mu\text{m}$ と

図4 コアの実効すきまとインダクタンス, 磁気抵抗の関係

なる。コアの磁路内には4面の加工層が挿入されているので、1面あたり $0.2 \mu\text{m}$ 厚さの非磁性相当層と評価できる。

一方、突き合わせ面と同じ加工条件でポリシした面の電子回折像から評価した加工層の構成は、 $500 \text{ \AA}$ 以下の微細結晶粒層、 $0.1 \sim 0.15 \mu\text{m}$ のモザイク層、 $0.4 \mu\text{m}$ のひずみ層となっている。非磁性層としては、前二者の影響が大きいと考えられる⁶⁾。この方法によれば、各層ごとに分離した磁気抵抗の測定も可能である。

3.2 磁路に平行な面内の加工層の影響

リングコアの両面に加工層があると、その透磁率は 5 MHz 以下の低周波側で $1/2 \sim 1/5$ にも低下する⁴⁾。これらコアの両面を $1 \mu\text{m}$ 前後溶去して加工層を除くと元の値に回復する。前節の結果から結晶のじょう乱層の影響は1面につき $0.2 \mu\text{m}$ 前後なので、磁路の断面減少からは、大幅な透磁率の低下は説明できない。そこで加工層の残留応力がコア内部に及ぼす弾性応力のため、逆磁歪効果によって低下するというモデルをもとに、加工層と透磁率低下現象の関係を検討した。試料は透磁率の計算が容易な Mn-Zn 単結晶フェライト (100) 板を用いた。

3.2.1 逆磁歪効果による透磁率の変化

透磁率は磁区回転と磁壁移動による磁気スピンの配向の程度を示すが、その大きさは材料の容易磁化方向と外部磁場のなす角に依存する。フェライトのバルク結晶の容易磁化方向は $\langle 111 \rangle$ で、弾性ひずみがあるとスピンの安定方向は磁気異方性に基づくエネルギー E_K と磁気弾性エネルギー E_i の和が最小の方向となり、 $\langle 111 \rangle$ とは異なる。

スピンの総エネルギー E_t は

$$E_t = E_K + E_i \quad (3)$$

E_K, E_i は各々次式で表現される⁷⁾。

$$E_K = K_1(\alpha_1^2 \alpha_2^2 + \alpha_2^2 \alpha_3^2 + \alpha_3^2 \alpha_1^2) + K_2 \alpha_1^2 \alpha_2^2 \alpha_3^2 + \dots \quad (4)$$

$$E_i = -\frac{3}{2} \lambda_{100} \sigma (\alpha_1^2 \gamma_1^2 + \alpha_2^2 \gamma_2^2 + \alpha_3^2 \gamma_3^2 - \frac{1}{3})$$

図5 結晶方位と応力およびスピンの方向

$$-3\lambda_{111}\sigma(\alpha_1\alpha_2\gamma_1\gamma_2+\alpha_2\alpha_3\gamma_2\gamma_3+\alpha_3\alpha_1\gamma_3\gamma_1) \quad (5)$$

ここで、 $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$: スピンの方向余弦、 $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$: 応力の方向余弦、 K_1, K_2 : 結晶磁気異方性定数、 $\lambda_{100}, \lambda_{111}$: 磁歪定数、 σ : 応力 ($\sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \sigma_{zz}$)。

図5のようにフェライト単結晶の<010>板を考え、<100>、<010>方向をX、Y方向とする。 $K_1 \gg K_2$ なので E_K 項は第1項のみを考え、Y方向の応力ゼロ、X、Z方向の応力は σ に等しいとすると、式(3)は次のようにかける。

$$E_t = K_1(\alpha_1^2\alpha_2^2 + \alpha_2^2\alpha_3^2 + \alpha_3^2\alpha_1^2) - \frac{3}{2}\lambda_{100}\sigma\left(\alpha_1^2 + \alpha_3^2 - \frac{2}{3}\right) \quad (6)$$

いま、 $|\lambda_{100}\sigma| \gg |K_1|$ について計算する。

式(6)の第2項のみを考え、図5のように、 θ, φ をとると、

$$\alpha_1 = \sin \theta \cos \varphi, \quad \alpha_2 = \sin \theta \sin \varphi, \quad \alpha_3 = \cos \theta \quad (7)$$

