The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	フェライト結晶の精密加工と磁気ヘッド製作技術に関する研究
Author(s)	渡辺, 純二
Citation	大阪大学, 1984, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/1026
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

The University of Osaka

フェライト結晶の精密加工と磁気ヘッド製作技術に関する研究

1983年11月

渡辺義二

フェライト結晶の精密加工と磁気ヘッド製作技術に関する研究

渡　辺　純　二

目　　次

第1章　緒　　論 …… 1

1.　本研究の必要性と目的 …… 1

1.1　本研究の必要性 …… 1

1.2　本研究の目的と進め方および研究の意義 …… 2

1.3　研究成果の概要 …… 2

第2章　フェライト結晶の性質とその精密加工に関する従来の研究 …… 6

1.　フェライト結晶の性質 …… 6

1.1　結晶構造と磁気特性 …… 6

1.2　フェライト結晶の力学的・化学的性質 …… 8

2.　磁気ヘッド製作技術の特異性 …… 10

2.1　磁気ヘッド概要 …… 10

2.2　磁気ヘッド製作技術の特異性 …… 11

3.　フェライト結晶の精密加工と磁気ヘッド製作技術の従来の研究 …… 11

3.1　フェライト結晶の精密加工の研究 …… 11

3.2　磁気ヘッド製作技術の研究 …… 12

4.　本章の総括 …… 13

第3章　フェライト結晶の砥粒加工特性 …… 16

1.　緒　　言 …… 16

2.　微小変形特性 …… 16

2.1　試　　料 …… 16

2.2　微小押し込みと引っかきによる変形特性 …… 16

2.3　本節のまとめ …… 20

3.　砥粒加工特性 …… 22

3.1　研削面の形態 …… 22

3.2　ラッピング面の形態 …… 22

3.3　超仕上げ加工面の形態 …… 22

3.4　ピッチポリシング面の形態 …… 26
3.5　本節のまとめ …… 26
4.　フェライト結晶の加工変質層 …… 27
4.1　ダイヤモンド圧子の引っかきと押し込みによるクラック侵入深さ …… 27
4.2　研削とラッピングによる破壊層 …… 31
4.3　微小砥粒ラッピング・ポリシングによる加工変質層 …… 36
4.4　本節のまとめ …… 37
5.　本章の総括 …… 39

第4章　加工変質層による磁気特性の変化（Ⅰ） …… 41
— ラッピング・ポリシングによる磁気特性の変化 —
1.　緒　　言 …… 41
2.　磁気回路に垂直に挿入された加工変質層の影響 …… 41
2.1　加工変質層厚さと透磁率変化の関係 …… 41
2.2　実験方法 …… 42
2.3　実験結果と考察 …… 43
2.4　本節のまとめ …… 45
3.　磁気回路に平行な加工変質層の影響 …… 45
3.1　磁歪にもとづく透磁率変化の計算 …… 45
3.2　残留応力の測定 …… 50
3.3　磁歪定数の測定 …… 55
3.4　応力と透磁率変化の関係 …… 57
3.5　結果と考察 …… 61
3.6　本節のまとめ …… 62
4.　薄片コアの磁気特性と再生特性 …… 62
4.1　透磁率と再生効率の関係 …… 63
4.2　薄片コアの透磁率測定 …… 63
4.3　モデル法による再生電圧測定 …… 68
4.4　本節のまとめ …… 73
5.　本章の総括 …… 73

第５章　加工変質層による磁気特性の変化（Ⅱ）…… 76
— ガラスの拡散層における磁気特性の変化 —
1.　緒　　言 …… 76
2.　ガラス接着におけるフェライト・ガラス成分の相互拡散 …… 77
2.1　実験試料と実験方法 …… 77
2.2　結果と考察 …… 80
2.3　本節のまとめ …… 85
3.　相互拡散による磁気特性への影響 …… 85
3.1　実験方法 …… 85
3.2　結果と考察 …… 86
3.3　本節のまとめ …… 92
4.　磁気コアギャップへのガラスの流入特性 …… 93
4.1　２平面間へのガラスの流入特性 …… 93
4.2　実験方法 …… 95
4.3　結果と考察 …… 98
4.4　本節のまとめ …… 99
5.　本章の総括 …… 100

第６章　ＥＥＭの原理を利用した平面加工装置の開発 …… 102
1.　緒　　言 …… 102
2.　装置設計 …… 103
2.1　工具面形状設計 …… 103
2.2　設計した装置 …… 110
2.3　試作工具 …… 111
3.　浮上特性 …… 112
3.1　測　定　法 …… 112
3.2　浮上特性 …… 113
4.　加工特性 …… 115
4.1　加工面の形状精度 …… 115
4.2　加工面の結晶性の評価 …… 119

4.3　加工能率 …… 126
5.　本章の総括 …… 127

第7章　磁気ヘッドの製作に必要な加工技術 …… 129
1.　緒　　言 …… 129
2.　形状研削 …… 129
2.1　樹脂結合砥石 …… 131
2.2　磁気ヘッドの形状研削 …… 131
2.3　本節のまとめ …… 133
3.　浮上面加工 …… 134
3.1　加工方式と加工機の設計 …… 134
3.2　円筒面ラッピング・ポリシング …… 138
3.3　異種材料からなる浮上面の加工 …… 142
3.4　本節のまとめ …… 145
4.　Mn－Znフェライトのメカニカル・ケミカルポリシング …… 145
4.1　実験方法と加工条件 …… 146
4.2　実験結果と考察 …… 146
4.3　本節のまとめ …… 153
5.　薄片コア加工用高精度接着技術 …… 153
5.1　接着剤の特性 …… 153
5.2　薄い接着層の形成 …… 157
5.3　接着強度の測定 …… 158
5.4　基板の高精度加工への適用 …… 160
5.5　本節のまとめ …… 160
6.　本章の総括 …… 160

第8章　磁気ヘッドの試作 …… 163
1.　緒　　言 …… 163
2.　構造設計 …… 163
2.1　ヘッドコアとスライダ形状 …… 163

2.2　浮上力の計算 …… 164
2.3　支持ばねの変形特性 …… 169
2.4　振動特性 …… 174
3.　磁気ヘッドの製作 …… 176
4.　試作ヘッドの特性 …… 179
4.1　静的な変形特性 …… 179
4.2　浮上試験と磁気特性の測定 …… 181
5.　本章の総括 …… 187

第9章　結　　論 …… 189

謝　　辞 …… 193

第1章　緒　論

1. 本研究の必要性と目的

1.1 本研究の必要性

多量の情報を高速に処理するために，大容量，高性能の磁気ディスク記憶装置が必要であり，その電磁変換部品としての磁気ヘッドに対して小形・高性能化が要求されている[101]。

磁気ヘッドの製作技術においては，コア材料であるフェライト結晶をはじめ各種構成部品の精密加工法とその組立・構成法，さらに構成された部品全体の形状加工法など多種の加工技術が適用されている[102]。ラッピング・ポリシングなどの平面加工[103]，研削に代表される形状加工[104]，ガラス接着のような組立・構成[105]，および浮上面の成形加工など[106]がその中味であり，それぞれの機能と目標に応じて，一つの部品を製作するために系統的な研究が必要である。

フェライト結晶の精密加工に関しては，従来のセラミックスや半導体，水晶など結晶加工[107), 108), 109]の研究をもとに，まず，鏡面加工法の研究が始められ[110]，コアの形状加工法[111]へ展開されてきた。これと並行して磁気特性の向上や，気孔密度の減少[112), 113]をめざした材料の開発，さらに高性能の磁気ヘッドの開発の研究が進められた。このような研究の進展にともなって，加工変質層と透磁率[114]，ヒステリシスループ[115]，磁区模様[116]など基本特性の関係をはじめ，磁気ヘッドの記録・再生特性などの総合的な部品特性への影響に関するデータも追求されてきた。しかしながら，加工変質層の実体が明確でない上，磁気特性における複雑な要因とも関連して，両者の関係を明確に説明する機構の提案は皆無に近い。例えば透磁率の低下に対して，加工変質層における結晶構造の乱れやひずみ，応力の要因が定量的にどのように結びついているかを明らかにし，それらの要因を生じさせない，加工変質層のない加工技術の研究が必要である。

一方，加工変質層と材料物性変化の問題はフェライト結晶に限らず，他の電子部品用結晶材料においても重要なテーマとなっている。すなわち，Si 等半導体結晶では，育成される結晶そのものが無転位で品質が優れるところから[117]，加工による結晶の乱れが明確に分離できること，結晶が完全に近いほど応力・ひずみの影響を受けやすく，また加工変質層によって素子の接合リーク[118]や雑音特性の劣化[119]が著しいなどの報告がある。この他誘電体結晶における光学的特性の劣化[120]，化合物半導体結晶における，ホトルミネッセンス特性[121]の異常など加工変質層の影響を指摘する研究例は多い。

以上のように，結晶材料の物性を有効に活用し，高性能の電子部品を開発するためには，要求される部品の寸法・形状精度を実現し，かつ，材料本来の物性を損傷しない精密加工技術の研究が必要である。

1.2　研究の目的と進め方および研究の意義

電子部品用の結晶材料を高精度に，加工変質層も無く加工する精密加工法の研究を行い高性能電子部品の一製作技術を提示する。このため，まず結晶材料の物理的，化学的および機械的性質を明らかにする。これらの性質が実際に加工した結晶にどのように反映されるかを，従来加工法で加工した面を評価して明らかにするとともに，従来加工法の問題点を追求する。特に材料の物性が加工変質層の結晶構造の乱れや残留応力および異種材料の拡散によって，どのように変化するかを解明する。このように加工変質層のない加工法が電子部品の性能向上にとっていかに重要であるかを明確にして，新しい精密加工法を開発する研究を行う。さらに以上の研究結果を適用して，実際の部品を設計・製作し，その特性を明らかにして，研究成果を評価する。

具体的に対象とした電子部品は磁気記録用の磁気ヘッドで結晶材料はフェライト結晶である。フェライト結晶を研削，ラッピング，ポリシングなど従来の砥粒加工法で加工したとき発生する加工変質層，および磁気ギャップ形成のためガラス接着したときの相互拡散層によって磁気特性，特に透磁率が低下する実態と機構を明らかにする。この結果を背景として，加工変質層の生じない加工法を開発し，これを適用して磁気ヘッドを製作し，その記録密度を測定して磁気ヘッド製作技術を評価する。

本研究の意義は工業的な点において，(1)高精度，低加工変質層の精密加工法の開発により電子部品の性能を向上させうること，(2)従来の加工法では得られない加工特性を実現することにより，精密機械加工の応用分野が拡げられること。(3)小形・高性能の磁気ヘッド製作技術の確立に貢献できることにある。一方，工学的な点においては，(1)フェライト結晶の加工変質層による磁気特性の変化を一例として，結晶構造の乱れや応力と物性変化の関係を解明すること，(2)(1)によって加工変質層の詳細な構成を定量的に明らかにすることによって各種加工法のミクロな加工機構を解明することに手がかりを与えることにある。

1.3　研究成果の概要

各種データ・情報を整理・蓄積し，これを有効に活用するためには高性能・大容量の記

録・再生装置が必要である。この種の多くの装置の中で磁気ディスク記録装置は，大容量，情報単位の低価格，情報転送速度の高速性などの点で長年にわたって重要な位置を占めている。本研究は，磁気ディスク装置の主要部品の一つである磁気ヘッドの製作技術に関するもので，特にヘッドコア材料であるフェライト結晶の精密加工技術と装置の開発を目的として進めたものである。

フェライト結晶は硬くて脆い材料であり，磁気ヘッドコアでは，μm ～サブμm の寸法・形状精度と低加工変質層の加工が必要なことから，多くの加工技術の研究が行われてきた。多種加工法における加工現象の追求，限定された手法内における最適加工条件の設定，加工変質層と物性変化の関係の把握などである。

本研究では，従来のフェライト結晶の加工に関する研究のみならず，ガラス・その他結晶材料の精密加工の研究を基礎として，加工現象の解釈，特に加工変質層の磁気特性に与える影響の解明や，加工変質層の少ない加工法に独自の考案を行うとともに，磁気ヘッドの製作に必要な技術の全般を系統的に研究し，各々の技術を設計した磁気ヘッドの試作に適用し，その性能を測定することにより評価したものである。

本論文は以下の9章から成っている。第1章（3節）は「緒論」であって，磁気ヘッドコア用フェライト結晶の精密加工研究の必要性，目的ならびに意義と本研究成果の概要を述べた。

第2章（3節）は，加工現象および磁気ヘッド性能に関連の深いフェライト結晶の諸性質，その精密加工と磁気ヘッド製作技術の特異性ならびに従来の研究結果を述べた。

第3章（5節）では，研削，ラッピング，ポシリングなど一般的な砥粒加工法における加工特性を単結晶，焼結材，ホットプレス材などについて材料特性を対比させて明らかにした。またそれぞれの加工変質層の発生形態も示した。

第4章（5節）では，従来の加工法で生ずる加工変質層がフェライト結晶の透磁率を低下させる状況を定量的に示した。磁路内に存在する結晶構造の変質層の磁気特性を測定する方法を考案するとともに測定値の実例を示した。また加工変質層の残留応力がフェライト結晶の逆磁歪効果を誘起して透磁率を低下させる機構を，磁化過程の基礎理論と実験により，単結晶の限定された試料に対して解明した。さらに加工変質層を有するコアの再生効率を評価して，高性能ヘッドの製作にとって加工変質層のない加工法の開発の重要性を確認した。

第5章（5節）では，磁気ヘッドコア製作における特殊な技術である，ガラスギャップ

形成法の問題点と解決法について示した。すなわち，フェライトとフェライトをガラス接着して1μm前後の磁気ギャップを形成する際，フェライトとガラス成分の相互拡散によって透磁率が低下する現象を定量的に測定した。拡散は設計したギャップ長を変動させることを明らかにするとともに狭小ギャップへの高粘度ガラスの流入特性に理論的な根拠付けを行い，相互拡散のない高精度狭小ギャップの形成条件の一例を示した。

第6章（5節）において，第4章の加工変質層のない加工法開発の要請を受けて，新しい加工法の研究内容を述べた。その加工機構はEEM（Elastic Emission Machining）に基づくものであり，φ80mm前後の結晶平面を複数・同時に加工できるのが特徴である。試料平面に対向する環状定盤面に放射状のテーパ・フラット分割部が多数配され，液中で回転させることにより，浮上力が発生し，定盤と被加工面が接触することなく加工が進行する。流体動圧力の計算を行い，これを基に定盤面形状を設計・試作した過程，加工特性の状況，加工面の物性的な評価，フェライト結晶以上に低加工変質層の要求される半導体Si結晶の加工に適用した結果等を示した。

第7章（6節）では，前章までに研究した以外の磁気ヘッドの製作に必要な技術の研究成果をまとめて示した。それらは，(1)断面が台形の尾根形の形状研削技術，(2)磁気ヘッドスライダの浮上面加工技術，(3)フェライト結晶のメカニカル・ケミカルポリシング技術，(4)薄片試料の高精度加工用試料接着技術に関するものである。(1)では耐摩耗性の高い樹脂結合ダイヤモンド砥石，(2)では曲率半径の大きい円筒面のラッピング・ポリシング装置(3)では高能率・低加工変質層加工技術，(4)では薄層・均一接着層形成技術の各々の研究内容を述べた。

第8章では，本論文に述べた研究内容の総括的評価を実際のヘッドの製作とその特性測定によって行った結果を示した。研究内容の製作技術を活用し得る磁気ディスクヘッドを独自に設計し，その試作を行って記録・再生特性を測定した結果，高記録密度を得ることができた。

第9章では本研究の結論を整理した。

参　考　文　献

101）　中西卓二，木暮賢司ほか：通研実報，28，10（1979）2229

102）　馬場彦良，竹内政夫ほか：日本物理学会誌，25，3（1970）226

103）　和田俊明，林輝昭：住友特殊金属技報，5（1980）73

104）　三宅正二郎，渡辺純二ほか：精密機械，43，12（1977）1415

105）　三野満子，渡辺純二：精密機械，44，6（1978）685

106）　Bowen A.J.et al：IBM Tech.Disclosure Bull.,20, 8(1978)3248

107）　井田一郎，新井湧三：精密機械，25，13（1959）532

108）　池田正幸，山田昭政ほか：電総研報告，709（1970）1

109）　今中　治：機械の研究，21，10（1969）1380

110）　小宮　昇ほか：昭和38年精機学会秋季大会前刷（1963）5，7

111）　A.L.Studts, J.Verweel et al：IEEE Trans Commun, & Electronics, 83, 75(1964)726

112）　H. Sugaya：IEEE Trans Mag. 4(1968)295

113）　A. Lagrange, J. Nicolas et al：IEEE Trans Mag.8, 3(1972)494

114）　J. E. Knowles：J. Phys. D. Appl. Phys., 3(1970)1346

115）　K. Chiba et al：Intl'. Conf. on Ferrite (1970)8A3

116）　木下正治ほか：昭和50年精機学会春季大会前刷（1975）403

117）　K. Hoshikawa et al：Semiconductor Silicon(1981)101

118）　A. Taloni and W. J. Rogers：Surface Science, 19(1970)371

119）　森　勇蔵ほか：高精度，6－1（1975）32

120）　河西敏雄，野田寿一ほか：通研実報，20，4（1971）915

121）　B. Tuck：Phys.Stat.Sol.36 (1969)285

第2章　フェライト結晶の性質とその精密加工に関する従来の研究

1. フェライト結晶の性質

1.1　結晶構造と磁気特性

フェライトはFe_2O_3と2価の金属酸化物との化合物で，ここに扱う磁気ヘッドコア用フェライトはスピネル型である。天然鉱物スピネル（Spinel，$MgA\ell_2O_4$）と同型の結晶構造を有するフェライトの総称で，Mn－Zn，Ni－Zn系フェライトは複合フェライトである。図2.1にその結晶構造を示す[201)]。基本形は立方晶で結晶の単位細胞は8分子式のイオンからなる。すなわち24個の金属イオン（MとFe）と32個の酸素イオンを含む。たとえばMnとZnのフェライトを等量混ぜたMn－Znフェライトは分子式$Mn_{0.5}Zn_{0.5}Fe_2O_4$であらわされ，これらの固溶体形成により初透磁率や磁気飽和値を増大させている。

磁気ヘッドコア材料の重要な磁気特性として透磁率μがある。μはヒステリシス曲線（図2.2）における，磁界Hに対する磁束密度Bの比であらわされ，磁化の容易なものほど大きくなる。磁化の機構は結晶構造と密接に関連している。例えば，フェライトなど強磁性体の1個の結晶をとり出して測定すると磁化し易い方向（磁化容易方向）としにくい方向（困難方向）がある。Mnフェライトなどでは<111>方向が容易方向で<100>方向が困難方向である。このように結晶方向によって磁気的特性が異なる性質は結晶磁気異方性と呼ばれている。正常な結晶において，容易方向に安定したスピンを困難方向に向けるために必要なエネルギK^*（J/m^3）は異方性定数[202)]と呼ばれる。

結晶構造に関連する物性として前述の異方性と磁わい（磁気ひずみ）がある。これは磁化によって試料の寸法が変わる磁わい現象として知られ，2つの磁わい定数λ_{100}，λ_{111}をもちいて，表現される[**]。ここにλ_{100}，λ_{111}はそれぞれ<100>，<111>方向に飽和

＊　立方晶の結晶磁気異方性エネルギ

$$E_A = K_1 \Sigma \alpha_i^2 \alpha_j^2 + K_2 \alpha_1^2 \alpha_2^2 \alpha_3^2 + \cdots\cdots$$

（$\alpha_1 \alpha_2 \alpha_3$）：スピンの方向余弦

＊＊ 磁気ひずみ

$$\lambda = \frac{3}{2} \lambda_{100} \left(\alpha_1^2 \beta_1^2 + \alpha_2^2 \beta_2^2 + \alpha_3^2 \beta_3^2 - \frac{1}{3} \right)$$

$$+ 3 \lambda_{111} \left(\alpha_1 \alpha_2 \beta_1 \beta_2 + \alpha_2 \alpha_3 \beta_2 \beta_3 + \alpha_3 \alpha_1 \beta_3 \beta_1 \right)$$

$\beta_{1,2,3}$：観測方向余弦

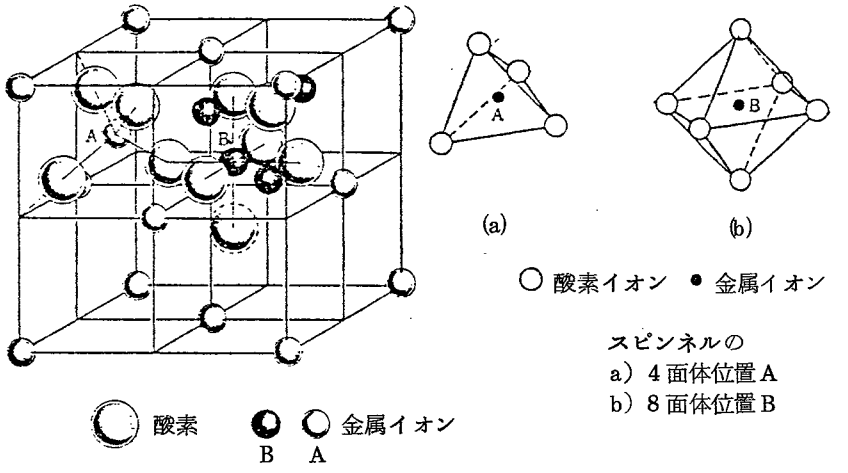


図 2.1　スピンネル型フェライトの結晶構造

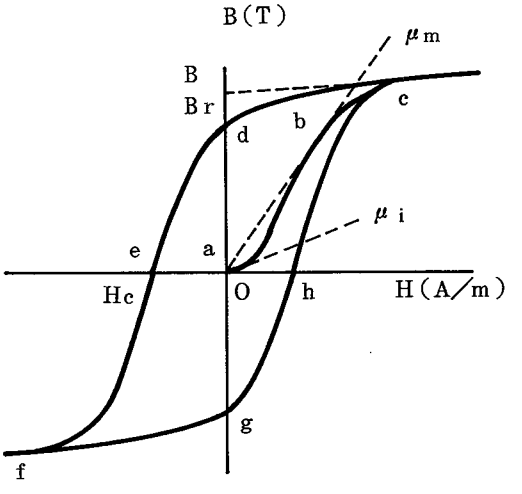


図 2.2　ヒステリシス曲線
（B－H曲線）

磁化したときのその方向ののびである。

透磁率μとKの関係は$\mu \propto 1/K$であり，また，磁気ひずみλによって内部の弾性エネルギが高いと磁化しにくいためμとλの関係も$\mu \propto 1/\lambda$となる。すなわち，Kとλが小さい場合，最も高いμとなる。ところで，加工などによって結晶構造に乱れを生ずると各々の容易方向そのものが不整いとなり，かつ，ひずみによって逆に容易方向も曲げられてしまうため，磁化過程に変化が生じ，透磁率も変わることが予想できる。フェライトなど強磁性体の磁化状態は磁区模様によって観察できる。これは1～10^{-3}mm程度の小磁石的部分で，磁区の磁化方向は安定状態で容易方向を向いている。磁区の境界が磁壁である。透磁率は磁化のされ易さを表わしており，磁化は磁壁の移動によって起こる部分もあるので，一定磁界中における磁区の方向や大きさは透磁率とも関連している。また結晶の乱れや応力は磁壁の移動にも障害となるため，磁界中における磁区形態の観察は加工変質層の検定にも利用できる。

フェライト多結晶は粉末焼結によって形成される。焼結法は多種あり，空孔密度，粒径の制御のため，真空中焼結，加熱中加圧するホットプレス法，最近では静水圧によるガス中焼結（HIP）などが用いられている。焼結法や添加剤によって変動する結晶粒径，密度，などは，透磁率，保磁力，高周波特性などの物性にも大きな影響を及ぼす。[203)]

1.2　フェライト結晶の力学的・化学的性質

ビッカース微小硬さ650～750の硬くて脆い材料に属するが[204)]，その変形特性の詳細は第3章で実験結果に基づいて述べる。結晶の変形破壊における異方性はすべり系{110}，〔110〕，へき開面が{100}であることが報告されている[205)]。しかし，各々の異方性はイオン結晶や，化合物半導体におけるものほど明確ではない。一方，多結晶フェライトでは，製造法のちがい，添加成分のちがいで，空孔密度，結晶粒径に差が生じ，これが硬さやクラック発生，粒子の脱落，クラック伝ぱなどの変形特性に大きな差がある。これらの特徴についても第3章で詳述する。