であるから式(6)は

$$E_t = -\frac{3}{2}\lambda_{100}\sigma\left(-\sin^2\theta \sin^2\varphi + \frac{1}{3}\right) \quad (8)$$

となる。容易方向 θ_0, φ_0 に対する単位体積あたりの磁化スティフネス c は θ, φ 方向に対して各々、

$$c_1 = \left(\frac{\partial^2 E_t}{\partial \theta^2}\right)_{\theta_0, \varphi_0}, \quad c_2 = \left(\frac{\partial^2 E_t}{\partial \varphi^2}\right)_{\theta_0, \varphi_0} \quad (9)$$

で与えられる。透磁率とスティフネスの関係は次式となる。

$$\mu_{1,2} = \frac{M_s^2}{c_{1,2}} \sin^2 \beta \quad (10)$$

ここで、 M_s は飽和磁化量、 β は磁化容易方向と外部磁界のなす角である。ここで(010)板の<001>方向に磁界のあるときの透磁率は μ_1 のみを考える。使用したMn-Zn単結晶フェライトでは $\lambda_{100} < 0$ 、 $K_1 < 0$ であることを考慮すると次の結果を得る。

i) 応力が圧縮応力のとき ($\sigma < 0$)

式(8)の $\sin^2\theta \cdot \sin^2\varphi = 0$ で E_t は極小となり、式(6)の

第1項まで考慮すると $\varphi = 0$ 、 $\theta = \pi/4$ すなわち(010)面内の<101>方向が容易方向である。このときの透磁率は

$$\mu_1 = \frac{M_s^2}{\left(\frac{\partial^2 E_t}{\partial \theta^2}\right)_{\theta=\pi/4, \varphi=0}} \sin^2 \beta = -\frac{M_s^2}{2K_1} \sin^2 \beta \quad (11)$$

となり、磁歪効果の影響をうけない。

ii) 応力が引張応力のとき ($\sigma > 0$)

式(8)の $\sin^2\theta \cdot \sin^2\varphi = 1$ より、 $\theta = \pi/2$ 、 $\varphi = \pi/2$ 、すなわち(001)面内<010>方向が容易方向である。このときの透磁率は

$$\mu_1 = \frac{M_s^2}{\left(\frac{\partial^2 E_t}{\partial \theta^2}\right)_{\theta=\pi/2, \varphi=\pi/2}} \sin^2 \beta = \frac{M_s^2}{-3\lambda_{100}\sigma} \sin^2 \beta \quad (12)$$

となる。また $|K_1| \gg |\lambda_{100}\sigma|$ のときは容易方向が<111>であり、式(6)の第1項のみを考慮して

$$\mu = \frac{M_s^2}{-\frac{4}{3}K_1} \sin^2 \beta \quad (13)$$

となる。

$|\lambda_{100}\sigma|$ と $|K_1|$ がほぼ等しいときは両者の相対的な大きさから容易磁化方向と透磁率が求められる。解析的に計算するのは困難で、式(12)と(13)から

$$\mu = \frac{M_s^2}{-\frac{4}{3}K_1 - 3\lambda_{100}\sigma} \sin^2 \beta \quad (14)$$

と近似した。式(14)より、磁歪定数 λ_{100} と残留応力 σ を別途測定すれば、透磁率が算出できる。

3.2.2 実験方法

i) 残留応力の測定

薄片の片面を加工すると加工層の残留応力のために曲がる。エッチングにより加工層を少しずつ除去してゆくと薄片の曲がり量は少なくなる。除去した層の厚さと各段階における曲がり量を測定すると、薄片内の残留応力、すなわち除去した層が板全体に及ぼしていた応力は、

$$\sigma_x = \sigma_y = \frac{E(h-a)^2}{6(1-\nu)} \cdot \frac{d(1/\rho)}{da} - \frac{2E(h-a)}{3(1-\nu)} \cdot \frac{1}{\rho} + \frac{E}{3(1-\nu)} \cdot \int_0^a \frac{1}{\rho} da \quad (15)$$

より計算できる⁸⁾。ここに、 σ_x, σ_y : 板のx、y方向の残留応力、 h : 全体の板厚、 a : 除去厚さ、 ν : ポアソン比、 E : 縦弾性係数、 ρ : 曲率半径である。

各層の応力を求め、重ね合わせることにより、もとの試験片の残留応力の分布が計算できる。また加工層のみの応力を分離することにより、板厚の異なる試験片にも適用した。

ii) 磁歪定数の測定

フェライト単結晶の<100>、<110>方向に飽和磁界を作

図6 額縁コアの形状・寸法

図7 加工面からのエッチ深さと最大曲がり量の関係

図8 加工片の厚さと内部の残留引張応力の関係

表3 試験片の加工条件

皿	鋳鉄	鉛
砥粒	GC#4000	1μm α-アルミナ
加工圧力	0.3 kg/mm²	
加工液	水	

用させたときのひずみを半導体ストレンゲージで測定し、よく知られた λ_{100} とひずみとの関係式⁹⁾から算出した。実測値を確かめるため、磁歪定数既知のニッケル板を標準比較試料とした。

iii) 両面を加工した額縁コアの透磁率の測定

隣辺の方向が<100>、<001>である図6のような額縁状コアを超音波加工で打抜き、加工層を除去した後、表3に示す加工条件で加工して透磁率を測定した。厚さは1mmから0.1mmまでとして、残留応力値を変化させた。測定周波数は10kHz～15MHzである。

3.2.3 実験結果と考察

i) 残留応力

図7に加工層の除去厚さと曲がり量の関係を示す。GC#4000でラップした試験片では加工面から1.7μm除去すると曲がり量が一定となり、この値が本方法で得られた加工層厚さである。α-アルミナ1μm砥粒と鉛ポリシャでポリシした場合は0.4μmである。加工層が無ひずみ層の両面にはり合わされ、3層体が応力のつりあい状態にあるとき、薄板全体の内部応力を計算した結果が図8である。

ii) 測定した磁歪定数は $\lambda_{100} = -14.9 \times 10^{-6}$ 、 $\lambda_{111} = 13.9 \times 10^{-6}$ であった。

iii) 残留応力による透磁率の変化

図9に実験と計算で得た残留引張応力と透磁率の関係を示す。両者は透磁率が応力の増加によって急激に減少する傾向が一致している。加工層の塑性ひずみ層のため、コア内部に誘起される応力が厚さ方向で不均一な場

図9 引張応力による透磁率の変化

図10 額縁コアの単軸引張実験方法

合、計算値と実験値に差がでる。そこでコアに単軸引張力を負荷して均一応力を作用させたときの透磁率変化を測定して確かめた。図10に実験方法を示す。額縁コアの上下対向辺の両面にセラミックプレートをはりあわせて補強するとともに、曲げモーメントが作用しないようにした。加工層の応力は二軸引張りとして計算したが、この場合一軸なので、スピンの容易方向を調べた。式(6)の第2項のみを考慮すると、

$$E_t = -\frac{3}{2} \lambda_{100} \sigma \left(\alpha_3^2 - \frac{1}{3} \right) = -\frac{3}{2} \lambda_{100} \sigma \left(\cos^2 \theta - \frac{1}{3} \right) \quad (16)$$

となる。 $\theta = \pi/2$ で E_t 極小となり、(001)面内に容易軸がある。この結果、透磁率は式(12)すなわち加工層の場

合と同様に表せる。

図9に結果を併記した。両面加工した場合の残留応力による透磁率変化と一致している。この結果から、加工片内部の残留応力は実験した厚さの範囲内では均一になっていると考えてよい。したがって図9における計算値と実験値の差は応力場における透磁率を誘導するときの計算で用いた仮定に応力と磁壁移動の関係を考慮していないこと等によると思われる。

図9の結果から、薄形コアの加工による透磁率変化のおもな要因は残留応力による逆磁歪効果と判定した。

各種加工法で生成した加工層の形態、性質の違いは残留応力に差をもたらす。透磁率変化の仕方にも影響を与える。粗研削や切断面下には潜在クラック層があり、加工表面は細かく分割されている。このため内部応力は解放された状態にあり、加工層が厚い割に透磁率変化は少ない。ポリシ面では加工層は薄いにもかかわらず塑性変形層があり、内部には応力が残留してバルク層の透磁率低下が著しい。また同じ加工法によってもコアが薄くなるにつれて残留応力は大きく作用し、影響も大となる。しかし応力と透磁率の関係は図9に示したように透磁率の低下が緩くなる領域があり、Ni-Zn系多結晶フェライトをダイヤモンドポリシした厚さ50 μm と25 μm のコアの透磁率はほぼ同じ値を示した例がある¹⁰⁾。