フェライト結晶の各種化学液に対する溶解性は表2.1に示す[206)]とおりである。Mn－Zn系とNi－Zn系ではその特性が異なり，Ni－Zn系が安定性が高い。この傾向は熱処理における組織変化の傾向とも対応する。すなわちMn系フェライトでは，空気中の焼成で酸化されやすく$\alpha-Fe_2O_3$などの析出を生ずる。磁気ヘッドコアの製作ではガラスギャップ形成に熱処理工程があり，このときの雰囲気ガスはMn系で不活性ガスを使うなどの配

慮が必要である。

表 2.1　各種フェライトの無機酸に対する溶解性

フェライトの種類		無機酸						
		濃塩酸（95～100℃）	塩酸（1+1）（95～100℃）	硫酸（1+5）（95～100℃）	過塩素酸（70%）～（190℃）	濃硫酸＋濃リン酸（120～220℃）	濃リン酸（100～200℃）	強リン酸（200～260℃）
マンガン系フェライト	Mn フェライト	◎	◎	×	×	◎	◎	◎
	Mn－Zn フェライト	◎	◎	◎	○	◎	◎	◎
	Mn－Mg フェライト	◎	◎	○	○	◎	◎	◎
	（Mn－Cu－Zn－Cr フェライト）	◎	◎	◎	×	◎	◎	◎
銅系フェライト	Cu－Zn フェライト	◎	◎	◎	○	◎	◎	◎
ニッケル系フェライト	Ni－フェライト	△	△	×	×	◎	◎	◎
	Ni－Zn フェライト	△	△	×	×	◎	◎	◎

各種フェライトの溶解性（フッ酸，塩類，有機酸に対する）

フェライトの種類		フッ酸（1+4）（95～100℃）	塩類溶液		有機酸	
			シュウ酸アンモニウム（95～100℃）	酢酸アンモニウム（95～100℃）	シュウ酸 10%（95～100℃）	マレイン酸 10%（95～100℃）
マンガン系フェライト	Mn－フェライト	◎	◎	×	◎	×
	Mn－Zn フェライト	◎	◎	×	◎	△
	Mn－Mg フェライト	×	◎	×	◎	×
	（Mn－Cu－Zn－Cr フェライト）	◎	○	×	○	×
銅系フェライト	Cu－Zn フェライト	◎	○	×	○	×
ニッケル系フェライト	Ni フェライト	×	○	×	×	×
	Ni－Zn フェライト	×	○	×	○	×

試薬溶液添加量　20mℓ　試料各 200mg

◎ 完全に溶解　○ 70%以上溶解　△ 20%以下が溶解したもの　× 溶解しないもの

2. 磁気ヘッドの製作技術の特異性

2.1 磁気ヘッド概要

磁気ヘッドの機能は，記録媒体とヘッドによって構成される磁気回路の系で，信号の記録・再生・消去の三つがある。記録と消去は媒体を着・消磁するための電磁石としての機能で，高い磁気飽和値と低い保磁力が，再生の場合は媒体の磁化を高感度で検知するトランスジューサで透磁率の高さが要求される[207]。コアと媒体の相互関係のモデル図を図2.3に示す。

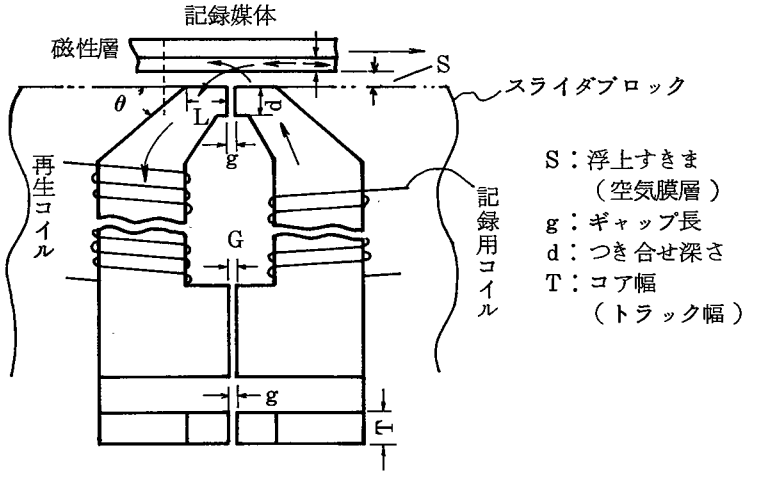
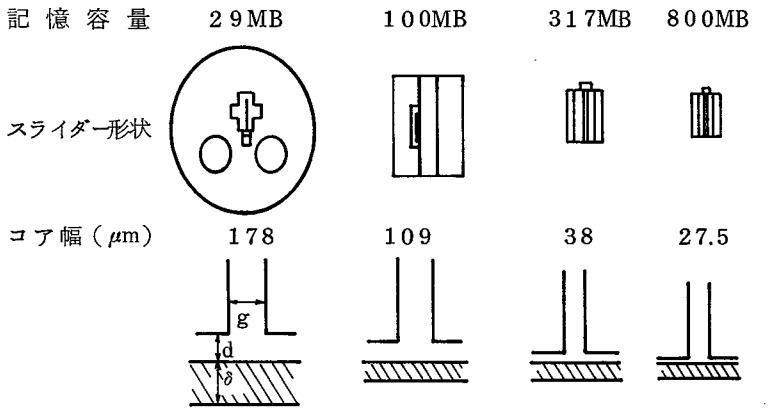


図2.3　磁気ヘッドコアと媒体間の相互関係

磁気ヘッドコア材料にフェライト結晶が使われるようになったのはパーマロイ等に比べ抵抗率が高く高周波損失が少ないこと，媒体との摺動による摩耗が少ないことなどによる。

図2.3において磁性層とヘッド端部のすきまSが小さいほど高い記録密度が得られる。計算機用ヘッドではコアがスライダと呼ばれるブロックに保持され，スライダと媒体面に相対運動を与えて，気体動圧による浮上力を発生させ，すきまSを空気膜層として狭くて安定な状態を形成している。この他，記録密度に関係するギャップ長gとコア幅T，スライダ形状，およびシステムとしての記憶容量の推移を図2.4に示す。現状ではさらに浮上量0.2μm，ギャップ長1μm以下，コア幅20μm以下が実現されつつあり，それぞれの加工，形成技術が必要となっている[101]。



ギャップ長g(μm)	2.7	2.5	1.4	1.3
浮上量d（μm）	2.2	1.2	0.5	0.36
媒体厚みδ（μm）	2.5	1.3	0.9	0.8
記録密度BPI	2200	4040	6250	9600

〔各種ヘッド，媒体の比較〕

図 2.4　磁気ディスク用ヘッドスライダの形状
記憶容量その他特性の推移

2.2　磁気ヘッド製作技術の性異性

磁気ヘッドにはその用途に応じて多種のものがある。おもに計算機の記録装置に使われる磁気ドラムやディスク装置用のヘッドについて考察する。加工技術からみた特徴は以下のようである。a）構成材料が多種にわたる場合がある。b）記録・再生の機能要素はフェライト結晶を加工したコアである。c）フェライトコアの加工では透磁率などの磁気特性を劣化させない高品質な加工技術が必要である。d）フェライトコアの加工では平面加工とともに高精度の形状加工技術が必要である。e）コアには磁気ギャップを形成する必要があり，1μm±0.1～±0.2μmの高精度ガラス接着技術を要する。f）磁気記録媒体面と0.2～0.5μmのスペースを保って浮上させるためにスライダ浮上面の高精度加工と，ばね支持機構構成法が必要である。このように設計・加工・構成・組立などの多様な技術に対して，多くの研究がなされてきた。

3.　フェライト結晶の精密加工と磁気ヘッド製作技術の従来の研究

3.1　フェライト結晶の精密加工の研究

フェライト結晶の加工については，まず鏡面加工条件の検討を目的として小宮[208]らによって，ラッピングおよび樹脂砥石による研削実験が行われ，砥粒加工の基本特性の把握が行われた。これらの現象を追求する中で，その現象の深い理解と制御を目標として，材料

に対する性質を明らかにする研究が行なわれている。Veldkamp,[209] 松緑ら[210]は結晶の機械的異方性，微小変形特性など加工性に関連した性質を引っかき実験におけるクラックの侵入形態から考察している。モデル的な砥粒作用の検討を基礎として，実際のラッピング加工におけるラップ量の結晶面依存性などが吉井[211]らによって明らかにされるとともに単結晶の各面のエッチピットを観察することによって結晶の劈開面，すべり面などが水島[205]らによって検べられた。しかしながらこれらのモデル的な変形特性，実際の加工特性，結晶の機械的異方性の間に明確な対応関係は得られていない。その後磁気ヘッドなどの製作を目的とした，実際的な加工条件を把握するための研究が各種の加工法に対して行われている。Groenou[212][213]，三宅[214]，小宮[215]らによる研削，元谷[216]らによる超仕上加工，Huynh[217]らによる電解バフ仕上の研究である。Huynh らはフェライトの仕上げに，複合的な加工法を導入して，加工能率や仕上面品質の改善をはかっている。磁気ヘッドコアの加工に必要な技術的研究が進展するにつれ，製作したコアの磁気特性に関する研究が行われた。津田[218]，木村[219]らによるテープ接触によるしゅう動ノイズの検討などがある。フェライト結晶材料の品質の改善，加工技術の進展，磁気ヘッドの高性能化が進むにしたがって，加工変質層が磁気特性を劣化させることが明らかになり加工法に対応したフェライト結晶の加工変質層の定量化および磁気特性との関係の研究が活発に行われた。特に加工ひずみによる透磁率の低下の現象は，多くの研究者によって報告された。Tanaka[220]らは静水圧と初透磁率の関係を，一の瀬[221]，Chiba[222]，馬場[102]らはポリシリグの影響を明らかにし，Knowles[114]は研削加工ひずみによる透磁率の異方性発生の問題を論じている。この他，ヒステリシス曲線に及ぼす影響については，Dillon[223]，Kornetzki[224]，佐々木[225]らが，また磁区模様の変化から逆に加工変質層の応力を定量化する試みがOzawa[226]，木下[227]らによって行われ，磁気特性の変化の機構解明にせまっている。こうした研究による多くのデータは，加工変質層の問題点を確認し，その低減化を要請するものである。これに対してフェライト結晶に関して，難波[228]，Wada[229]らの超精密加工に関する提案，Mendel[230]らによる酸化マグネシウムを使ったポリシング法は，今後の研究の1つの方向として注目されるが，現状では数少ない。

3.2　磁気ヘッド製作技術の研究

フェライトコアの加工からヘッドブロックの組立て，支持ばねの形成と記録・再生特性の把握までの一貫した内容の研究報告はほとんどない。現実には製作が実行されており，

各技術の裏付けがなされているはずであるが要因を分析し物理現象として考察を加える研究として扱いにくい側面があること，したがって純粋にノウハウ的な要素を多分にもっている点から，報告としてはあらわれないものと考えられる。その中で個別技術として報告されているものをあげて，本研究の位置づけを明らかにする。

馬場[102]，河田[231]，亀山[232]らはフェライトコアの加工とガラス接着における問題，組立ての問題に関して，フィールドデータをもとに若干の考察を加えている。加工以前の問題として磁気ヘッド端部と媒体間の磁場分布を考慮した構造設計の研究は数多いが形状加工として関連するものの，内容的に分野が外れる。ただMizushima[205]らの単結晶フェライトの方位と磁気ヘッド特性の関係についての研究は，加工時の結晶方位の決定法と関連して留意する必要がある。

ガラスギャップの形成に関しては，菅谷[233]，村山[234]，角井[235]らの報告があり，ギャップ長の制御法や，ガラスの拡散によるギャップ幅拡大現象が個々に扱われている。

スライダを含めたヘッド浮上面の形状加工法に対してWoolston[236]，Bowen[237]らが形状設計と球面加工について提案している。

また近年，スライダなどの加工法にイオンエッチング法がとり入れられ一括処理による高能率化の可能性がToshima[238]らによって報告されている。

製作されたヘッドの特性評価として，摩擦・摩耗的な観点から，Kehr[239]，Miyoshi[240]らが構成材料と形状の点に言及している。また構成したギャップのゆがみとその特性に及ぼす影響がMallinson[241]らによって報告され，製作技術へのフィードバックが期待されている。

この他半導体集積回路の素子製作法を応用した薄膜形のヘッドの加工，アッセンブリ技術について，Barton[242]，Berghof[243]，Barlow[244]などの報告がある。

このように，多くの研究者による個別の報告の対象とする部分だけを列挙すると製作技術全般にわたってほゞ網羅されているともとれるが，個々の対象とする材料，形状，用途，技術の間に関連性が少なく，相互にまたがった問題の抽出とその解決法の検討，たとえばガラス接着における拡散と加工変質層，ギャップ形成と加工精度，組立て精度を保証する加工精度と設計など統一的な観点による個々の技術の分析という内容は少なくなっている。

4. 本章の総括

本研究の背景となるフェライト結晶の力学的・化学的および物理的な性質を概観するとと

もに，フェライト結晶の精密加工，および磁気ヘッドの製作技術に関する従来の研究の一部をまとめた。

参　考　文　献

201）　たとえば電子材料工業会編：フェライト応用技術，誠文堂新光社（１９７２）８

202）　たとえば武井　武編：フェライトの理論と応用，丸善（１９６０）２３

203）　粉末冶金技術協会編：粉末ヤ金応用製品（Ⅱ），日刊工業新聞社（１９６４）１２２

204）　岡崎，広田：粉体粉末冶金協会講演会前刷（１９７１）

205）　M. Mizushima：J. J. A. P., 7, 8（１９６８）８９３

206）　２０３）文献　１５４頁

207）　２０１）文献　２６２頁

208）　小宮　昇ほか：昭和３８年精機学会秋季大会前刷（１９６３）5, 7

　　昭和３９年　〃　春季　〃　（１９６４）５７，５９

209）　J. D. B. Veldkamp：Int. Sym. Fract. Mech. Ceram.（１９７８）２７３

210）　松緑　剛：昭和４７年精機学会秋季大会前刷（１９７２）２９９

211）　吉井　誠ほか：昭和４６年精機学会秋季大会前刷（１９７１）

212）　Von Groenou A. B.：IEEE Trans Mag, 11, 5（１９７５）１４４６

213）　〃　：Sci. Ceram., 9,（１９７７）４８６

214）　三宅正二郎ほか：精密機械，４３，１２（１９７７）４１５

215）　小宮　昇ほか：精密機械，４１，７（１９７５）６６２

216）　元谷和雄：精密機械，４７，４（１９８１）３９３

217）　Huynh N. ほか：精密機械，４３，４（１９７７）４２１

218）　津田英俊：テレビジョン学会第５回録画研究会資料（１９６８）

219）　木村剛，小林信夫：電子通信学会技術研究報告，８０，１４８（１９８０）１

220）　T. Tanaka：J. J. A. P., 14, 8（１９７５）１１６９

221）　一の瀬幸雄ほか：日本金属学会誌，４３，１１（１９７９）１０４３

222）　K. Chiba et al：Ferrites, Proc. Intl'. Conf. on Ferrites. Universily of Tokyo Press,（１９７１）３５２

223) J. F. Dillon：J. Appl. Phys. 30, 2（1959）202

224) M. Kornetzki et al：Z. Angew. Phys. 13, 1（1961）31

225) 佐々木達治ほか：FUJITSU 17, 6（1966）97

226) K. Ozawa：Jpn. J. Appl. Phys. 18, 8（1979）1643

227) 木下正治ほか：精密機械, 43, 4（1977）457

228) Y. Namba et al：CIRP Ann 28／1（1979）

229) T. Wada：IEEE Trans Magn., 16, 5（1980）884

230) E. Mendel et al：IBM Tech. Disclosure Bull., 17, 8（1975）2343

231) 河田耕一：Natl'. Tech. Rep. 24, 6（1978）965

232) 亀山くに夫：機械の研究, 28, 1（1976）172

233) 菅谷　汎ほか：電通学会磁気記録研究会資料（1966）3－33

234) 村山智一ほか：昭和46年精機学会春季大会前刷（1971）334

235) 角井良治ほか：昭和45年電気四学会連合大会論文集, 1973（1970）

236) R. N. Woolston：IBM Tech. Disclosure Bull., 22, 12(1980)5435

237) A. J. Bowen et al：IBM Tech. Disclosure Bull. 20, 8（1978）3248

238) T. Toshima et al：IEEE Trans Magn., 15, 6(1979)1637

239) W. D. Kehv et al：Wear, 31,（1975）109

240) K. Miyoshi and D. H. Buckley：NASA Tech. Rep., TP－1339(1978) 23

241) J. C. Mallinson：IEEE Trans Magn., 5－1（1969）71

242) J. C. Barton et al：Radio and Elect. Eng., 26－Jan（1964）11

243) W. Berghof：Siemens Z, 52, 7（1978）434

244) M. Barlow, M. A. Church. et al：IBM Tech. Disclosure Bull., 24, 4（1981）, 912

第3章　フェライト結晶の砥粒加工特性

1. 緒　　言

第2章ではフェライト結晶の性質に関して概要を示した。本章では，磁気ヘッド材料として使用される各種フェライト結晶の機械的性質，研削，ラッピングおよびポリシングなど汎用加工法による加工面形態を実験結果をもとに概括する[301]。

フェライト結晶の加工法に関する研究では，対象材料あるいは加工法の1種について，鏡面加工法の条件[302]や研削特性[303][304]が報告されている。また微小引っかきにおけるクラック深さの検出法[305]の研究が行なわれている。しかし，各種材料特性の比較，加工法の違いによる材料挙動が統一的に比較・考察された例がない。

本研究では単結晶，焼結，ホットプレスなど製造法の違いによって性質の異なる各種フェライト結晶[306]を対象とした。実験的には砥粒の加工作用をモデル化して，ダイヤモンド圧子による押し込みと引っかき[307]を行い，その変形特性から材料間の差を示した。また，磁気ヘッド加工の工程に使われる，研削，ラッピング，ポリシングなど従来の汎用加工面の形態を材料特性の差と対照して比較した。これら従来加工法では，鏡面加工はできるが，いずれも厚い加工変質層の生ずることも示した。

2. 微小変形特性

2.1　試　　料

使用した材料を表3.1に示す。Mn－Zn単結晶フェライトの代表的な結晶面｛100｝，｛110｝，｛111｝，多結晶としては通常焼結，真空焼結，およびホットプレスフェライトである。単結晶における機械的異方性，多結晶における粒子径や気孔欠陥の大小が欠けの発生，粒子脱落，クラックの伝ぱに及ぼす影響を定性的に示す。

図3.1に多結晶フェライトの組織を示す。真空焼結による高密度フェライト（Mn－Zn系）の粒径が特に大きく，粒内に気孔欠陥を有すること，焼結では5μm程度の気孔欠陥が多く，ホットプレスでは微小な気孔欠陥が均一に分布していることが特徴である[306]。

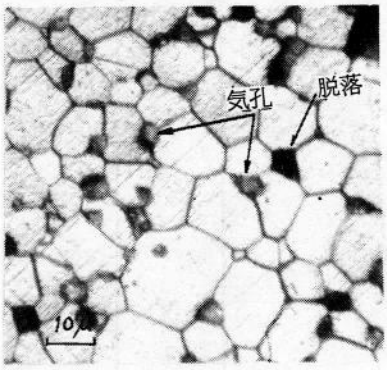
2.2　微小押し込みと引っかきによる変形特性

図3.2に各種フェライトの微小かたさを示す。おもな結果は次のとおりである。

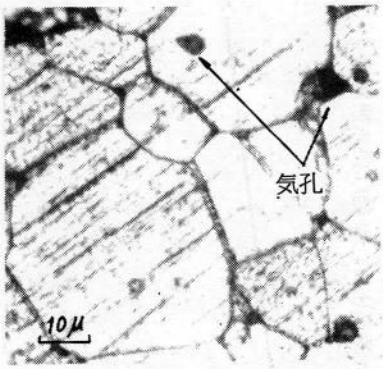
(1)　Mn－Zn系フェライトでは，単結晶と粒子径の大きい高密度がほぼ等しいかたさを示

表3.1　使用した試料の特性

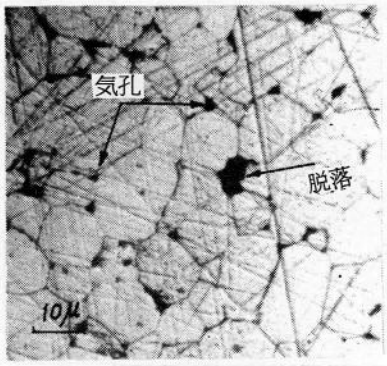
試　料	組　成	粒　径 (μm)	気孔率 (%)	面・方位	ビッカース微小かたさ H_v
単結晶	Mn－Zn系	——	0	{100} {110} {111}	650～750
焼結	Mn－Zn系	8～15	<5	——	500～550
高密度	Mn－Zn系 Ni－Zn系	30～80 8～15	<1 <1	——	700～750 700～800
ホットプレス	Ni－Zn系 Cu－Ni－Zn系	3～5 3～8	<1～5 <1～5	——	900～1000 750～800



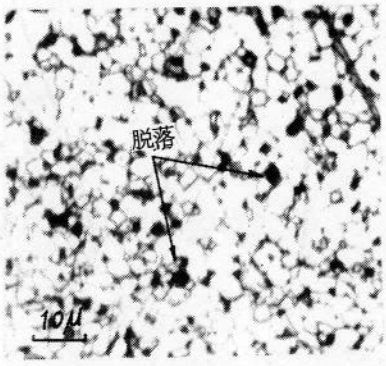
(a)　焼結フェライト
（Mn－Zn系）



(b)　高密度フェライト
（Mn－Zn系）



(c)　高密度フェライト
（Ni－Zn系）



(d)　ホットプレスフェライト
（Ni－Zn系）

図3.1　多結晶フェライトの組織
（研摩後HF液にて30～90秒エッチング）

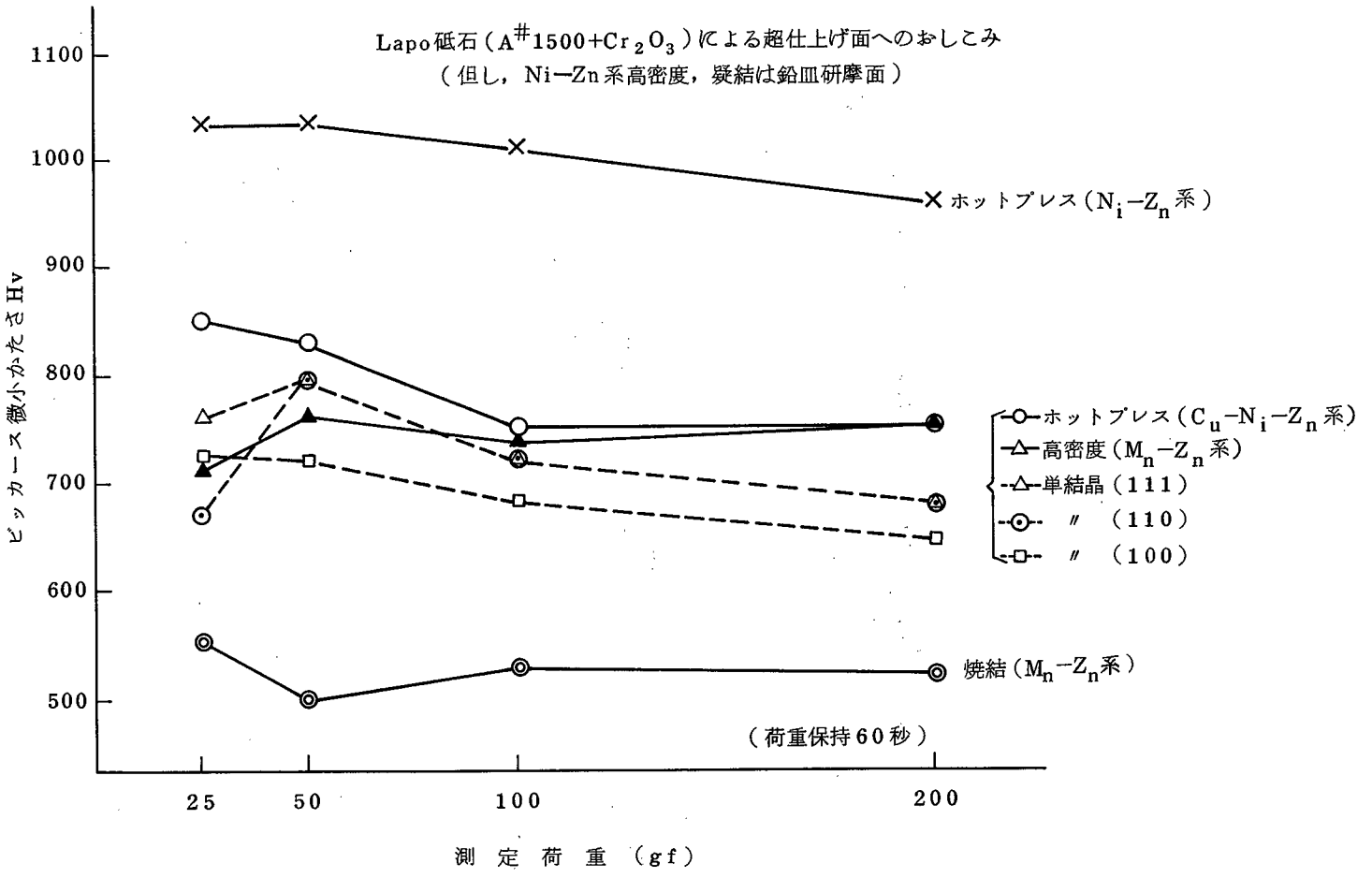


図 3.2　各種フェライトの微小かたさ

し，気孔欠陥の多い焼結では約30％低い。

(2) Ni－Zn系フェライトでは，気孔欠陥が小さく，かつ粒子径の小さいホットプレスがもっとも硬い。

(3) 粒界に押しこんだ圧こんと粒内に押しこんだ圧こんよりかたさを比較すると粒界では20～30％かたさが低い。

図3.3に単結晶フェライト｛110｝面上の圧こんの腐食像を示す。

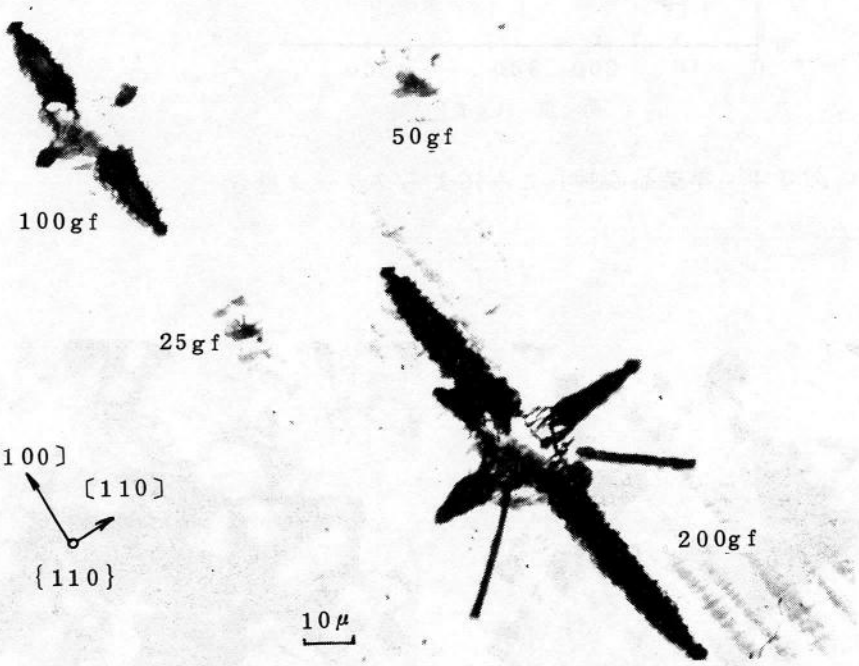


図3.3　単結晶フェライト｛110｝面の圧痕

へき開面にそった〔100〕方向に太く長いクラックが発生している。また25gf，50gfの負荷ではクラックの発生はなく，塑性領域の変形である。

図3.4には単結晶の各面上で圧こん周辺の全クラック長さの和を各荷重ごとに示した。へき開面上のクラックが発生しやすい。

図3.5は焼結フェライトの圧こん腐食前後の形態である。粒界の破壊がおこりやすく，腐食により粒子が脱落する。真空焼結やホットプレスした高密度のフェライトでは粒子間の結合力が強く，粒子内の破壊がおこる。

図3.6は微小引っかきこんの形態を示す。切込み深さ0.2μmの場合，引っかきこんには脆性破壊が生じていない。このことは，微細なカールした切くずのでることからも確かめ

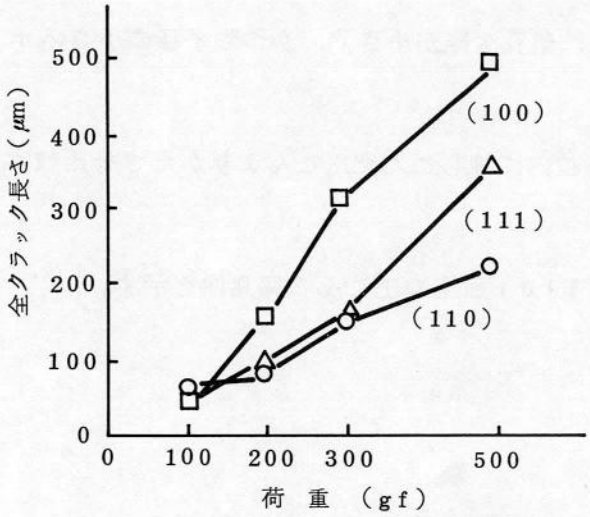
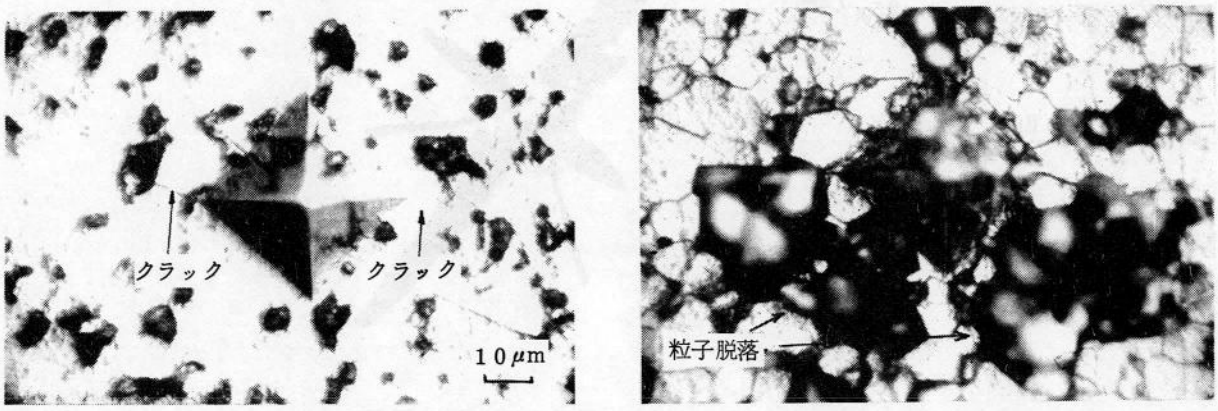


図 3.4　単結晶の押しこみによるクラック長さ



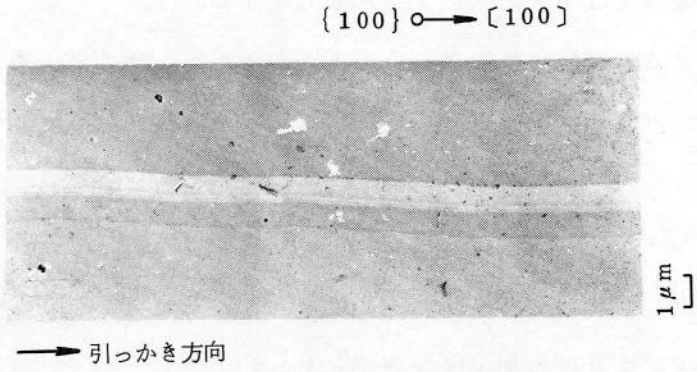
負荷500gf　エッチング前　　エッチング後

図 3.5　焼結フェライトの圧痕のエッチング前後

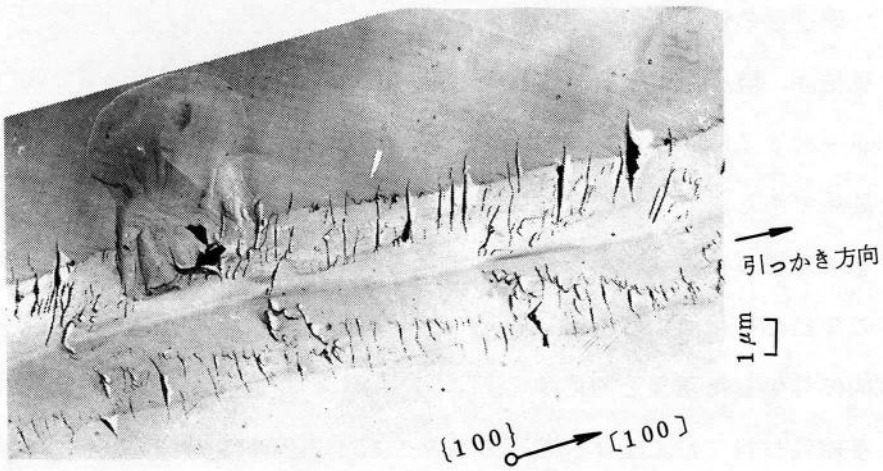
られた。切込み深さが0.7 μmに達するとみぞ側面に多数の細いクラックがはいり，部分的に破砕も生じる。切くずは粉末状で材料は脆性的に除去されている。焼結フェライトでは圧こんの押し込みと同様，欠陥近傍の欠けや脱落が著しい。

2.3　本節のまとめ

材料特性の異なる単結晶他各種多結晶フェライトにダイヤモンド圧子の微小押しこみと引っかきを行い，その変形特性を把握した。要約すると以下のようである。



(a)　垂直荷重２ｇｆ（切込み 0.2 μm）



(b)　垂直荷重１５ｇｆ（切込み 0.7 μm）

図 3.6　単結晶フェライト｛１００｝面の引っかきこん

（引っかき子形状：三角すい，１面頂角 112.4°
先端半径 0.27 μm
引っかき速度　：5mm／min）

(1)　単結晶フェライトの方が破壊をともなわない塑性変形が起こりやすい。多結晶では，粒界や気孔欠陥部において破壊，欠けが発生する。

(2)　単結晶フェライトの各方位面における硬さの異方性は１０～２０％で大きくない。変形の特徴としてはへき開面｛１００｝面に沿うクラックが発生しやすい。

(3)　粒界結合力の弱い焼結フェライトでは硬さが小さく，粒界破壊を起こしやすく，引っかきこん周辺で粒子の脱落が発生しやすい。

(4)　粒子径が大きく結合力の大きい多結晶では単結晶と同様な粒内クラックが伝ぱし，大

荷重による変形ではリング状クラックも発生する。

以上，総合すると硬脆材料のフェライトにおいても，極く微小な変形領域で塑性変形の領域が存在し，ポリシングなど微小変形加工における鏡面化の可能性が確認できる。

3. 砥粒加工特性

前節で変形特性を評価した各種のフェライト結晶に対して，汎用の研削，ラッピング，超仕上げなどの加工により砥粒加工性を評価した。

3.1 研削面の形態

単結晶，焼結，真空焼結（Ni－Zn系）およびホットプレスフェライトの研削面を図3.7(a)～図3.7(c)に示す。単結晶は｛110｝面を〔110〕方向に，切込み10μmで研削した結果である。加工面には，脆性破壊部，砥粒による切削条こん部，およびへき開ステップをともなう波紋状のクラックが広範囲に連続して発生しており，表面あらさも最も粗い。この単結晶研削面の特性は，圧子の押し込み実験で高荷重域において，クラックが長く多方向に発生した現象と対応する。

多結晶材料では，全体に粒子の脱落や粒子内のへき開，脆性破壊が多い。しかし，押し込み変形において，粒界破壊の多かった焼結等で，砥粒による塑性流動こんも多く見受けられる。

3.2 ラッピング面の形態

GC砥粒と鋳鉄皿によるラッピングを行った。図3.8に各種フェライトのラップ面の電顕写真を示す。単結晶では転動砥粒による微細な引っかきと押し込みによる塑性変形部が多く，大きなへき開割れや貝殻状破面はない。一方，多結晶では，部分的に単結晶と同様のラップこんがみられるが，粒子の脱落もあり，焼結材が特に多い。これら試料によるラップ面の相違は，微小押し込みの変形特性にあらわれた特徴と対応している。

3.3 超仕上げ加工面の形態

図3.9に各種フェライトの超仕上げ面の表面状態を示す。多結晶における気孔部，粒子脱落部を除いて，超仕上げにより1～2分で微細な引っかきこんの集積したRmax 0.1μm以下の鏡面となる[308]。

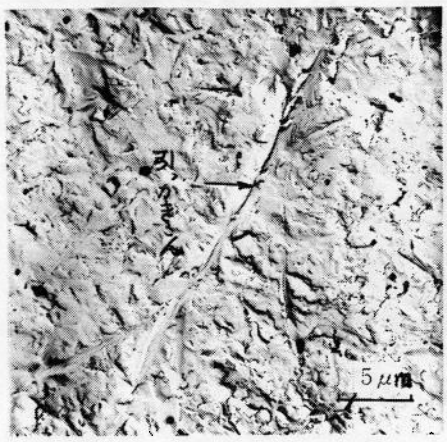
(a) 単結晶{110}

(b) 焼結(Mn−Zn系)

(c) 真空焼結(Ni−Zn系)

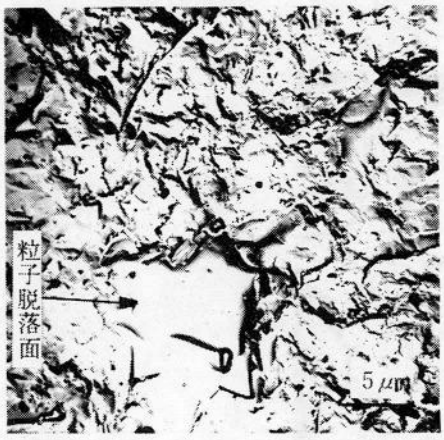
図3.7 各種フェライト研削面の電顕写真

研削条件	砥　　石	：D600P50M, φ100×10
	砥石周速	：1400m/min
	切込み	：20μm
	加工物送り速度	：0.6m/min

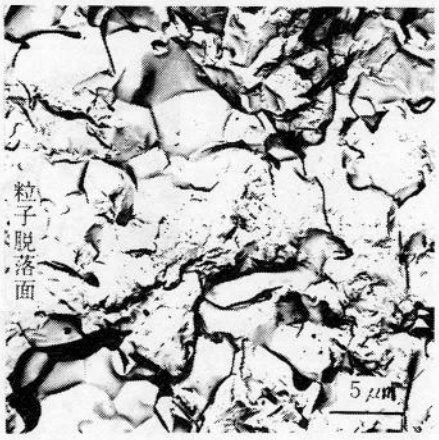


(a)　単結晶{110}

(b)　焼　結（Mn－Zn系）



(c)　真空焼結（Ni－Zn系）

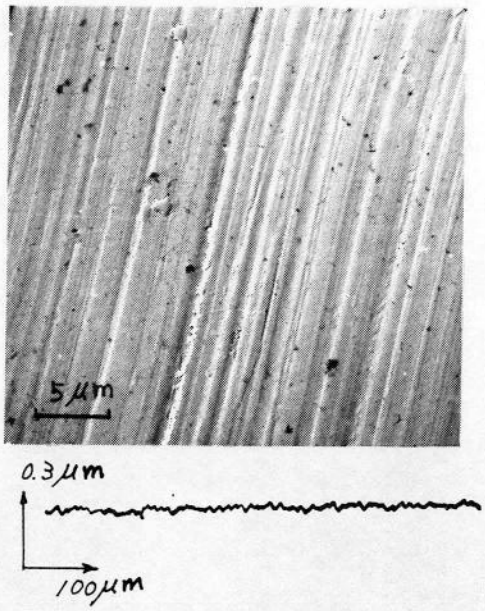


(d)　ホットプレス（Ni－Zn系）

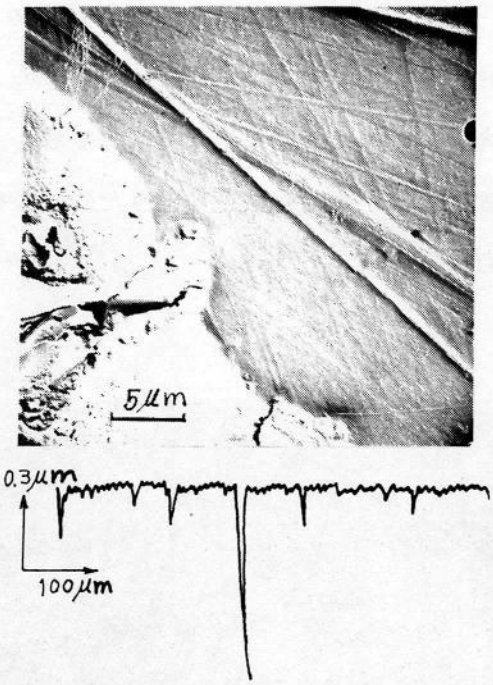
図3.8　各種フェライトラップ面の電顕写真

（GC#2000，鋳鉄，加工圧力：0.3kg／cm^2

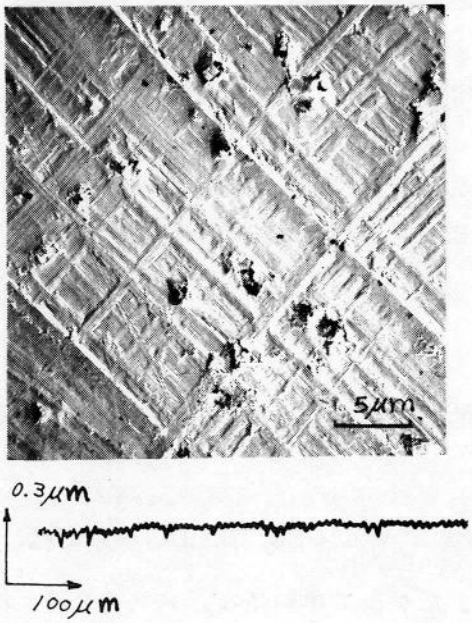
平均速度 25m／min）



(a)　単結晶フェライト
{１１０}



(b)　焼結フェライト



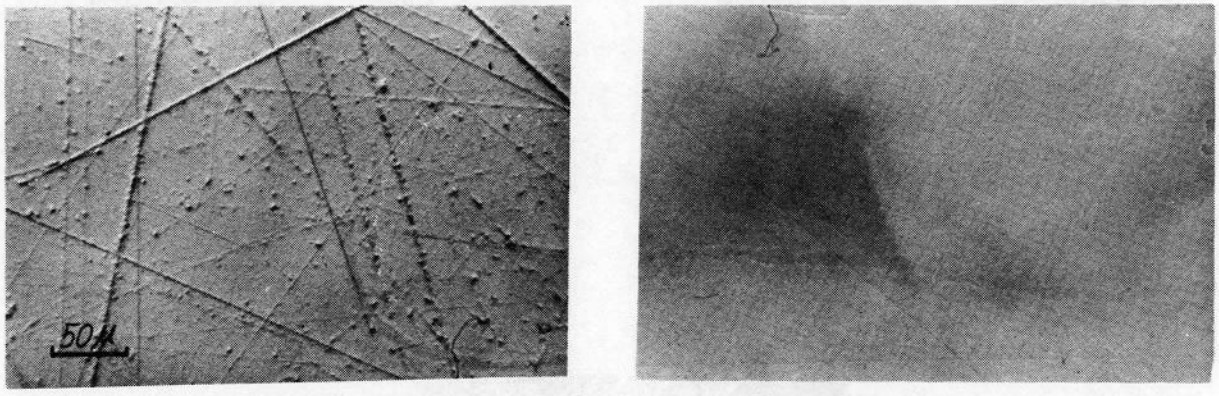
(c)　ホットプレスフェライト

図 3.9　各種フェライトの超仕上げ面の１例

（超仕上げ条件　砥石：レジノイドボンド砥石，ダイヤモンド平均径 3μm
加工圧力：0.1 ～ 0.3 kgf／cm²
砥石平均周速：９４m／min
振動数：３０cpm
加工液：軽油）

3.4　ピッチポリシング面の形態

図3.10に単結晶フェライト{100}面のピッチポリシング面状態を示す。(a)(b)は加工圧力の大小で明らかに差のでることを示したものである。すなわち，加工圧力が小さい場合，砥粒挙動が不安定で，砥粒転動こんが多い。加工圧力を増大させると砥粒が埋め込み固定され，作用粒子径が揃うため，粒径2〜3μmの砥粒を使ってもRmax 0.05μm の表面に仕上げられる[309]。



(a)　加工圧力 0.05 kgf／cm^2　　(b)　0.54 kgf／cm^2

図3.10　加工圧力によるピッチポリン面の変化
（砥粒：WA#6000，濃度：10wt％）

3.5　本節のまとめ

各種フェライトの一般的な平面加工を行って加工性を評価した。その結果をまとめると以下のようである。

(1)　メタルボンド#600ダイヤモンド砥石による研削では，へき開等の脆性破壊による加工が主体的である。したがって単結晶などクラックの伝ばしやすい材料で表面あらさが大きく，微小粒径よりなる多結晶では比較的あらさが小さい。

(2)　平均砥粒径8μm（GC#2000）程度のラッピングから，塑性変形によるラップ面が主体となる。したがって，気孔欠陥のない単結晶フェライトにおいて，最小の表面あらさを得る。

(3)　超仕上げ加工において表面あらさRmax 0.1μm以下の鏡面を得る。気孔欠陥が多く粒子結合力の小さい焼結フェライトでは，砥石面に目づまりを生じさせることにより，鏡面を生成できる。

(4) ピッチポリシングにおいて，低砥粒濃度，高加工圧力により，砥粒を埋め込み安定化させることにより，汎用加工でもっとも表面あらさの小さい加工面を得る。

4. フェライト結晶の加工変質層

本節では研削，ラッピング，ポリシングによって発生する加工変質層の形態，加工条件によるその深さ，材料特性との関係などを明らかにする。まず，研削やポリシングのモデルとしての単粒による引っかきこん下に生ずるクラック深さを測定し，研削，ラッピングなどの砥粒作用形態から実際の加工における深さを推定し，比較して砥粒切込み深さとクラック深さとの定量関係を示す。評価法は，斜め研摩とエッチング法の併用によるものと，電子回折法による一般的な結晶構造変化による方法である。物性による評価は次章以降で行うこととし，ここでは，評価を従来の既知の方法で行って，フェライトの材料特性を明確にすることを主眼とする。

4.1 ダイヤモンド圧子の引っかきと押し込みによるクラック侵入深さ

まず，ダイヤモンド三角錐による引っかき実験を行って，斜め研摩面のエッチングからクラック侵入深さを測定した。試料は前節までに使用した単結晶，多結晶の各種フェライト結晶である。引っかき実験の条件を表 3.2 に示す。三角錐の錐面による引っかきを行った。斜め研摩とエッチングによる観察手順を表 3.3 に示す。

表 3.2　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錐，底面三角形の 1 辺の長さ a，三角錐の高さ h のとき $\frac{h}{a}=0.127$，1 頂角 112.4°
引っかき方向	錐面引っかき，単結晶｛100｝面　〔100〕方向
引っかき速度	5mm／min
垂直荷重	2，5，10，15，20 gf.
材　料　面	ピッチポリシ面　Rmax　0.05μm以下 単結晶｛100｝面，一部｛110｝面

表3.3　斜め研摩－腐食法

加工面の保護	銀メッキ　3～5μm厚	
斜め研摩治具	中央部の試料はり付け台に4度の傾斜をつける。	
斜め研摩	GC #4000鋳鉄皿によるハンドラップ WA #6000 ピッチポリシング（ピッチKR－3，砥粒α－アルミナ1μ）	
腐食	単結晶・焼結用	高密度・ホットプレス用
腐食液	HF 12%液	HF 46%液
温度	20～25℃	70～80℃
時間	30～60秒	5～8分

押し込み実験はビッカース微小硬さ試験で荷重を25gf～500gfに変化させて行った。

図3.11に各種フェライトに対する引っかきにおける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ベキ関数で表示でき，脆性挙動が裏付けられる。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3.11を書き換えると図3.12になる。同じ切込み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深くなっているが，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，脆性が高いうえに，結晶粒が100μm前後に大きく成長したものもあり，かつ粒界の結合も強固で，粒界を貫いてクラックが伝ぱしやすいためである。図3.13に単結晶と焼結の引っかき痕下部へのクラック伝ぱの状態を示す。単結晶では切込み0.5μm以下では内部にクラックも発生せず塑性的な切くずの排出もある。しかしエッチングによって観察される変形痕跡の深さは約1.7μmあり，切込み深さの3倍余の変質域が存在することがわかる。一方，切込みが1μm強になると，十数μmの深さまでクラックが伝ぱしている。特に図の試料はへき開面にそう引っかきであるため著しく深い。焼結では，粒界結合が緩く，緩衝材としての効果のため，クラックの伝ぱが抑制されており，他の材料に比べてクラックが伝ぱし難い。