4. 結 言

フェライトの加工層が磁気特性に影響を及ぼす機構の主要点について明らかにした。

- (1) フェライトコアの磁気回路に対して加工層が垂直面内にあるとき、電子回折像から評価した加工層の

厚さの1/2以下が非磁性相当厚さとなる。

- (2) 加工層が磁気回路の平行面内にあるとき、Mn-Zn単結晶フェライトの(100)板を用い、結晶構造のじょう乱で生じた残留応力がフェライトの逆磁歪効果を通して透磁率の低下に結びつくことを一部解析と実験で明らかにした。このモデルは各種性質の異なる加工層を有するコアの透磁率変化を定性的に説明できる。

終わりに、本研究の遂行にあたり、ご指導、ご討論いただいた武蔵野電気通信研究所工務部長井田一郎博士に感謝します。

参 考 文 献

- 1) 渡辺純二，上野嘉之：研削とラッピングにおけるフェライトの破壊層，精密機械，**38**，11 (1972) 73.
- 2) 山本義彦，田中一郎：単結晶フェライトの加工変質層，昭和44年度精機学会 秋季大会 学術講演会前刷 (1969) 365.
- 3) 河田耕一，梶村英男：フェライトの加工変質層，昭和44年度精機学会秋季大会学術講演会前刷 (1969) 139.
- 4) 村山智一ほか：Mn-Zn単結晶フェライトのラップ加工面と磁気特性，昭和48年度精機学会 秋季大会学術講演会前刷 (1973) 171.
- 5) W. Kranert and H. Raether: Ann. Phys., **43**, (1943) 520.
- 6) 津田英俊，伊藤 孝：フェライトの加工歪と磁性，日本金属学会シンポジウム講演予稿 (1968) 58.
- 7) J. Smit and H. P. J. Wijn: Ferrites, Philips Technical Library, (1959).
- 8) 例えば，応力測定技術研究会編：応力測定法，p.375.
- 9) 例えば，近角聡信ほか：物質の磁気的性質，朝倉書店.
- 10) 小俣富士夫，渡辺純二：薄片コアの加工変質層による磁気特性と記録再生特性への影響，昭和50年度精機学会春季大会学術講演会前刷 (1975) 397.

精密工学系大学院の研究テーマの調査結果

頭書のDは博士課程を，Mは修士課程を，テーマのあとのカッコ中の人名は指導教官名を示す。

新潟大学

- M むだ時間を含む系の未知パラメータを求める方法 (小柳孝己)
- M 雑音を含むリレー制御の誤差解析
- M 人間の制御特性の研究
- M 雑音を伴うリレー制御の誤差解析
- M M系列信号を用いるプロセスの適応制御
- M NC工作機械による輪郭加工誤差補正システム (藤井義也)
- M 複頭形工作機械の共振現象
- M 寸法適応制御による精度安定化
- M 工作機械の結合部の減衰係数
- M 工作機械の位置決め制御
- M 回転電極による放電加工の研究 (筒井忠夫)

広島大学

- D 高温高圧下における切削工具の挙動 (鳴瀧則彦)
- D PVD法による切削工具の被覆 (桑原改造)
- D ホットサンドの研究 (片島三朗)
- M ホログラフィ干渉法による非破壊検査 (服部 璋)
- M モデル規範形適応制御装置
- M 磁性薄膜の ΔR 効果を利用した歪計測 (桑原改造)
- M 金属連続薄膜の歪抵抗効果
- M 真空中での摩擦摩耗
- M MOS₂膜の潤滑性能
- M 金属の静水圧押し出しに関する研究 (大森正信)
- M 低延性金属材料の高圧下におけるせん断打抜き加工
- M ねじり予ひずみをうけた金属の引張り破断延性
- M 鋼の切欠き試験片の靱-ぜい遷移挙動に及ぼす応力状態と液圧処理の影響
- M 減圧造型法の研究 (片島三朗)
- M 鋳型のスプリングバック
- M 高強度切欠き鋼材の遅れ破壊き裂発生挙動 (武井英雄)
- M 遅れ破壊き裂の伝ば速度におよぼす変動応力の影響
- M 超塑性現象とその応用