単結晶に対して，押し込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3.14に示す。深さ，幅の拡がりとも荷重に対してべき関数表示ができ，かつ深さと

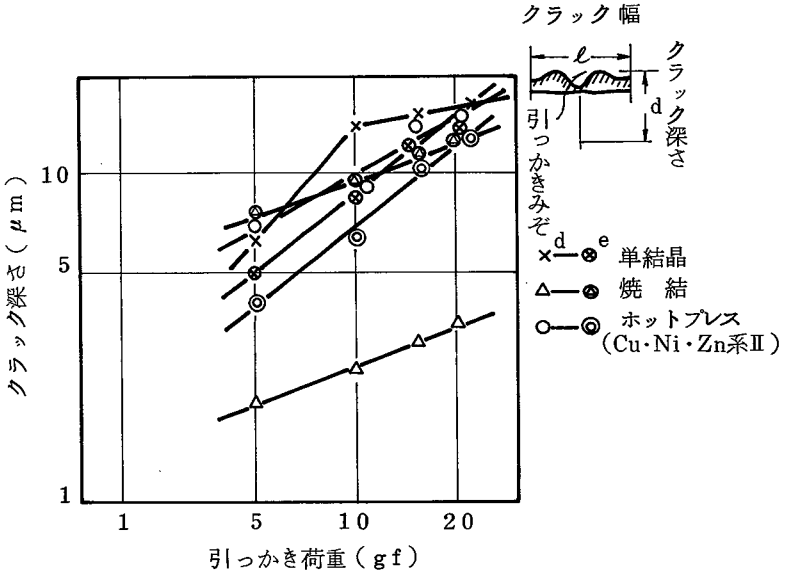


図 3.11　各種フェライト結晶の引っかき荷重に対するクラック幅と深さ

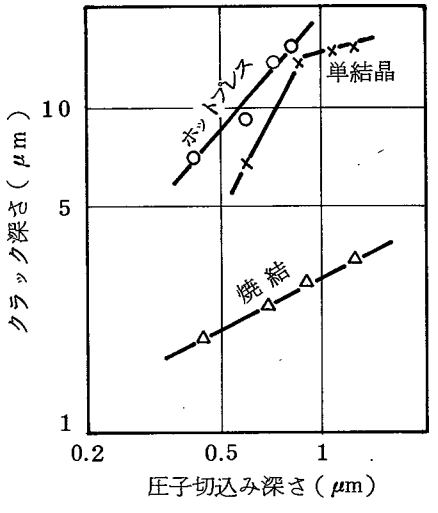
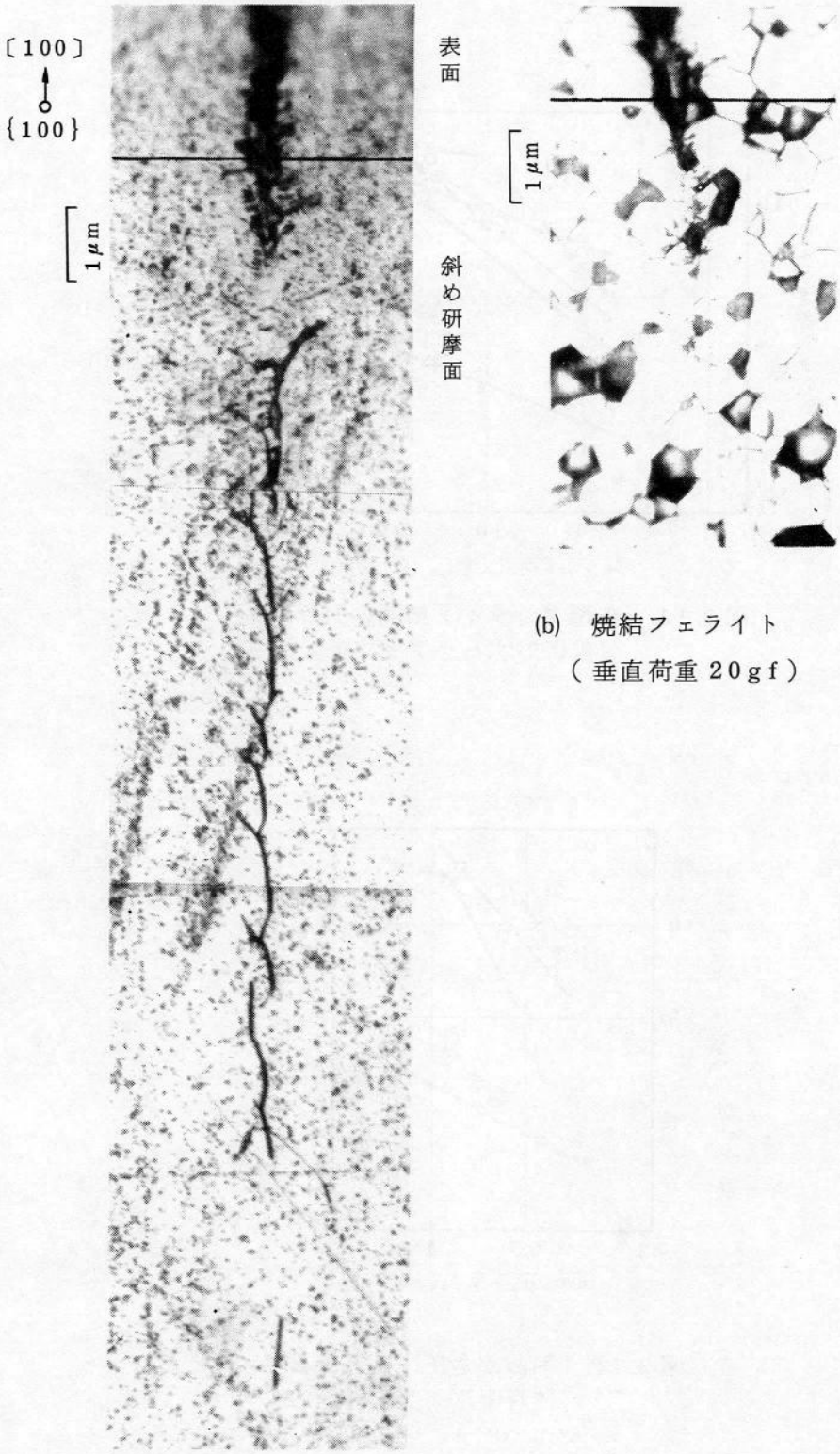


図 3.12　引っかき圧子切込み深さに対するクラック深さ



(b)　焼結フェライト
（垂直荷重 20gf）

(a)　単結晶フェライト（100）面
（垂直荷重20gf）

図 3.1 3　引っかき痕下部へのクラック伝ぱ状態
（斜め研摩後エッチングした面）

幅の比は一定である。このことは押し込み中心から三次元的にほぼ半球状に拡がることを示し，クラック伝ぱにおける脆性材料に共通の球殻論が適用できそうである。図3.15は圧痕の内部におけるクラックを深さ方向に研摩後エッチしたものと断面観察した結果である。圧子の陵部より発生する引張り破壊の状況と，球圧子をガラスに押し込んだ場合にみられると同様の2次割れの状態が明確になっている。

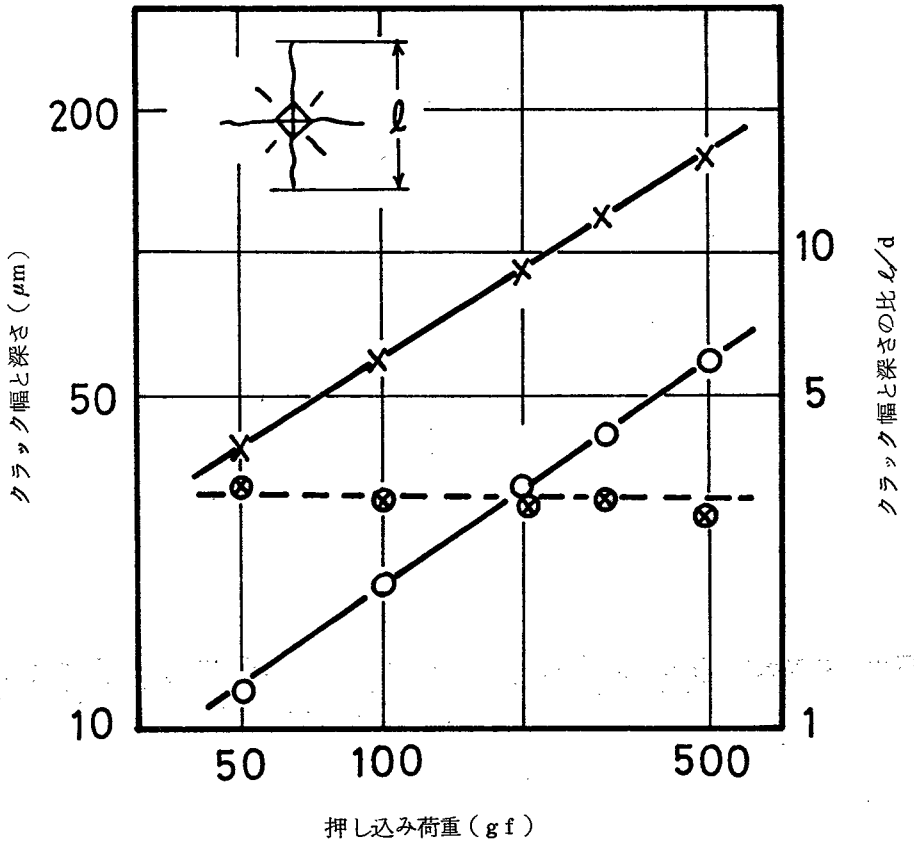


図3.14　単結晶フェライト{100}面への圧子押し込みによるクラック幅と深さ

4.2　研削とラッピングによる破壊層

(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きの結果から予測できるものがある。単粒引っかきで，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

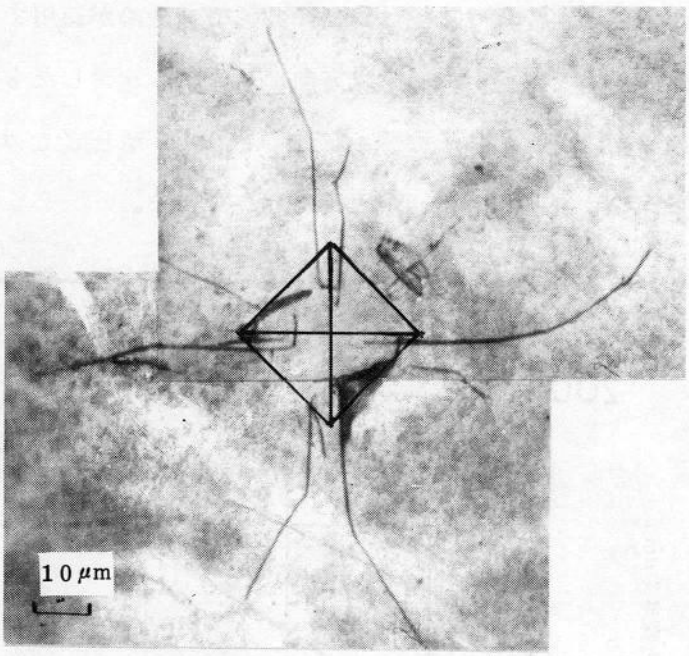


図3.15(a)　単結晶{100}面下の押し込みによるクラック
荷重　500gf
表面下　12μm

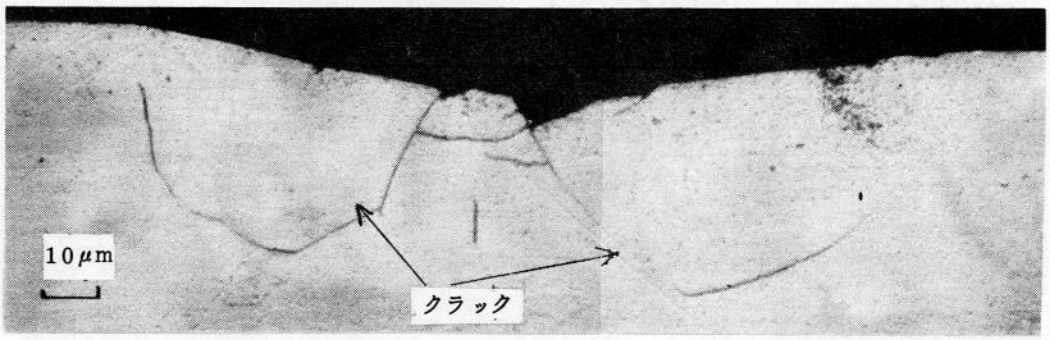
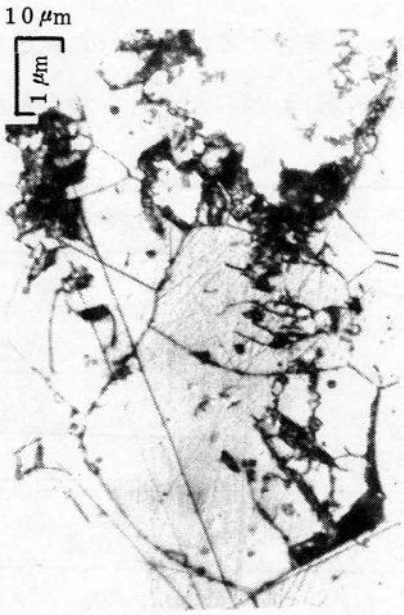


図3.15(b)　単結晶{100}面下のクラック
（荷重500gf）

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

と表示されている。ここに，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)　単結晶フェライト｛100｝面（研削方向〔100〕）



(b)　ホットプレスフェライト

図 3.16　研削面下部の破壊層

研削条件（砥　石：D320P50M
切込み：5μm
周　速：1400m／min
送り速度：0.6m／min）

Δ：設定切込み深さ（mm）である。本実験における一研削条件（セラミック研削における常用条件）によれば，$\Delta = 5\mu m$のとき$g = 0.02\mu m$となり，角錐引っかき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3.16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6～8μm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砥粒形状が引っかきに用いた角錐より，はるかに鈍く，みぞ底部の引張り破壊が大きいことが考えられる。①については使用した砥粒の平均突き出し高さが3μm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も確実である。角錐引っかきと対応づけるため，砥粒切れ刃間隔を実測する必要がある。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3.4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3μmであるから，3μmを越えるものはすべてこの値とする。このように考えて角錐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3.17に示す。全体には実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，角錐に比べ，小さな砥粒切込みでクラッカが発生する反面，引張り応力の集中がなく，切込みが増大しても深くまでクラックの伝ぱはおこらないとも考えられる。

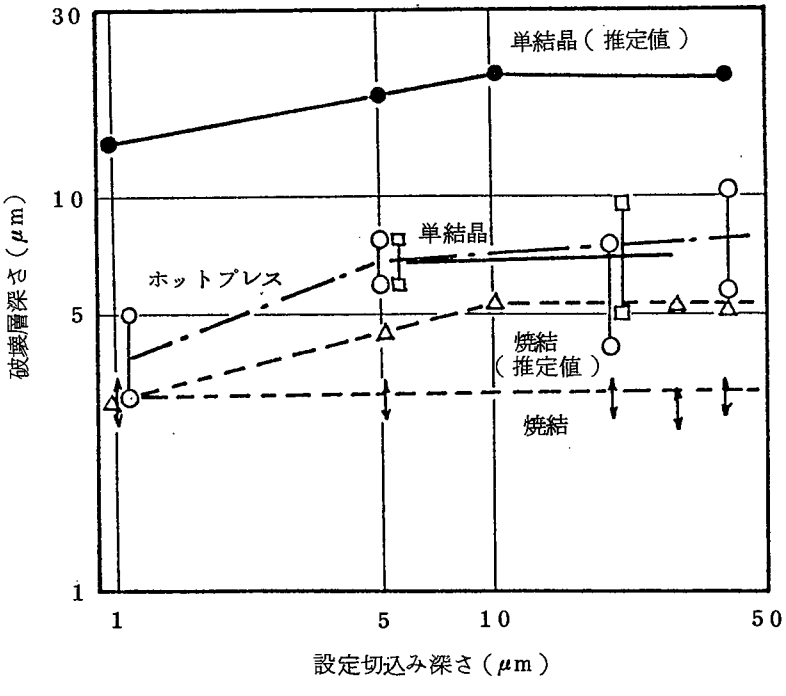


図3.17　研削切り込み深さに対する破壊層深さ

（砥石：D320P50M，砥石周速：1400m/min，送り：0.6m/min）

表3.4　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 Δ（μm）	1	5	10	20	30	40
砥粒切込み深さ g（μm）	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。

(2)　ラッピングによる破壊層

今中らの研究結果を参考[310]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，単一砥粒の負荷荷重を求めると表3.5のように整理される。この点から，#1000より小さい砥粒でラップした場合，破壊は起こらないはずである。ところが前節に示すラップ条件で加工した場合の焼結，ホットプレスの各フェライトを斜め研摩して破壊層を測定すると，図3.18に表わす破壊層が生じていた。この結果は圧子押し込みの場合よりずっと軽荷重から脆性的な破壊が起こっ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，高い引張り応力を残す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，微小押し込み荷重であっても接近させて圧こんをつければクラックが発生するものと考えて，このときのクラック深さを図3.14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したところ，5gf－2.6μm，10gf－4μm，50gf－12μmとなって実際のラップ面で得た測定値と大差のないことが明らかとなった。

表3.5　ラッピング砥粒径と実効負荷の関係

平均砥粒径（#No.）	4μm（#4000）	8μm（#2000）	16μm（#1000）	27μm（#600）	50μm（#320）
単一砥粒の負荷＊	2gf	4gf	13gf	25gf	70gf

＊　有効作用砥粒数をもとにした計算値[310]

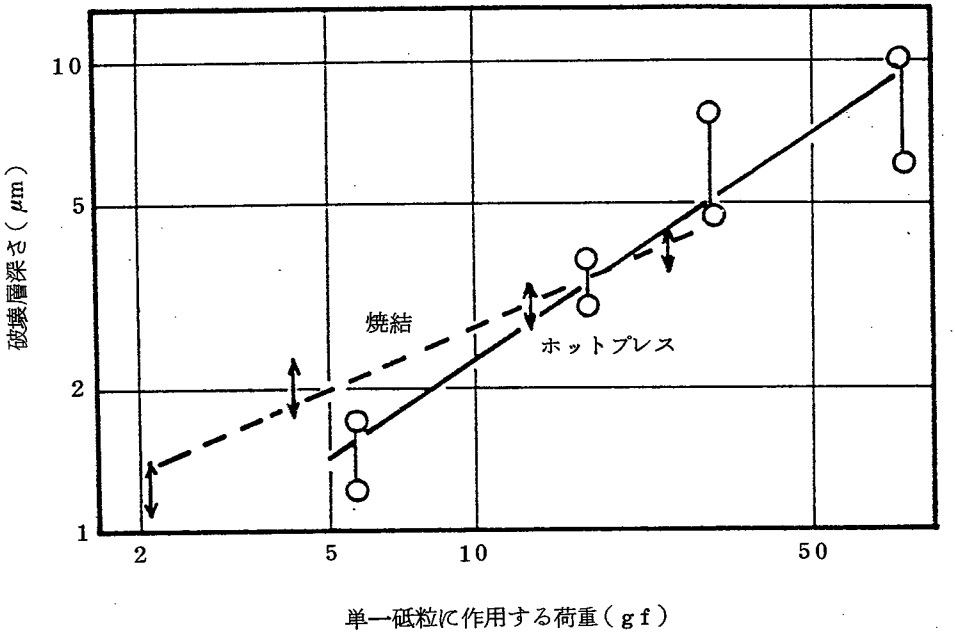


図3.18　ラップ砥粒に作用する荷重と破壊層深さ

4.3　微小砥粒ラッピング，ポリシングによる加工変質層

加工にあずかる全砥粒の作用を変えるため，鋳鉄，鉛，ピッチの各定盤を用いて実験し，各々の加工面に対して電顕観察と電子回折像から，加工変質層に与える砥粒作用の影響を考察した。

図3.19は鋳鉄，鉛，ピッチの砥粒作用状況のモデル図である。鋳鉄皿は硬く，砥粒は侵入し難い。加工中，砥粒は大部分転動し，砥粒径の不揃いによる影響が無視できない。すなわち，平均砥粒径より大きい砥粒のみが加工物を支え，実作用砥粒数が少なくなることから，単一砥粒の負荷は増大する。この結果，試料内への砥粒押し込みが深く，破砕を起こし，変質層が深くなる。一方，鉛皿では大きい砥粒は鉛内に侵入して固定され，試料面を微小切削する。しかし，中位の砥粒は転動もしくは滑り，不安定で完全に均一なポリシング面は得にくい。このため，ほとんどの砥粒が埋め込まれて，安定して微小切削を行うピッチ皿に比べると変質層は深く，局部的な条痕も多いと予想される。図3.20に各々の電顕観察と電子回折像の結果を比較して示す。鋳鉄皿によるラップ面では転動痕が多く，0.1μm程度エッチした面の電子回折像には，明瞭なテバイ環がみられ，各リングに対してⅠは（311），（222），Ⅱは（400），（331），Ⅲは（440）と指数付けができ，見かけ上多結晶化されており，ピッチの場合のほゞ独立した斑点が現れている状況と異なり，鉛の場合は，その中間で，斑点がリング状に配列して，微細化が進んでいない。

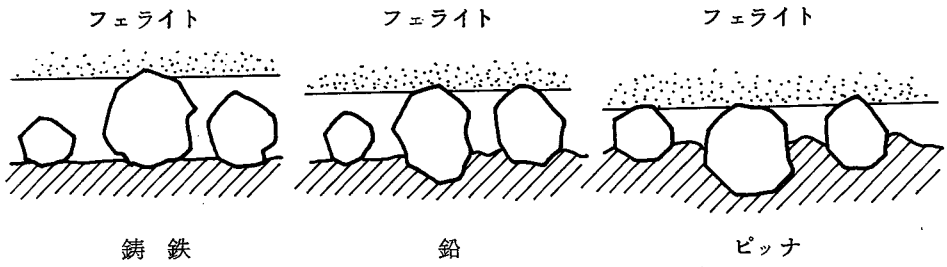


図 3.19　鋳鉄，鉛，ピッチラップによる砥粒作用状態のちがい

鉛皿による加工面の状態は鋳鉄皿の場合と異なり，微細な引っかき痕の交差した平滑面で砥粒の転動を裏付ける間欠的な引っかき痕はほとんどない。電子回折像では表面が無定形を示すハロー像で，当初予想した砥粒の転動は少なく，大部分は鉛皿に固定されていると考えられる。エッチング深さと回折像変化の関係から，引っかき痕の影響深さは 0.3 ～ 0.6 μm で，ピッチによるポリシ面と比べて，表面の無定形層及びその下に形成される有歪層が深く，加工に関与する砥粒の有効径が不揃いで，かつ大きい。

三種の硬さの異なる研摩皿を使った場合の加工面をエッチしていくと，いずれの場合も，エッチピットで覆われたとき，電子回折像の菊池線が表出する。したがってエッチ面の観察を通して変質層の深さが推測できる。

4.4　本節のまとめ

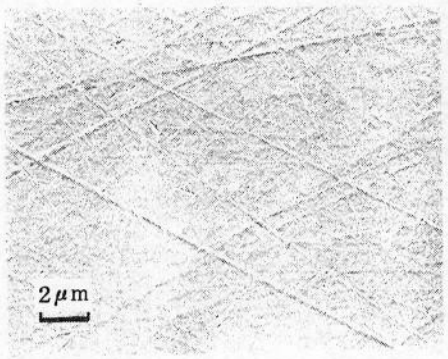
フェライト単・多結晶の研削・ラッピング・ポリシングにおける加工変質層の形態・深さを明らかにした。その前段として研削・ラッピングのモデルとしての単粒角錐による引っかき・押し込み痕下に発生するクラック形態を把握し，実際の加工との対応関係を考察した。おもな結果をまとめると以下のとおりである。

(1)　角錐の引っかきと押し込みによって発生するクラックの深さは各々の荷重に依存し，その関係はべき関数で表示される。

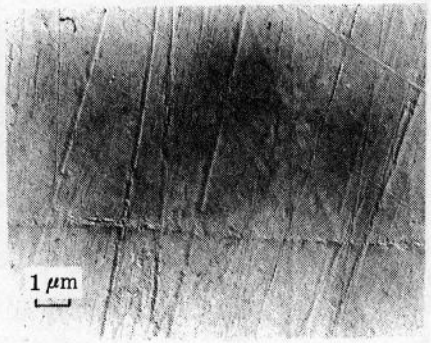
(2)　単結晶フェライトと焼結多結晶フェライトのクラック伝ぱの特性は著しく異なる。砥粒引っかき痕下のクラックは前者で深くかつ，クラック本数は少ないのに対して，後者で微細なクラックが多いがその侵入深さは小さい。

(3)　研削によって生ずる破壊層の深さは砥粒の実質的な切込み深さに依存するが，モデル砥粒の角錐の場合に比べて絶対値は小さい。

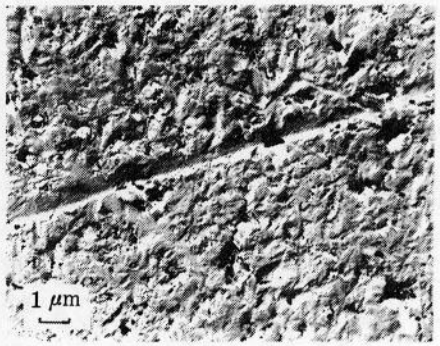
(4)　ラッピングでは 1 砥粒押し込み痕周辺には高い引張り残留応力が存在し，他の砥粒が



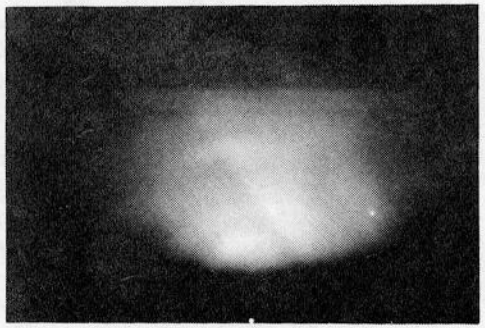
(a)　ピッチポリシング面



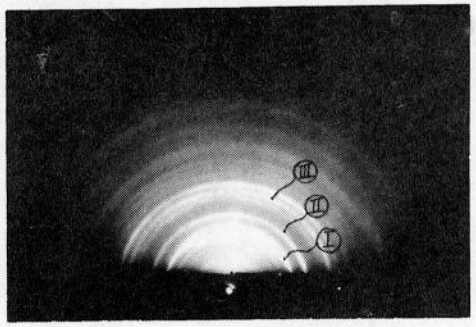
(b)　鉛皿によるラップ面
（砥粒WA#6000）



(c)　鋳鉄皿によるラップ面



(a)′　ピッチポリシング面
の電子回折像



(c)′　鋳鉄皿によるラップ面
の電子回折像

図3.20　各種加工法による加工面の比較

緊張部に押し込まれることによって大きなクラックに発展し，相互に連結し材料のクラックチップとして除去されていく。

(5) ラップ・ポリシ定盤硬さによる加工変質層深さの差は，砥粒径分布における粒径差が定盤内への押し込みによって緩和されるかどうかに依存する。すなわち鋳鉄のように硬い定盤では砥粒の押し込みが少なく粒径差が緩和されず，大粒径に負荷が集中して，加工変質層も深くなる。

5. 本章の総括

単結晶と多結晶，各種フェライトの材料の機械的性質と汎用加工法による加工特性を概観した。具体的にはダイヤモンド圧子の押しこみと引っかきによる微小変形特性と，研削・ラッピング・超仕上げ，およびピッチポリシング面の形態を考察した。その結果フェライト結晶の変形と加工の特徴が明らかになった。その内容をまとめると以下のとおりである。

(1) フェライト結晶は他の硬脆結晶と同様に極く微小な変形領域で脆性破壊のない塑性変形がおこる。

(2) 個々の砥粒の切込み深さが塑性域をこえるような研削，ラッピングでは脆性破壊による加工面となる。多結晶フェライトで粒界結合力の小さい材料では，粒子の脱落がおこる。

(3) (2)における研削，ラッピングでは加工面下部にクラックの伝ぱが認められる。単結晶フェライトではその深さに方位依存性が認められるが小さい。多結晶フェライトでは粒界でクラックの伝ぱが妨げられる。

(4) 汎用加工法ではピッチポリシングで最も表面あらさの小さい加工面を得るが，電子回折像で評価した場合にも，0.3 μm前後の加工変質層がある。

参　考　文　献

301）　渡辺純二，上野嘉之：通研実報22，6（1973）1683

302）　小宮　昇ほか：昭和38年精機学会秋季大会前刷（1963）5，7

303）　A. B. Groenou：IEEE Irans Magn，11，5（1975）1446

304）　A. B. Groenou：Philips Tech Rev，38，4／5（1978−1979）105

305）　松緑　剛ほか：昭和48年精機学会春季大会前刷（1973）269

306）　たとえば粉末治金技術協会編：粉末治金応用製品（Ⅱ），日刊工業新聞社（1964）130

307）　井田一郎，新井湧三：通研実報，13，8（1964）1205

308）　米津　栄，元谷和雄：昭和47年精機学会春季大会前刷（1972）387

309）　渡辺純二・上野嘉之：昭和45年精機学会秋季大会前刷（1970）217

310）　今中　治：電気試験所彙報25，4（1961）283

第4章　加工変質層による磁気特性の変化（Ⅰ）

― ラッピング・ポリシングによる磁気特性の変化 ―

1. 緒　　言

研削やラッピングのように，おもにフェライトの脆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[401]することを前章で示した。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も極めて薄くなる。しかし，フェライトの透磁率等磁気特性は構造敏感であるため，このような薄い加工層の影響を強く受ける[402), 403), 404)]。

フェライト結晶の加工変質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[405)]，エッチ速度変化の測定[406)]など結晶表層のじょう乱を直接評価する方法[407)]と，初透磁率[408)]，ヒステリシス特性（曲線）[409)]，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[410)]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変質層またはその影響を低減する加工法・条件の設定を行う。

本章ではおもにラッピング・ポリシングで生ずる加工変質層と磁気特性の関係を明らかにした。特に後者に対しては，フェライトコアの磁気回路に対して加工変質層が平行な表面下に生じているか，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変質層の等価的な磁気抵抗の測定法を考案して用いた。一方，平行な面内の加工変質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変質層が透磁率変化に与える影響を考察した[411)]。また，薄片のフェライトコアを用いて，加工変質層の磁気記録における再生特性への影響をモデル的な特性測定法によって評価した。

2. 磁気回路に垂直に挿入された加工変質層の影響

2.1　加工変質層厚さと透磁率変化の関係

加工変質層のうち結晶が微細化されていたり，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[412)]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[413)]により低下する。図4.1に示すモデル的な磁気

コアにおいて，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

$$R = \frac{\ell_1}{\mu_1 S} + \frac{\ell_2}{\mu_2 S} = \frac{\ell_1}{\mu_1 S}\left(1 + \frac{\mu_2}{\mu_1}\cdot\frac{\ell_2}{\ell_1}\right) \qquad (4.1)$$

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（4.1）の第2項で$\mu_1 = 3000$のフェライトを使ったとき磁路長10mmのコアに1μm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。

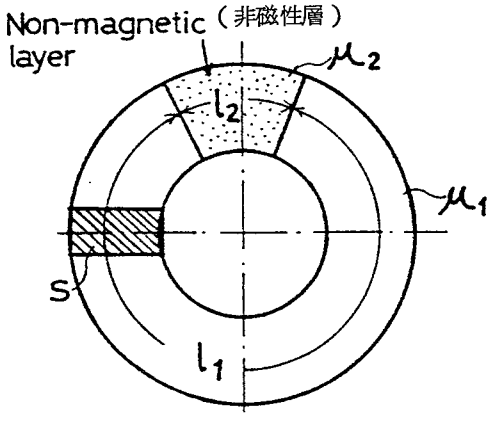


図4.1　磁路内に非磁性層のあるモデルコア

2.2　実験方法

図4.2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との差を加工変質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4.3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触針あらさ計のトランスデューサの出力により，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みとるものである。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4.1に示す。表面

あらさ，平面度とも余分なすきまを生じさせない精度である。

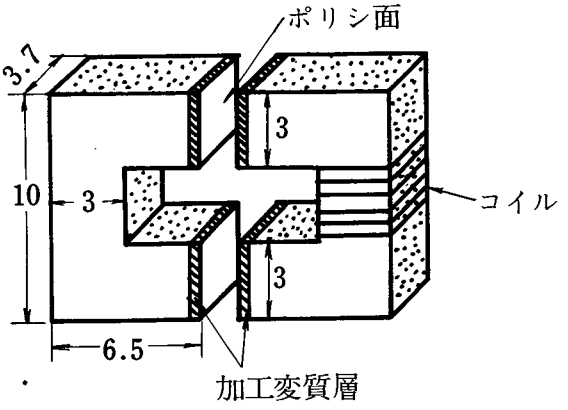


図 4.2　磁路内に加工変質層を形成してその影響を測定するコア

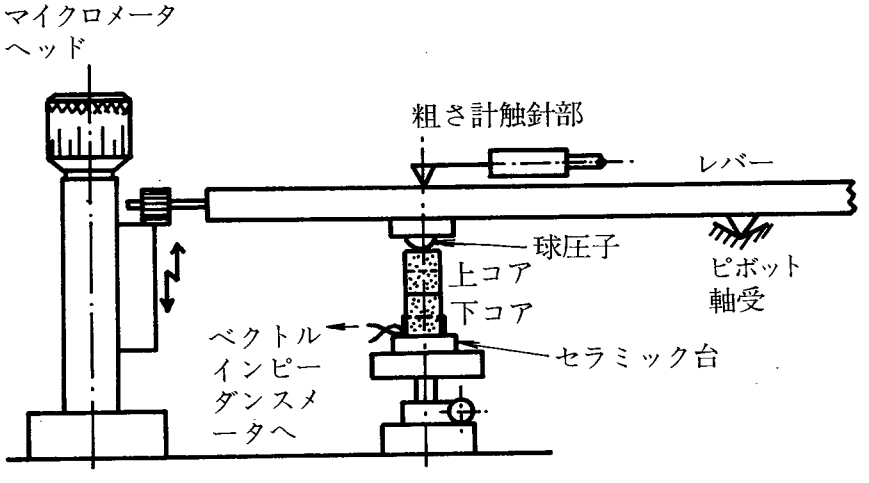


図 4.3　コの字コアの突き合わせ面間のすきまを設定するための装置

2.3　実験結果と考察

図 4.4 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えい磁束も少なく，抵抗Rとすきまgの関係は

$$R = R_0 + kg \qquad (4.2)$$

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 4.4 の抵抗直線の傾きから k = 0.22 となる。図 4.4 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，磁気的には加工変質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1kg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（4.2）からすきまに換算すると0.8μmとなる。コアの磁路内には4面の加工変質層が挿入されているので，1面あたり，0.2μm厚さの非磁性層と評価できる。

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変質層の構成は前章でも述べたごとく，500Å以下の微細結晶粒層，0.1～0.15μm のモザイク層，0.4μmのひずみ層となっている[414]。非磁性層としては，前二者の影響が大きいと考えられる。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。

表4.1　測定に使用した試料の特性

材料特性	Ni－Zn系高密度フェライト 微小硬さ　Hv：650 透磁率：1800（at 100kHz）
研摩条件	研摩皿：錫，砥粒：WA#6000 修正輪型研摩装置使用 研摩圧力：0.3kgf／cm²
研摩面精度	表面あらさ：Rmax　0.07μm＞ 平面度：0.2μm／3mm＞

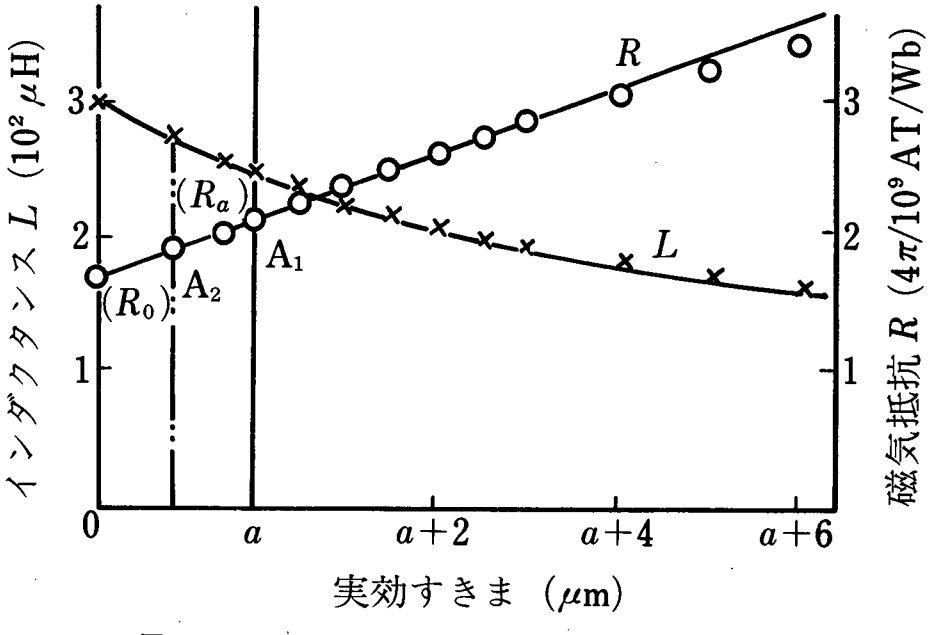


図4.4　磁路内に加工変質層を挿入したコアの磁気特性

図4.5は研摩後，接着した試料と非切断試料の直流ヒステリシスループの比較である。切断試料はつき合わせた状態でベクトルインピーダンスメータにて測定値を監視しながら，その値が変化しないことを確かめたもので，図4.4の設定空隙零のものに対応する。二つの曲線では立上りの差が大きく，残留磁束密度に25％の違いがでており，加工変質層の影響が明確である。

2.4　本節のまとめ

両端研摩した二つのコの字型コアを接合し，空隙量と磁気抵抗を同時に測定して，同形の非切断試料の磁気抵抗と比較することによって，加工によって生ずるフェライトの非磁性層を求めうることを明らかにした。測定結果によれば，電子回折像による結晶構造的に評価した0.6 μmの加工変質層は約0.2 μmの非磁性層厚さに相当することが明らかになった。

3.　磁気回路に平行な加工変質層の影響

リングコアの両面に加工変質層があると，その透磁率は5MHz以下の低周波側で1／2～1／5にも低下する。これらのコアの両面を1μm前後溶去して加工変質層を除くと元の値に回復する。前節の結果から結晶構造の乱れによる影響は1面につき0.2 μm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，加工変質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，加工変質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。

3.1　磁歪にもとづく透磁率変化の計算

磁歪と内部応力の相互作用により誘導される，いわゆる逆磁歪効果による誘導磁気異方性を考慮して透磁率の計算を行った。

透磁率は一般に，磁区回転と磁壁移動によって起ると考えられる[415]。磁壁移動による分の計算には，磁区構造，磁壁面積，磁壁移動方程式の各項の係数が含まれる。個々の要因を解析的に扱うのは難しいので，ここでは透磁率がすべて磁区回転によるものとして計算を行った。磁区回転の計算には実効的な磁気異方性[416]，（結晶磁気異方性＋誘導磁気異方性）の大きさから求めることになるが，この値は磁壁移動の場合にも大きく関係しており，

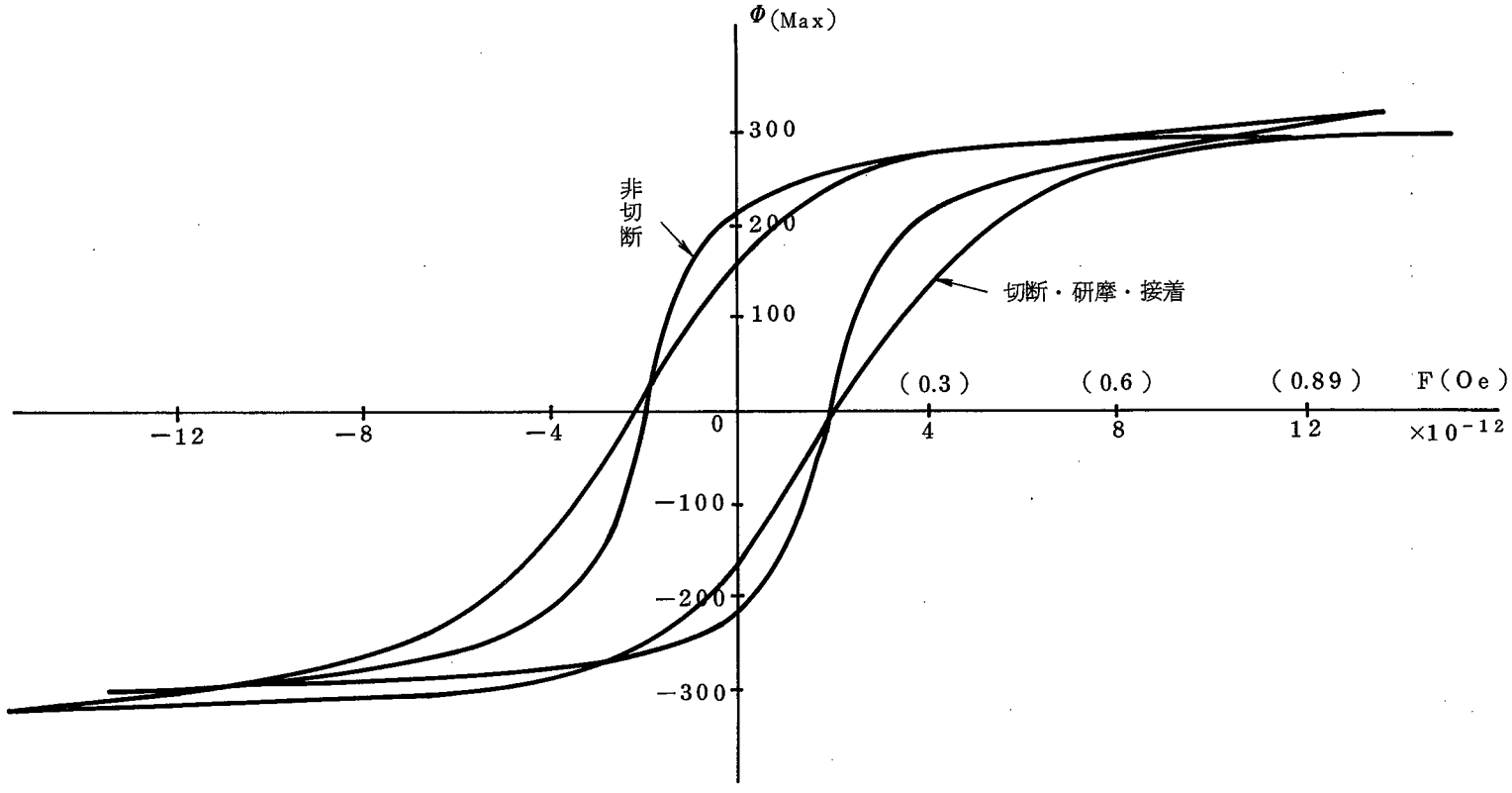


図 4.5　磁路内に加工変質層を挿入したことによるヒステリシスループの変化

また，透磁率に対する影響の方向も一致するはずである。したがって，磁壁移動の分を磁区回転の中に繰込むとして考えることも可能と思われる。

計算の方法は，結晶磁気異方性エネルギから，磁化容易方向を求め，次に容易方向を向いているスピンと外部磁界との相互作用から透磁率を計算する。

スピンの方向に関係したエネルギとして，結晶磁気異方性エネルギ（E_k）と磁気弾性エネルギ（E_λ）との和を考えればよい。

$$E_t = E_k + E_\lambda \tag{4.3}$$

E_k，E_λは各々次式によって表現される。

$$E_k = K_1 (\alpha_1^2 \alpha_2^2 + \alpha_2^2 \alpha_3^2 + \alpha_3^2 \alpha_1^2) + K_2 \alpha_1^2 \alpha_2^2 \alpha_3^2 + \cdots\cdots \tag{4.4}$$

$$E_\lambda = -\frac{3}{2} \lambda_{100} \sigma_1 (\alpha_1^2 \gamma_1^2 + \alpha_2^2 \gamma_2^2 + \alpha_3^2 \gamma_3^2 - \frac{1}{3})$$

$$- 3 \lambda_{111} \sigma_2 (\alpha_1 \alpha_2 \gamma_1 \gamma_2 + \alpha_2 \alpha_3 \gamma_2 \gamma_3$$

$$+ \alpha_3 \alpha_1 \gamma_3 \gamma_1) \tag{4.5}$$

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

λ_{100}，λ_{111}　：磁歪定数

σ_1，σ_2　：応力の大きさ

である。

今，図4.6に示すように（001）板を考え，X，Y方向をそれぞれ<100>，<010>方向にとる。今，$K_1 \gg K_2$であるからE_k項は第1項のみ考える。X，Y方向に等しい応力σが加わっているとする。これらを（4.3）に代入すると次式になる。

$$E_t = K_1 (\alpha_1^2 \alpha_2^2 + \alpha_2^2 \alpha_3^2 + \alpha_3^2 \alpha_1^2)$$

$$- \frac{3}{2} \lambda_{100} \sigma (\alpha_1^2 + \alpha_2^2 - \frac{2}{3}) \tag{4.6}$$

いま，$|\lambda_{100}\sigma| \gg |K_1|$ のときについて計算してみる。

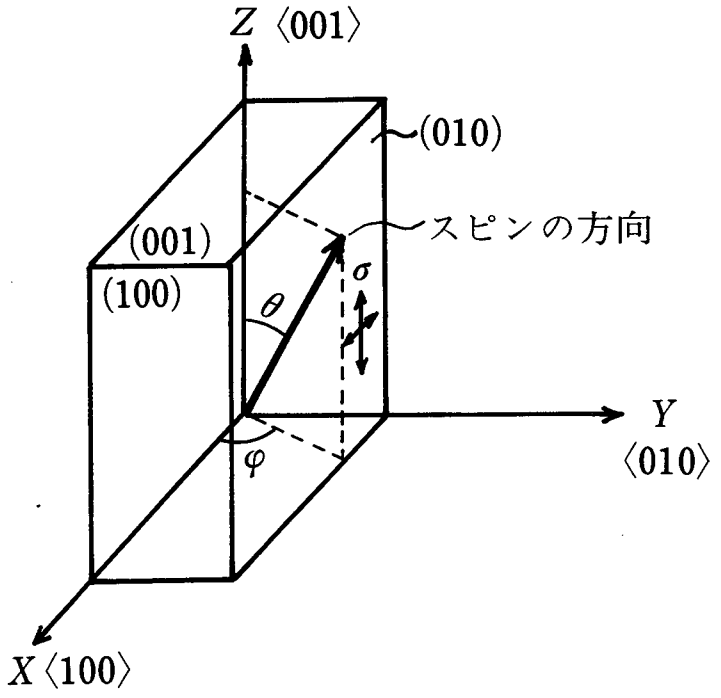


図 4.6　単結晶フェライト（001）板における応力とスピンの回転方向のモデル

第二項のみ考えて，図 4.6 のように θ，φ をとると

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

となるから，（4.6）式は

$$E_t = -\frac{3}{2}\lambda_{100}\sigma\left(\sin^2\theta - \frac{2}{3}\right) \qquad (4.7)$$

となる。

(i)　$\sigma < 0$，即ちX，Y方向に圧縮応力のとき

$$\sin^2\theta = 1 \text{ 即ち } \theta = \frac{\pi}{2} \text{ で } E_t \text{ が極小となる。}$$

すなわち，（001）面が磁化容易面である。

（001）面内での容易方向は（4.6）式の第一項によって決まる。実験に用いたMn−Zn単結晶の K_1 は室温において負であるから，$\alpha_3 = 0$ として計算すると，（001）面内の

<110>方向が容易方向になっていることがわかる。容易方向 θ_0 ， φ_0 に対する磁化スティフネスCは θ 方向に対して

$$C_1 = \left(\frac{\partial^2 E_t}{\partial \theta^2}\right)_{\theta_0, \varphi_0} \tag{4.8}$$

φ 方向では

$$C_2 = \left(\frac{\partial^2 E_t}{\partial \varphi^2}\right)_{\theta_0, \varphi_0} \tag{4.9}$$

で与えられる。

一方，透磁率とスティフネスとの関係は

$$\mu = \frac{M_s^2}{C} \tag{4.10}$$

で与えられる。ここで M_s は飽和磁化量である。

したがって，θ，φ 方向の透磁率を計算すると

$$\left(\frac{\partial^2 E_t}{\partial \theta^2}\right)_{\theta=\frac{\pi}{2},\ \varphi=\frac{\pi}{4}} = 3\lambda_{100} \cdot \sigma \tag{4.11}$$

だから

$$\mu_\theta = \frac{M_s^2}{3\lambda_{100} \cdot \sigma} \sin^2\beta \tag{4.12}$$

となる。一方，

$$\left(\frac{\partial^2 E_t}{\partial \varphi^2}\right)_{\theta=\frac{\pi}{2},\ \varphi=\frac{\pi}{4}} = 0 \tag{4.13}$$

となる。このとき（001）面内の透磁率は磁歪の影響を受けない。結晶磁気異方性のみを考慮して

$$\mu_\varphi = \frac{M_s^2}{-2K_1} \sin^2\beta \tag{4.14}$$

となる。ここにβは磁化容易方向と外部磁界のなす角を示す。

(ii) $\sigma > 0$，すなわちX，Y方向に引張り応力のとき，

（4.7）式は$\sin^2\theta = 0$，すなわち$\theta = 0$のとき極小となり，<001>方向が磁化容易方向となる。

同様にして計算すると

$$\mu_\theta = 1 \tag{4.15}$$

$$\mu_\varphi = \frac{M_s^2}{-3\lambda_{100}\sigma} \tag{4.16}$$

となる。（4.15）は<001>方向の透磁率であり，この方向は磁化容易方向と一致するので1となる。（4.16）は<001>に直角方向の透磁率を示している。

$|K_1| \gg |\lambda_{100}\cdot\sigma|$のときは（4.6）式の第一項のみを考慮して簡単に求まる。

$$\mu = -\frac{3M_s^2}{4K_1}\sin^2\beta \tag{4.17}$$

$|\lambda_{100}\cdot\sigma|$と$|K_1|$がほぼ等しいときは，（4.6）式から計算できるわけであり，両者の相対的な大きさから容易磁化方向と透磁率が求まる。厳密な解析は困難なので，今まで行ってきた計算式を用いて（（4.12）～（4.17））近似した。例えば（4.16）（4.17）式から

$$\mu = \frac{M_s^2}{-\frac{4}{3}K_1 - 3\lambda_{100}\sigma}\sin^2\beta \tag{4.18}$$

と近似できる。K_1値についてはこの場合は概算から求めた。（4.18）式より，材料の磁歪定数λ_{100}と残留応力σを測定すれば，応力場における透磁率が算出できる。

3.2 残留応力の測定

(1) 結晶材料の薄片の一面を加工したとき，加工条件に応じた歪層が形成される。このため，材料の機械的性質，形状，歪の大きさ，層の深さによって異なった変形が生ずることはトワイマン効果[417]として知られる。薄板の残留応力の測定は歪層を少しずつ除去していったとき，応力が解放されて板の変形が緩和され，これら諸量の間に弾性力学によ

る関係式が成り立つことを使って行なわれる[418]。すなわち除去した歪層の厚さとそのときの板の変形量を測定することにより，次式から除去した層が板全体に及ぼしていた応力が算出できる。

$$\sigma_x = \sigma_y = \frac{E(h-a)^2}{6(1-\nu)} \cdot \frac{d(1/\rho_x)}{da} - \frac{2E(h-a)}{3(1-b)} \frac{1}{\rho_x}$$

$$+ \frac{E}{3(1-\nu)} \int_0^a \frac{1}{\rho_x} da \qquad (4.19)$$

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_x：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って，もとの試片の残留応力の分布が計算できる[419]。

また，これを使って加工歪層のみの応力を分離する方法により，板厚の異なる試験片に対しても適用した。

まずMn－Znフェライト単結晶を15×15×1mm^{3}の形状に方位を決めて切り出し*，片面をメカニカル・ケミカルポリシングで無歪加工し[420]，これをN面（Non distorted surface）として，他の一面を表4.2の条件で加工してD面とし，試験片とした。次にN面を充分な接着剤でスライドガラスに固定し，同じ接着剤でD面上に約0.5mmφの点状被覆をして，塩酸（重量濃度15～25％）でD面を腐蝕した（図4.7）。腐蝕層の厚さは被覆した接着剤を除去した後，顕微干渉計により測定した。腐蝕ごとの試験片のたわみの変化は図4.8のように触針式あらさ計によるうねり曲線より求めた。

(2)　測定結果

図4.9にGC#4000砥粒でラップした試験片の腐蝕深さとたわみの関係を示す。3片とも表面から1.7μm腐蝕したところでたわみは定常状態になり，平面度のちがいによる形状誤差のみが残っている。表4.2の加工条件では歪層が約1.7μm生ずることになる。

＊　X線ラウエ法を使用，　ターゲット：タングステン，電圧：35kV，
電流：15mA，方位精度1度以内

表 4.2　試験片の加工条件

加工機	修正輪型ラップ盤	
ラップ皿	鋳　鉄	鉛
	外径　φ180 内径　φ　30 試料貼付皿径 φ60	
砥粒濃度 （wt%）	GC#4000 20	アルミナ1μm 15
圧　　力	0.3 kgf／cm^2	
ラップ 回転数	36 rpm	
加工液	水	

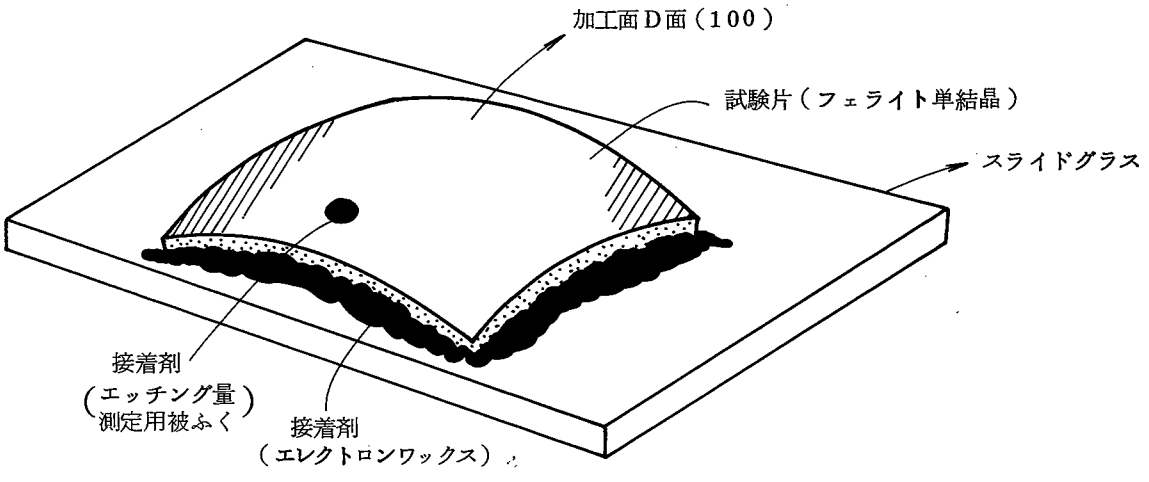


図 4.7　加工面の薄層除去用試料

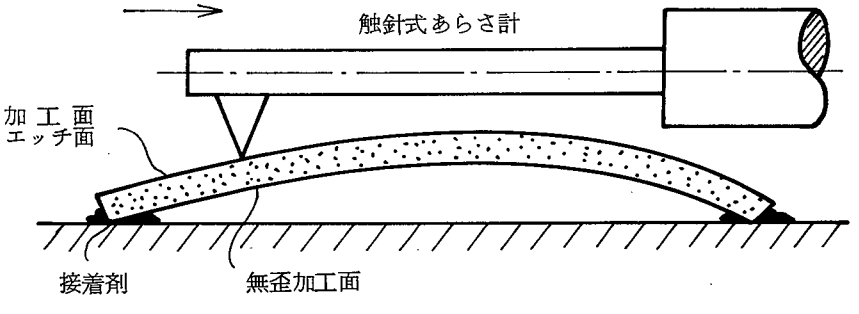


図 4.8　試験片のたわみ変化測定法

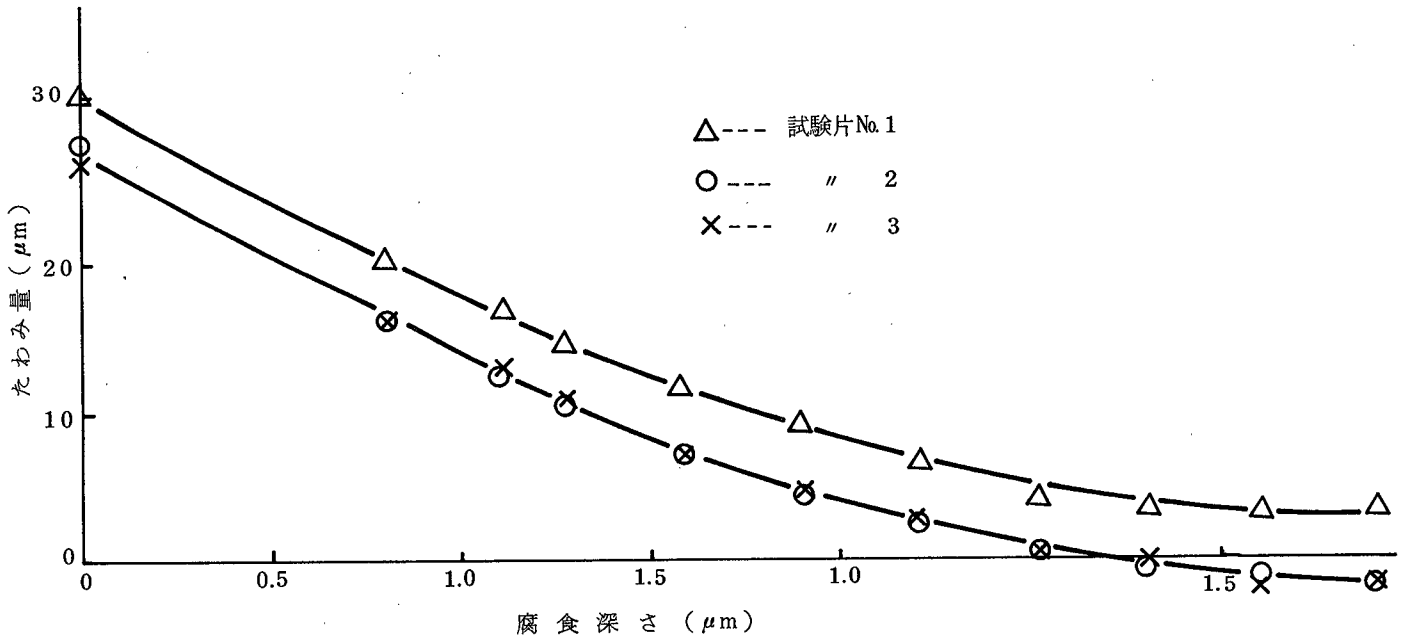


図 4.9　ラップ面の腐食深さとたわみ量の関係
（GC＃4000砥粒，鋳鉄ラップ）

同じく，図4.10にアルミナ1μm砥粒と鉛ラップでラップしたときの結果を示す。このときの歪層は約0.4μmである。

これらのグラフ上の点をスムーズな曲線で結び，これをデータとして前掲の式から応力分布を算出する。歪層のみの応力を求めた結果を図4.11と図4.12に示す。これらの引張り歪をもった層が無歪層の両面に貼り合わされて，3層体が釣合ったときの試験片全体の内部応力を計算した結果を図4.13に示す。ここでは無歪層が全厚みにわたって均一な歪をうけるという仮定によっているが，厚みが増したときには，内部に向うほど歪は漸減するはずである[421)]。

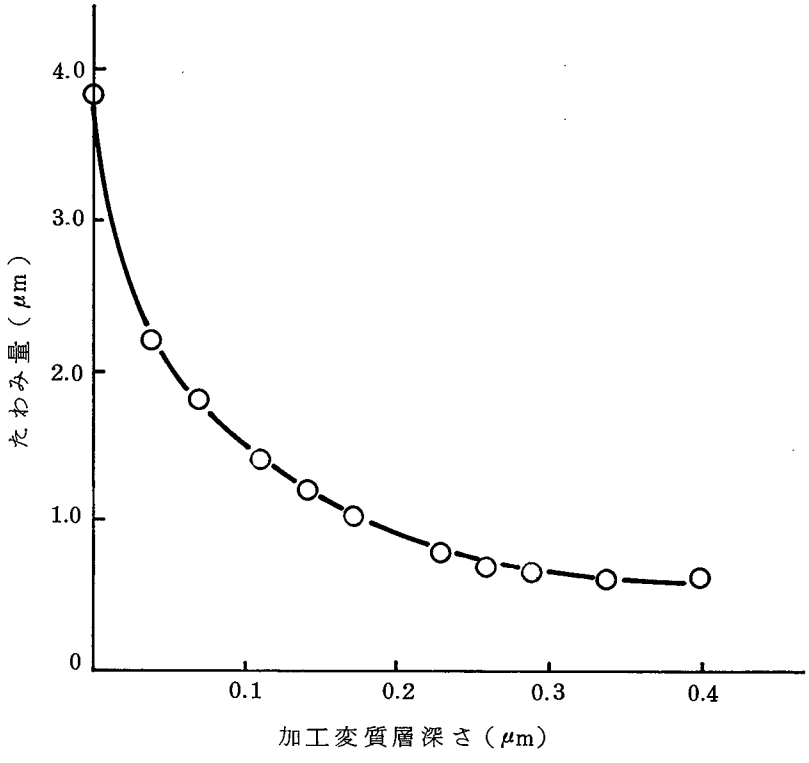


図4.10　ラップ面の腐食深さとたわみ量の関係
（アルミナ1μm砥粒，鉛ラップ）

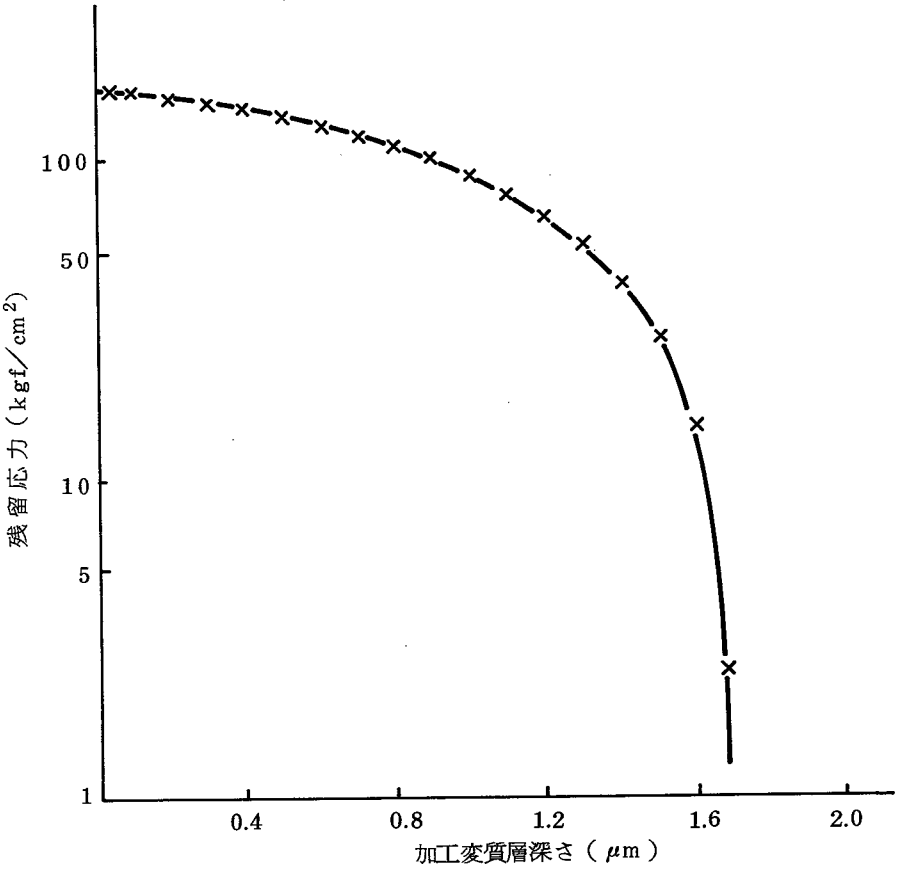


図 4.11　加工変質層における応力分布
（GC# 4000砥粒，鋳鉄ラップによる加工）

3.3　磁歪定数の測定

加工による残留応力と透磁率変化の関係を示す式（4.18）において，次に磁歪定数 λ_{100} を決めることにより，計算が可能になる。単結晶フェライトの（001）面板を5×6×1.5mm³に切り出し，両面をメカニカル・ケミカルポリシングして無歪面とし，磁歪定数の測定試料とした。磁界中の歪は試料片に貼りつけたストレンゲージにより測定した[422]。ストレンゲージの抵抗値は温度および外部磁界により影響を受ける。この場合の測定は室温のみなので，短時間の（1～2分）の測定内では温度による影響は無視できる。外部磁界の影響をさけるために，図4.14に示すようにブリッジを組み，4個の腕の中でABにサンプル，BCには同一のストレンゲージをアルミナ板の上に貼り付けたものを用意し，

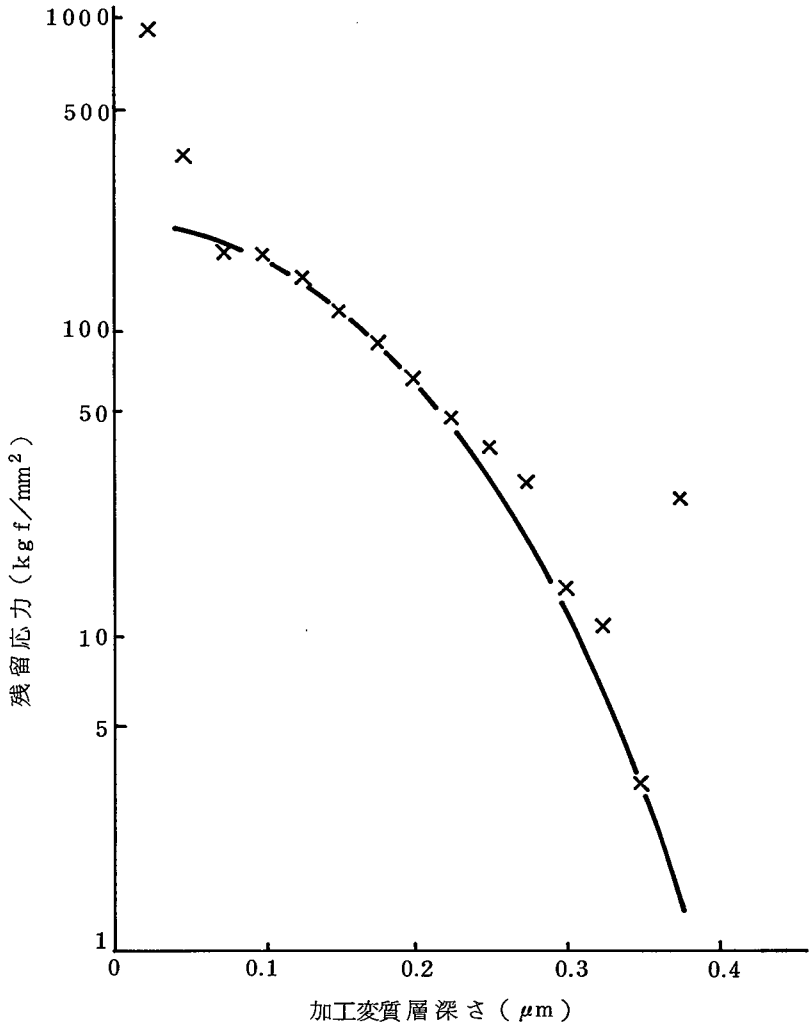


図 4.12　加工変質層における応力分布
（アルミナ 1 μm 砥粒，鉛ラップによる加工）

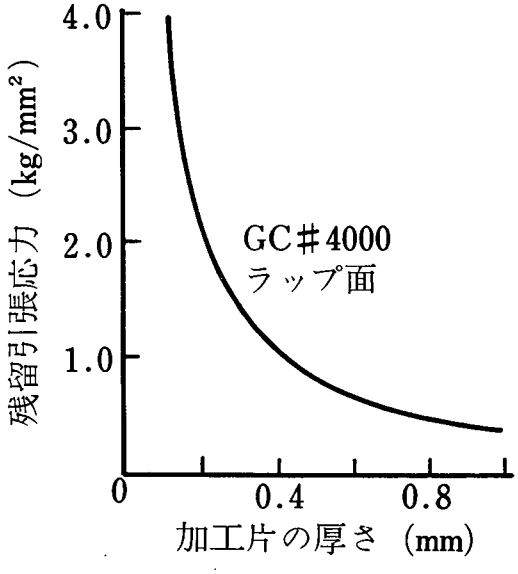


図 4.13　試験片の厚さ方向残留引張り応力の分布

ゲージ方向をサンプルと同一方向に並べた。ストレンゲージには半導体歪ゲージKSP−2−E3（ゲージ長2mm，抵抗値約120Ω）を使用した。外部磁界は5×10^3，9×10^3 gauss で測定した。結果を図4.15に示す。5×10^3 gauss でも十分飽和していることがわかる。絶対値を正確に求めるために，磁歪定数の分っている金属Ni との比較から求めた。

<100>方向の定数 λ_{100} ： -14.9×10^{-6}

<111>方向の定数 λ_{100} ： $+13.9\times10^{-6}$

が結果であり，Ohta らの測定結果[423]に近い。

3.4 応力と透磁率変化の関係

(1) 表面をラップした額縁コアの透磁率

隣辺の方向が<100><010>である額縁状の試料を用意し（図4.16），表4.2に示す加工条件により加工した試料の透磁率を測定した。試料寸法は，外側がそれぞれ6mm×5mm，内側がそれぞれ4mm×3mmであり，厚さは1mmから0.1mm まで変化させた。透磁率は0.12mm径の線を20回巻き，インダクタンスを測定して算出した。このとき磁束の漏れのないことを透磁率と巻数との関係から確認した。測定周波数は10kHz～15MHz であり，10kHz～200kHz間はマックスウェルブリッジ，200kHz以上はベクトルインピーダンスメータで測定した。透磁率の算出式は次のとおりである。

$$\mu' = \frac{\ell}{4\pi S}\cdot\frac{L}{N^2}\times10^9 \qquad (4.20)$$

$$\mu'' = \frac{\ell}{4\pi S}\cdot\frac{R}{\omega N^2}\times10^9 \qquad (4.21)$$

ここで，　ℓ：コアの磁路長（cm）　　L：インダクタンス（H）

S：額縁コア断面積（cm^2）　　R：レジスタンス（Ω）

N：巻数　　ω：角周波数（rad）

である。10kHz での測定結果を残留応力と共に表4.3に示した。

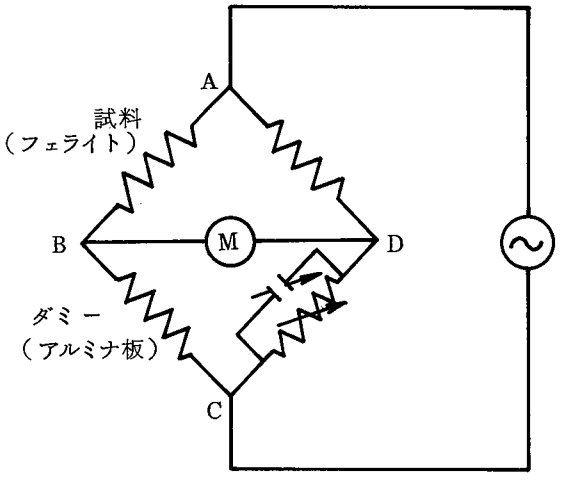


図 4.14　磁歪定数測定におけるストレンゲージブリッジ回路

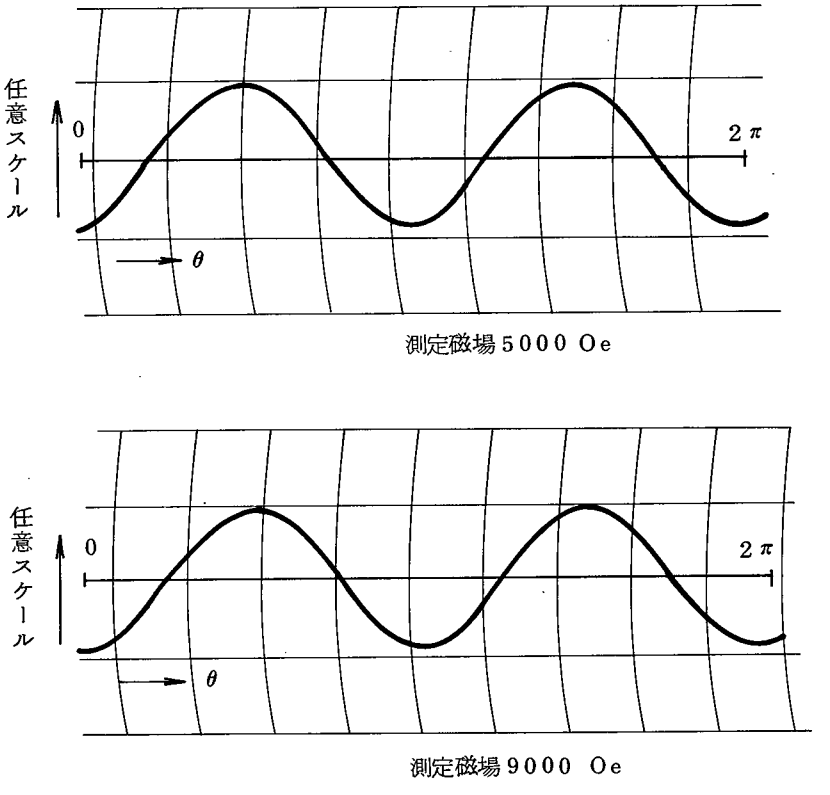


図 4.15　回転磁場内のフェライトのひずみ

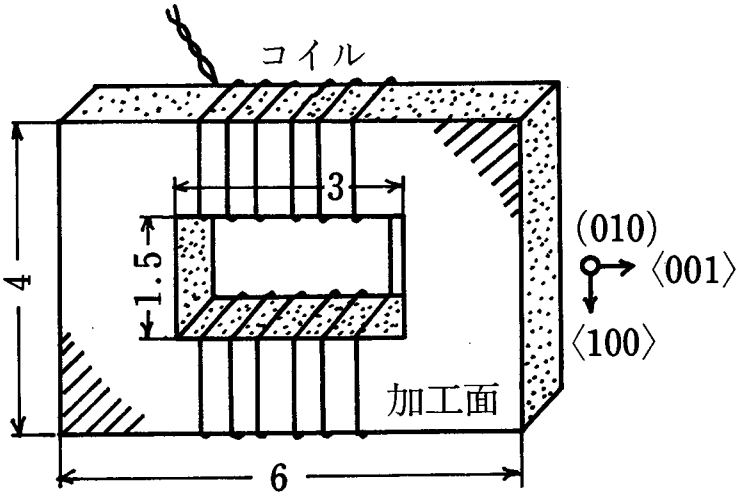


図 4.16　額縁試験片によるインダクタンス測定

表 4.3　加工条件・板厚のちがいと透磁率の変化

加工条件板厚	透　磁　率 （10kHz）	残留応力値 （kgf/mm²）
GC#4000 0.95mm	450	0.43
0.85	400	0.48
0.70	360	0.57
0.61	320	0.62
アルミナ 1μm 0.50	810	0.19
エッチング処理	3850	(0.)

(2)　単純引張り応力が試験片の厚み方向に均一に分布する状態で，透磁率の変化は(4.18)式の計算に従う。理論と実験値が一致しないとき，その原因となる要因（おもに応力の分布に関して）を分離するため，額縁コアの二辺に単純引張り応力を加え，均一な応力分布状態における透磁率の変化も実測した。(1)の試験片と同一の試料を使用し，図 4.17 に示す状態で負荷荷重を変えながら，そのときのインダクタンスを測定し，透磁率に換算した。荷重を加えた直後では，機械的な振動およびディスアコモデーション[415]のため，不安定なので，負荷して 3 ～ 5 分後に測定した。

額縁の上下に対向する二辺は側板で固定されているので，負荷に影響をうけず，他の

二辺のみが応力によって変化することになる。コア全体の測定値から，応力によって変化した量は次の計算によって求められる。コアの磁気回路を透磁率がμ_aとμ_0の材料M_a（応力で変化する部分），M_0（初期の透磁率をもつ部分）が直列に結合されたものとすると，測定値μとの間に，

$$\frac{\ell}{\mu S} = \frac{\ell_1}{\mu_a S} + \frac{\ell_2}{\mu_0 S} = \frac{1}{S}\left(\frac{\ell_1}{\mu_a} + \frac{\ell_2}{\mu_0}\right) \qquad (4.22)$$

の関係がある。ここに

ℓ：コアの全磁路長　$\ell_1 + \ell_2$

ℓ_1：応力をうける部分の長さ

ℓ_2：応力をうけない部分の長さ

μ_a：応力によって変化した透磁率

μ_0：材料のもとの透磁率

S：試験片断面積

である。各荷重に対するμを測定してμ_aが算出できる。測定の結果を表4.4に示す。

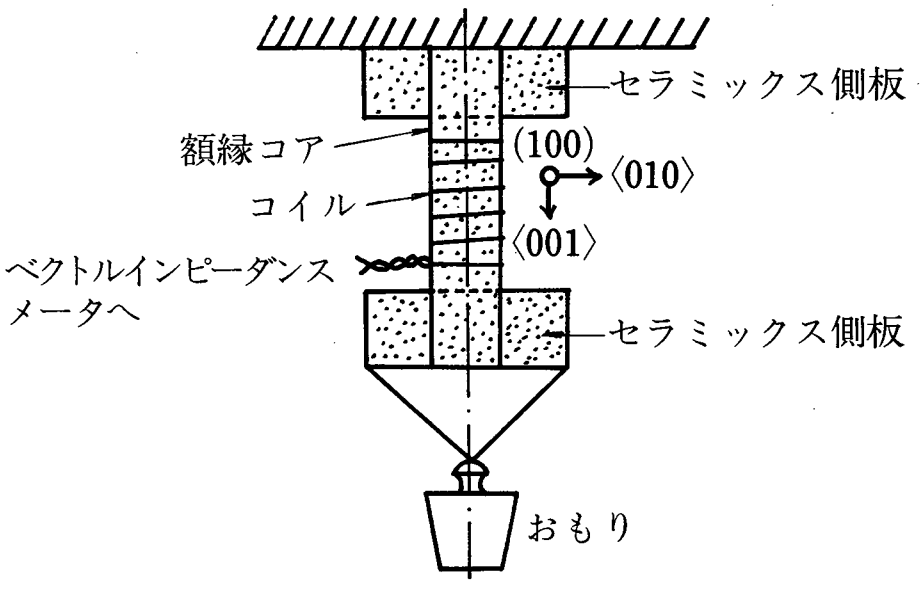


図4.17　額縁コアへの単純引張り力負荷法と
インダクタンス

表 4.4　単純引張り応力による透磁率*の減少

引張り応力 (kgf/mm²)	0.01	0.02	0.12	0.3	0.6
透　磁　率	3100	2050	1150	600	350

＊　測定周波数　10kHz

3.5　結果と考察

3.4の結果を図4.18に示す。加工変質層による実測値と単純引張り応力が作用したときの実測値は一致している。計算値と実験値は応力の増加に伴なう透磁率低下の傾向が類似し，計算値に一定値を係数として付加すると両者はほぼ一致する。この係数の意味するところは，(1)応力場の透磁率計算における仮定および近似，(2)磁歪定数の測定，(3)残留応力の測定における誤差等により派生するものである。(1)については，透磁率に寄与するフェライトの磁化過程は磁壁移動と磁区回転によって起こるが，ここでは後者のみを計算の基礎としているし，加工変質層の残留応力分布が，磁壁移動のポテンシャル分布に影響を及ぼせば，透磁率も変化することによる。(2)，(3)については，フェライト単結晶の磁気特性のバラツキによるところが大きい。

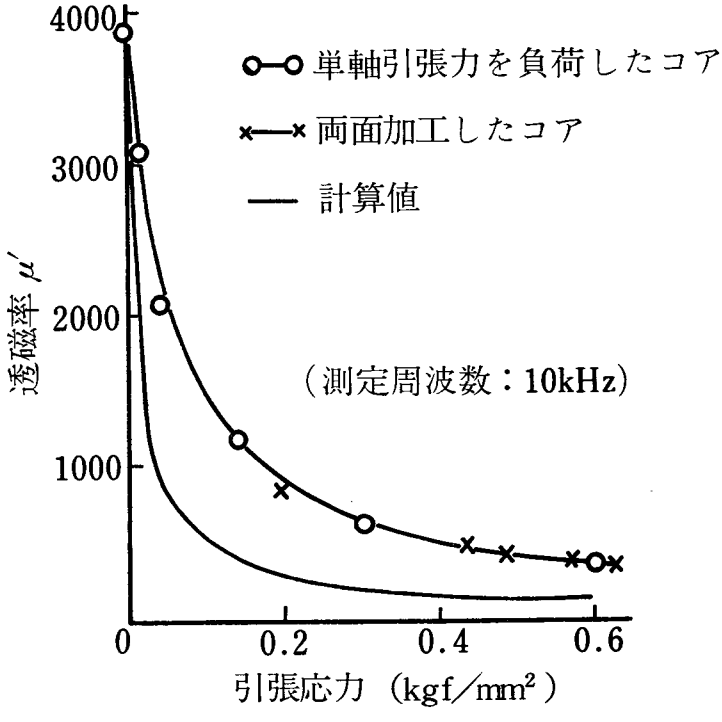


図 4.18　単結晶フェライトコアにおける引張り残留応力と透磁率変化の関係（計算値と実測値）

3.6　本節のまとめ

薄板をラップして作製した磁気ヘッド用コアでは材料の透磁率が変化する。これは表面の加工変質層のため内部に生じた残留応力とフェライトの磁歪効果に基づくと仮定し，解析と実験により証明した。加工変質層が0.4 μm程度の薄層であったとしても，約400 μmの厚さのコアに生ずる残留引張り応力は0.2 kgf/mm² に達し，その結果として，透磁率はもとの材料の1／3以下に低下することになる。したがって，100 μm以下のコア厚さにおいては，0.01 μm前後の加工変質層のほとんどない加工を適用しなければ，透磁率の低下を防ぐことができない。

本節ではMn－Zn単結晶フェライトの（001）板において，<100><010>方向を隣辺とする額縁コアで応力下における透磁率の算出式を導いた。応力が圧縮の場合（001）面内透磁率は磁歪の影響を受けず，結晶磁気異方性から，

$$\mu_{\varphi} = -\frac{M_s^2}{2K_1} \sin^2 \beta$$

となり，引張り応力のときは

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

と近似でき，材料の磁歪定数 λ_{100} と残留応力 σ の影響をうけることを明らかにした。また，磁歪定数，残留応力の測定法も示した。

4.　薄片コアの磁気特性と再生特性

前節では0.5 mm前後のコアにおける加工変質層による透磁率の変化を理論解析と実験により示した。一方，厚さ50 μm以下の薄片コアについてはラッピング，ポリシング中に生じる欠けやきずのため破損しやすく，薄片加工が困難であること，巻線法による透磁率測定においては，コア強度が低いため，コイル巻線時に破壊しやすいこと等の加工，測定技術の問題があり，薄片コアの磁気特性に関してはほとんど測定されていない。また，このようなフェライトにおける加工歪による透磁率の低下が，磁気的な信号の再生効率にどのような影響を与えるかに関して，定量的な報告例がない。しかし現実の磁気記録・再生には50 μm以下の薄片コアが使われる場合も多い。

ここでは，ダイヤモンド砥粒でポリシングした50μm以下のコアに対して，巻線用の専用ジグを試作して磁気特性，再生特性を求め，両者への加工変質層の影響を明らかにした[424)]。

磁気特性は両面をポリシングしたトロイダルコアのエッチング前後の透磁率変化で，再生特性はOne－turn法によりエッチング前後の再生効率変化から評価した。さらに，コアの再生時における等価回路を表現する式を用いて，透磁率変化が再生効率に及ぼす影響を定量化した。

4.1 透磁率と再生効率の関係

透磁率μと再生効率$|\eta|$の関係はコアの再生時における等価回路を図4.19のように考え，記録媒体に定磁束源として，コアに入る全磁束量をϕ_0，コイルに鎖交する磁束量をϕ_cとすると，次式で表わせる。

$$|\eta| = \frac{\phi_c}{\phi_0} = \frac{\sqrt{\{R^2(\mu'^2+\mu''^2)+RR'_c\mu'\}^2+(RR'_c\mu'')^2}}{(R\mu'+R')^2+R^2\mu''^2} \quad (4.23)$$

ここで

$$R'_c = \mu^* R_c$$

$$R = \left(\frac{1}{R_g}+\frac{1}{R_{\ell_1}}+\frac{1}{R_{\ell_2}}\right)^{-1}$$

$$\mu^* = \mu' - j\mu''$$

であり，　R_c：コアの磁気抵抗，R_g：ギャップ部磁気抵抗

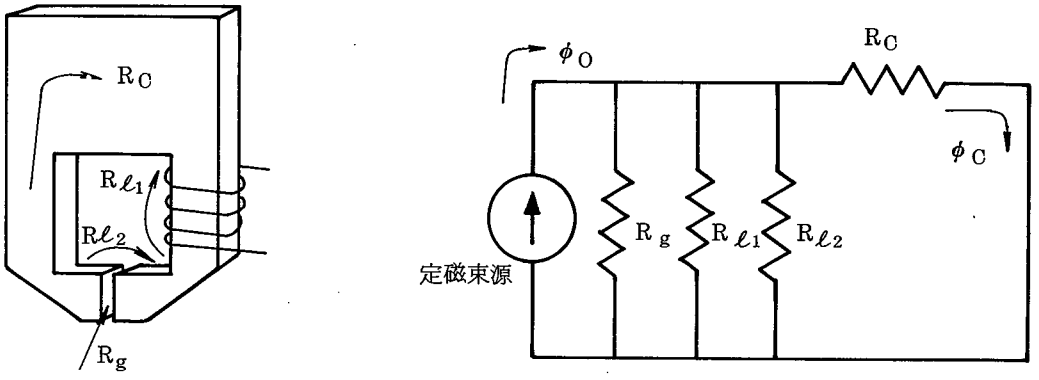
$R_{\ell 1,2}$：漏洩磁気抵抗

である。(4.23)式より，透磁率が加工変質層の影響を受け，変化するとき，これをトロイダルコアであらかじめ測定しておけば，そのときの再生効率の変化が計算で求められる。

4.2 薄片コアの透磁率測定

(1) 実験方法

実験に用いた試験片トロイダルコアの材料，形状，寸法，加工条件を表4.5に示す。巻線工程における薄片コアの破壊防止のため，図4.20に示すジグを作製し，ジグの溝をガイドにして巻線した。



a ） 磁気抵抗　　b ） 再生時等価回路

図 4.19　コアの磁気抵抗と再生時等価回路

表 4.5　試験片形状と加工条件

材　料		Mn－Zn，Ni－Zn
形　状		リング状　外径 6 mm，内径 4 mm
厚　さ		400，300，200，160， 50，25 μm
加工条件	加工機	修正輪式ラップ盤
	回転数	35～60 rpm
	加工圧力	0.14～0.95 kgf／cm^2
	ラップ定盤 砥粒	鋳鉄，鉛 GC#2000，4000，WA#6000
	ポリシヤ 砥粒	錫，ピッチ ダイヤモンド 1 μm，アルミナ 1 μm

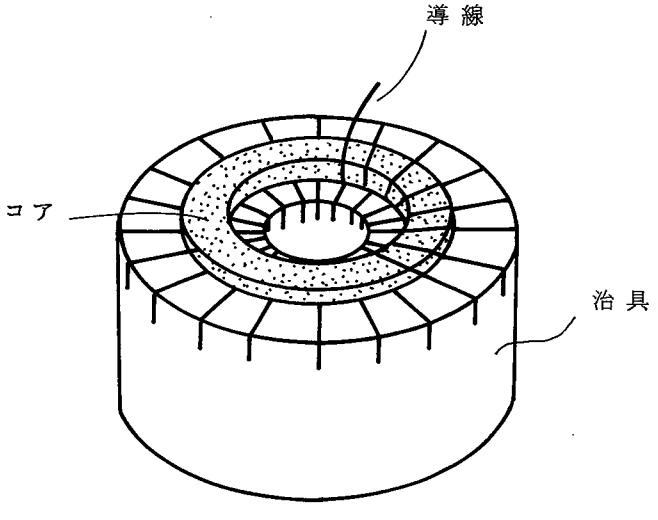


図 4.20　巻線方法

導線径はϕ80μmとϕ40μmのポリウレタン被覆線である。巻数は20回である。このジグの使用により巻線中の破損は無く，巻線ピッチが等間隔に巻ける利点があり，インダクタンスの測定誤差が少なくなる。

ポリシングしたトロイダルコアの加工変質層を定量的に除去して透磁率の変化と対応させた。エッチング溶液はMn－Znフェライト用には蓚酸（$C_2H_2O_4 \cdot 2H_2O$），Ni－Znフェライト用に弗酸（HF）を使った　。

透磁率はベクトルインピーダンスメータを用いて，周波数範囲0.1MHz～20MHzにおけるインダクタンスとレジスタンスを測定し，次式より算出した。

$$\mu' = \frac{\ell}{4\pi S}\frac{L}{N^2} \times 10^9 \qquad (4.24)$$

$$\mu'' = \frac{\ell}{4\pi S}\frac{R}{\omega N^2} \times 10^9 \qquad (4.25)$$

ここで，　ℓ：コアの平均磁路長，S：コア断面積，N：巻数，

ω：$2\pi f$，　f：周波数，　L：インダクタンス，　R：レジスタンス

である。

(2)　結果と考察

加工変質層による透磁率変化の結果を図4.21～図4.24に示す。この結果により，加工したコアの厚さによる透磁率の低下率を図4.25に，透磁率回復までの加工変質層の除去量を図4.26に示す。また透磁率回復過程において，加工した状態より0.1μm～0.2μm除去したときの回復は図4.27のようで，160～400μmのコアにおいては，70～90%，25μm，50μm厚さのコアでは40～75%である。これらの結果を要約すると次のようになる。

(i)　透磁率変化の周波数特性は厚形コアの場合と同様で，加工歪によって低周波数側で低くなり，高周波数側でわずかに高いか，ほとんど変化しない。

(ii)　ダイヤモンド砥粒1μmとスズ皿を使ったポリシングコアにおいて，透磁率が素材特性値まで回復するための加工変質層の除去量はコア厚さにかかわらずほぼ0.6μmである。

(iii)　加工した状態での透磁率の低下の割合が薄片化するほど大きくなる。

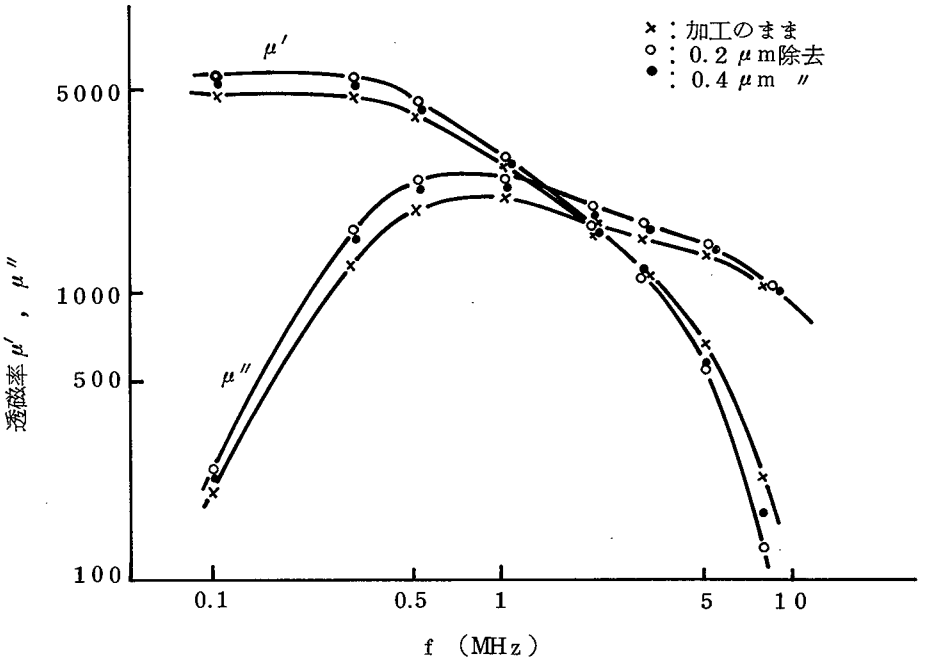


図 4.21　焼結フェライト（Mn−Zn）400μmコアの透磁率変化

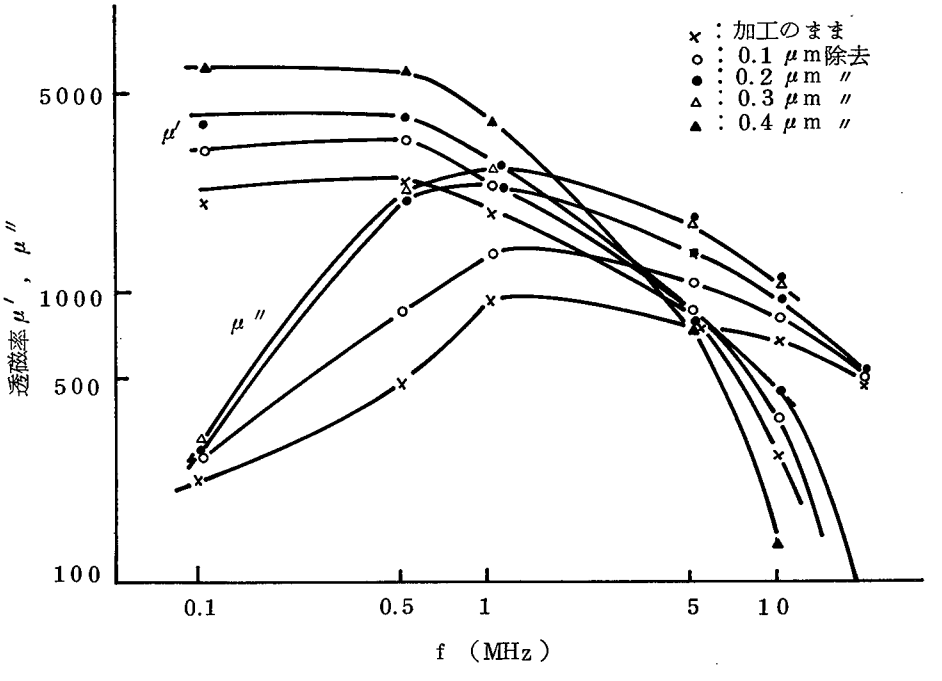


図 4.22　焼結フェライト（Mn−Zn）200μmコアの透磁率変化

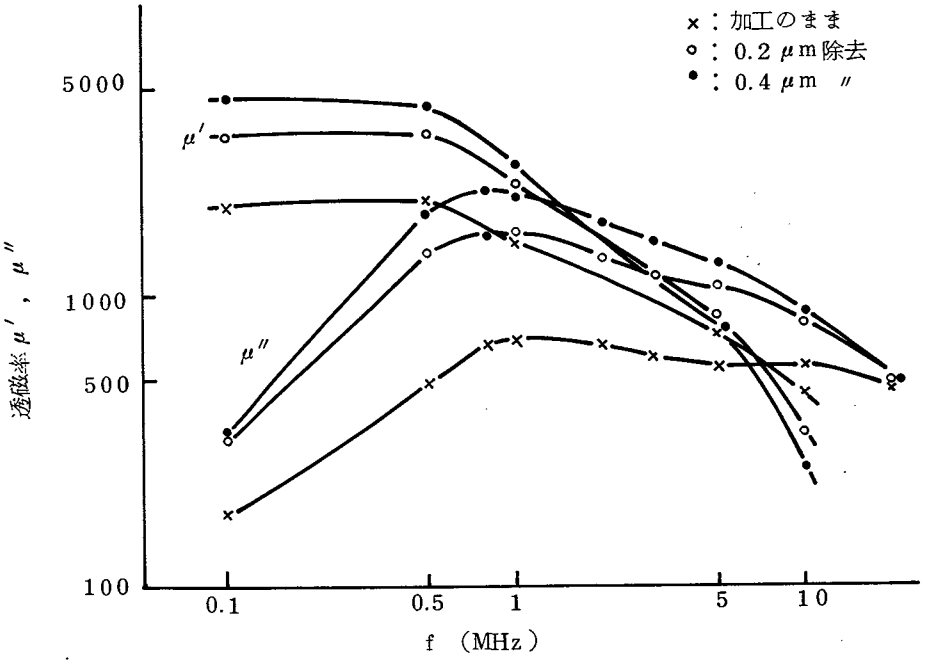


図 4.23　焼結フェライト（Mn−Zn）160μmコアの透磁率変化

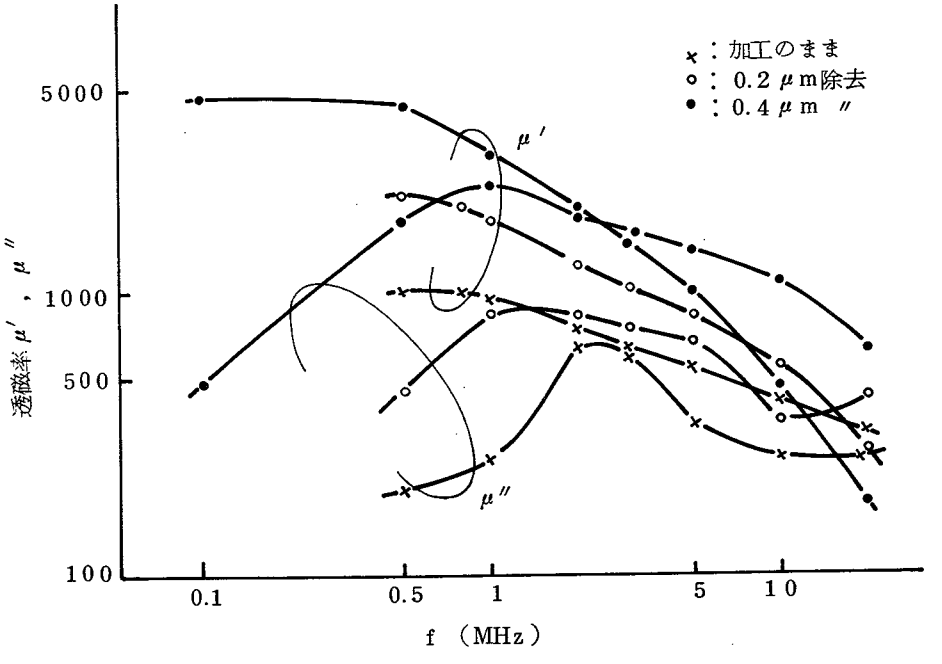


図 4.24　焼結フェライト（Mn−Zn）50μmコアの透磁率変化

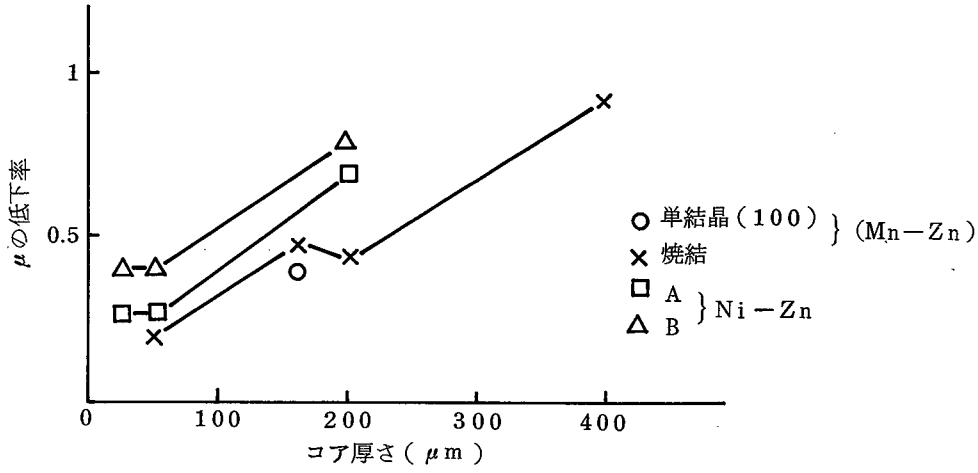


図 4.25　加工したコアの厚さと透磁率の低下

（A：結晶粒径 20μm，初透磁率 2000
B：結晶粒径 10μm，初透磁率 3500）　（1kHz）

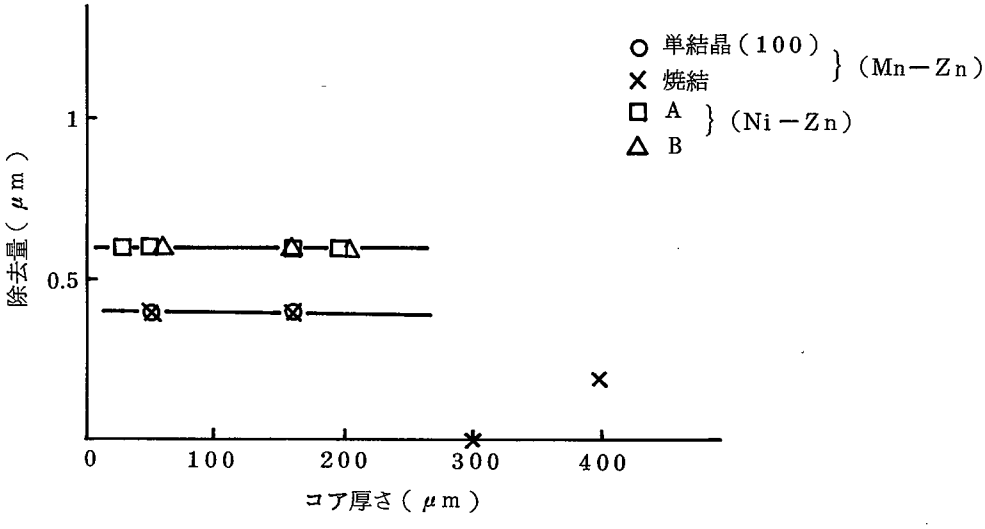


図 4.26　透磁率回復までの加工変質層除去量

一方，加工した状態でのNi－Znフェライトの25μmと50μmのコア透磁率 μ'は500前後と一定である。これは前節における透磁率と応力の間の計算結果を裏付けるものであり，コア厚さ50μm以下は透磁率低下の限界応力に達しているためと考えられる。

4.3　モデル法による再生電圧測定

磁気媒体上に書き込まれた信号を磁気ヘッドで再生する場合の効率は，実際のドラム，

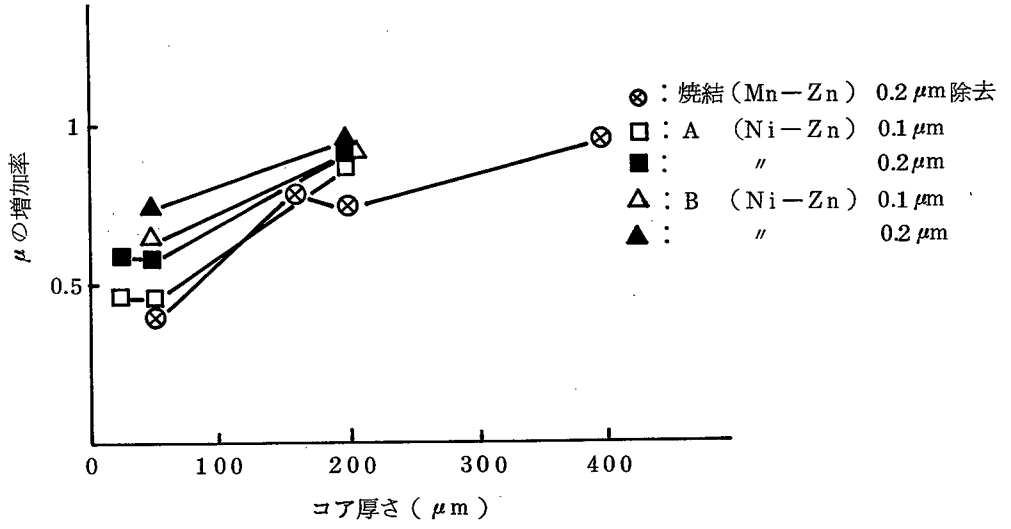


図 4.27　加工面から0.1～0.2 μm除去したときの透磁率の増加

ディスク装置にコアを実装して測定するのが望ましい。しかし，加工変質層を評価する場合は同一試料のエッチング前後の特性値を得るのに，①磁気ヘッドスライダ等へのコアの組込み，②浮上量等ヘッドスライダの設定等に誤差がでて，加工変質層だけの影響を正確に判定することができない。そこでコア単体で測定できるモデル的な方法としてOne－turn法を用いた。

これは図4.28に示すように直径φ40 μmの導線をヘッドギャップ上にヘッド面と接する程度に設定し，導線に周波数fの正弦電流Iを流す。そのとき，導線に生ずる交番磁束を定磁束源としてコイルに生ずる再生電圧（E_{p-p}）を測定する方法である。導線に生ずる交番磁束源を媒体とみなし，すきま，媒体特性，コイル巻数，コア形状等の測定条件が同一ならば，再生電圧は再生効率の関数（4.26）式として表わせる。

$$E_{p-p} = K(d)\,|\eta| \qquad (4.26)$$

加工変質層除去前後の再生電圧の変化は（4.26）式から再生効率の変化に換算して比較できる。

試料として用いたコアの形状寸法と測定条件を図4.29と表4.6に示す。コアの加工条件，エッチング条件はトロイダルコアの場合と同様である。

図4.30に示す測定ジグにより，加工変質層除去前後の再生電圧変化と加工変質層の応力状態を把握するため，コア先端に応力を加えたときの再生電圧変化も測定した。

コア厚さ１６０μm，５０μmの加工変質層除去による再生電圧変化の結果を図4.31に示す。ここで，１６０μmと５０μmのコアの再生電圧値は増幅率，入力電流値，コアと導線のすきま等の測定条件が異なり，絶対量の比較はできない。しかし，両者の再生電圧は約0.4μmの加工変質層の除去によって各周波数に対して平均的に２０～２５％増加している。したがって，再生効率は加工変質層により，約２０％低下していることになる。

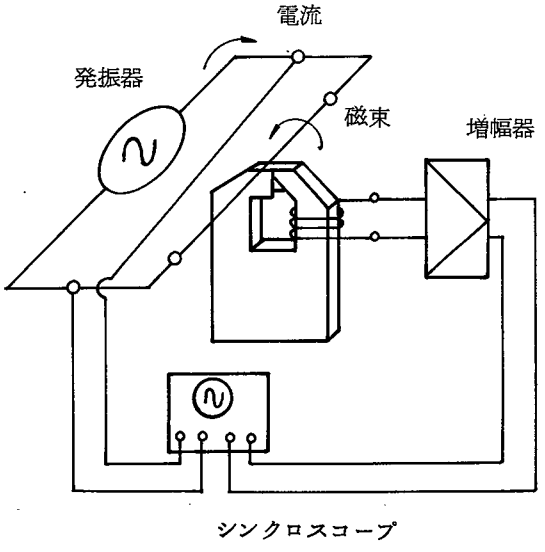


図 4.28　ワンターン測定法

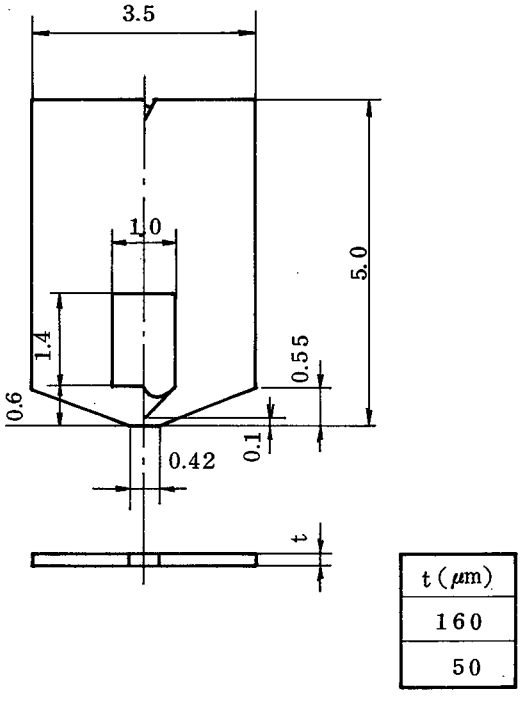


図4.29　コア形状寸法（１０／１）

表 4.6　コアの巻線条件

コア厚さ	線　　径	巻　数
160μm	φ40μmペア	20回
50μm	φ40μm （ポリウレタン被ふく）	10回

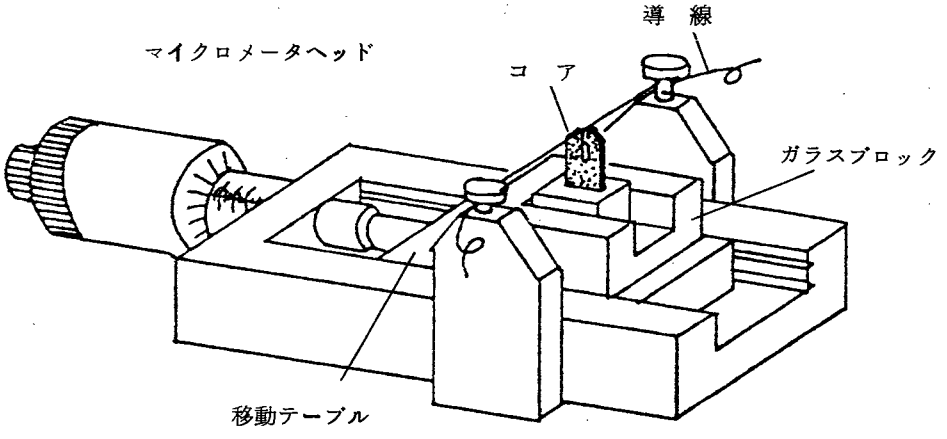


図 4.30　コア位置決め装置

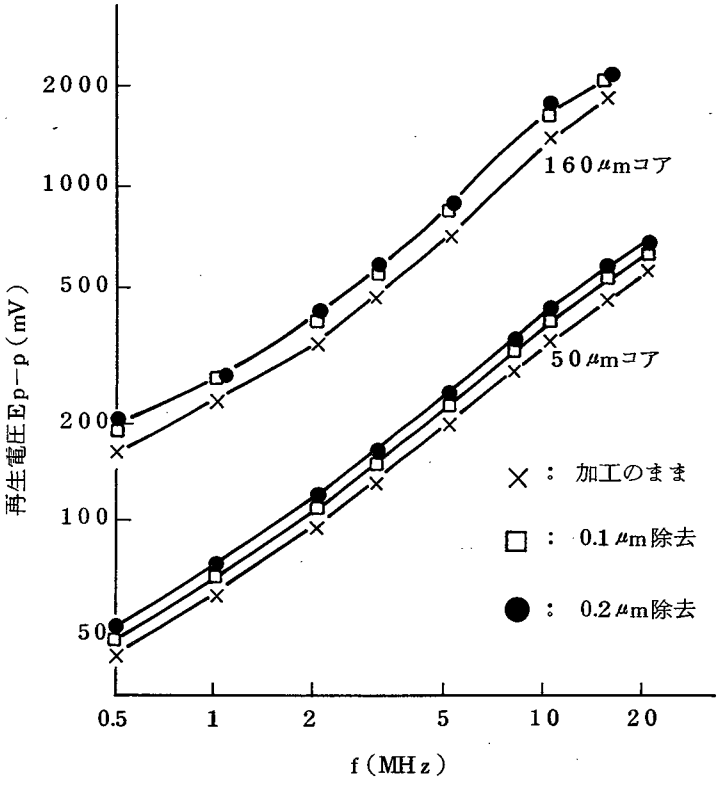


図 4.31　加工変質層の除去による再生電圧の回復

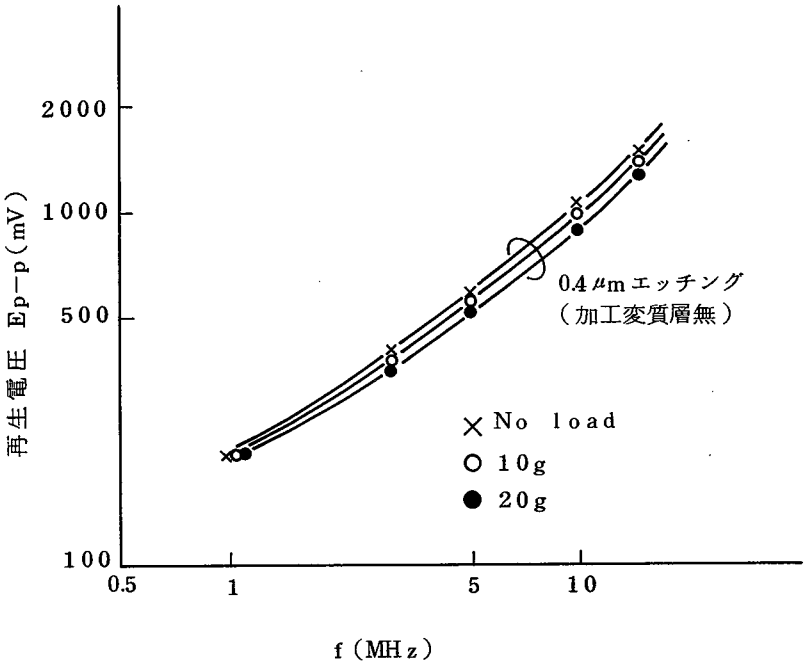


図 4.32　負荷を受けたコアの再生電圧
＜焼結（Mn－Zn）＞

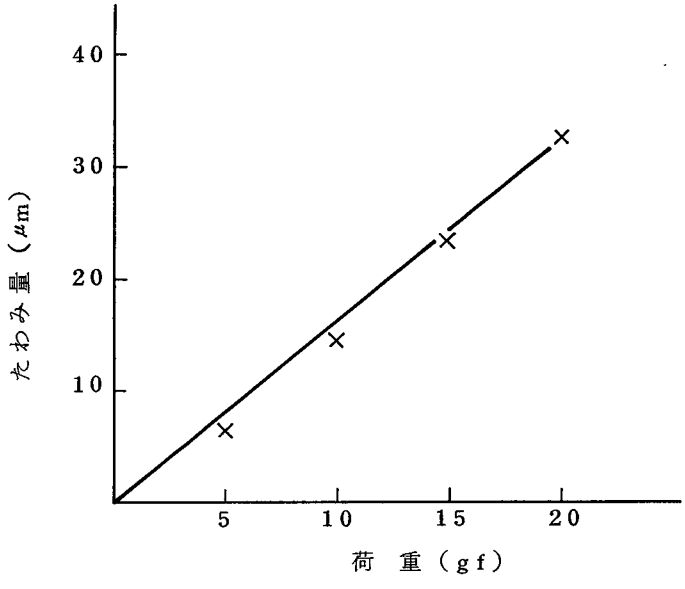


図 4.33　焼結フェライト（Mn－Zn）
160μmコアの荷重－たわみ直線

厚さ160μmのコア先端に10g，20gの負荷を与えたときの再生電圧の変化は図4.32に示すとおりである。このときのコアの荷重とたわみの関係は図4.33のようであり，負荷時のたわみによる導線とのすきま変動は微小であり，その誤差は測定装置の位置精度以内であると考えられる。負荷が大きい程，再生電圧は低下するが，加工変質層を有するコアではすでに内部応力によって透磁率が低下しており，外部応力による再生電圧の低下は少ない。

前節における（4.23）式を使って，加工変質層による透磁率の低下が再生効率に及ぼす影響を計算すると，コア厚さ160μmでは10%，50μmのコアでは20%効率が低下することになる。One－turn法による測定ではともに20%の低下となっており，その差の原因は明確でない。一方，効率の変化率が周波数に依存しない点は両者で一致している。

4.4　本節のまとめ

磁気ヘッド用フェライトのトロイダルコアと実用ヘッドコアの表面をダイヤモンドの1μm砥粒でポリシングし，トロイダルコアは厚さ400μm，50μm，25μm，ヘッドコアでは160μm，50μmと薄片にしたときの加工変質層の影響を透磁率と再生効率の2つの実験より評価した。その結果は以下のとおりである。

1）コアの薄片化により透磁率は低下するがその原因は加工変質層の残留応力による逆磁歪効果によるものである。このため，残留応力が一定値以上になると透磁率の低下は進行せず，従って，薄片化が進んでも透磁率への影響は少なくなる。本実験では50μm以下のコアでは透磁率は一定となっている。

2）0.4μm前後の加工変質層による再生効率の低下は約20%程度である。また，この値は磁気的等価回路から導いた再生効率の計算式に材料の透磁率変化を代入して求めた効率変化の値とほぼ一致する。したがってモデル的なトロイダルコアの透磁率の比較により，実際のヘッドコアにおける再生効率の相対比較が可能である。

5.　本章の総括

磁気ヘッド用材料であるフェライト結晶の透磁率は構造敏感の特性である。すなわち結晶構造の乱れやひずみにより著しく低下する。フェライト結晶をラッピング・ポリシングした場合の加工変質層が透磁率を低下させる機構の一部を理論と実験により明らかにした。さらに加工変質層で低下した透磁率の割合が実際のヘッドの再生効率にいかなる影響を及ぼすか

をモデル実験により推定した。おもな結果は以下のとおりである。

1) 磁気ヘッドコアの磁路に垂直に存在する加工変質層の透磁率を測定する方法を考案し，実際にラッピングしたコアを用いて検証した。電子回折像で結晶構造的に0.6 μmの乱れた層は，約0.2 μmの非磁性層に相当する。

2) 高記録密度を得るために，ラッピング・ポリシングで薄片加工したコアでは磁路に平行に加工変質層が存在する。このようなコアでは残留応力とフェライトの逆磁歪効果によって透磁率が大幅に低下する。この機構は薄片除去法によるそりの測定と計算で評価した残留応力値とフェライト結晶の磁歪定数から理論的な解析をもとに定量的な関係式として設定することができる。

3) 磁気ヘッドコアギャップ上に1本の導線を配して，これに流す正弦電流による交番磁束で誘起されるコアのコイル電圧によりコアの再生効率を評価した。コア加工面に0.4 μm程度の加工変質層が存在すると，再生効率は約20％低下する。

以上の研究結果により，加工変質層と透磁率低下の定量的な関係が明らかになり，高性能磁気ヘッドの製作には加工変質層を生じさせない加工法の開発が不可欠であることが裏付けられた。

参　考　文　献

401）　渡辺純二，上野嘉之：精密機械，38，11（1972）73

402）　一ノ瀬幸雄，熊坂　登ほか：日本金属学会誌，43，11（1979）1043

403）　T. Tanaka：Jap. J. Appl. Phys.,14，8（1975）1169

404）　J. E. Knowles：Appl. Phys.，3（1970）1346

405）　山本義彦，田中一郎：昭和44年精機学会秋季大会前刷（1969）365

406）　河田耕一ほか：昭和44年精機学会秋季大会前刷（1969）139

407）　松緑　剛ほか：昭和48年精機学会春季大会前刷（1973）269

408）　村山智一ほか：昭和48年精機学会秋季大会前刷（1973）171

409）　A. Groenou：IEEE Irans Magn，11，5（1975）446

410）　木村　剛，小林信夫：電通学会技術研究報告80，148（1980）1

411）　渡辺純二，上野嘉之，篠山誠二：精密機械43，9（1977）1012

412）　たとえば粉末冶金技術協会編：粉末冶金応用製品（Ⅱ），日刊工業新聞社（1964）121

413）　J. Smit and H. P. J. Wijn：Philips Tech. Library，（1959）152

414）　W. Kranert and H. Reather：Appl. Phys.，43（1963）520

415）　たとえば電子材料工業会：フェライト応用技術，誠文堂新光社（1972）23

416）　K. Ohta：J. phys. Soc. of Japan，18，5（1963）685

417）　F. Twyman著，富岡正重，山田幸五郎訳：プリズムおよびレンズ工作法，宗高書房（1962）77

418）　たとえば応力測定技術協会編：応力測定法，朝倉書店　p. 375

419）　宇根篤暢，河西敏雄：精密機械，41，11（1975）1055

420）　J. Watanabe：Bull. J. S. P. E.，8，4（1974）155

421）　K. Aso：Japn. J. Appl. Phys.，15，7（1976）1243

422）　武井武編：フェライトの理論と応用，丸善（1960）

423）　K. Ohta et al：Japn. J. Appl. Phys. 3（1964）576

424）　小俣富士夫・渡辺純二：昭和50年精機学会春季大会前刷（1975）397

425）　中川省三：MHK技研月報（1966）216

426）　412）文献　154頁

第5章　加工変質層による磁気特性の変化（Ⅱ）

― ガラスの拡散層における磁気特性の変化 ―

1. 緒　　言

ラッピング，ポリシングなどで発生する加工変質層の磁気的評価法を前章で明らかにした。そのうち加工変質層が磁路に垂直な場合の考え方を適用して，磁気コアギャップの形成に用いるガラス接着によるフェライト・ガラスの相互拡散に基づく磁気特性変化の評価法を研究した[501]。

磁気記録再生装置における高記録密度化を図るために，磁気ヘッドコアのギャップ長は1μm以内にする必要があり，幾何学的な精度と同時に電磁的，化学的な安定性も必要である。

磁気ヘッドコアの狭小ギャップを形成する非磁性材料として，低融点ガラスが使用されているが，幾何学的ギャップ長に対して，電磁的ギャップ長が拡大する傾向にあることは，すでに指摘されている。その原因として，①ギャップ対向面の加工変質層[502]②ギャップ部分の欠け，エッジの丸み[503),504]と，本章に述べる　③フェライトおよびガラスの成分の相互拡散等があげられる[505),506),507]。これまで，③の相互拡散特性とギャップ形成条件の関係，および拡散層の磁気特性変化については明らかにされていない。とりわけ，後者についてはガラス層と拡散層に分離した磁気特性が測定されていなかったため，実効ギャップ拡大の実体が明らかでなかった[508),509]。そこで，ガラス接着条件に関連する拡散状況をXMAで分析し，ガラス成分の結晶粒界への拡散，およびガラスギャップ中のフェライト成分粒子の析出などの相互拡散状態を明らかにした[510]。また，拡散が磁気ヘッドの磁気特性へ与える影響について拡散の著しい接着条件で検討し，析出粒子のあるガラス層，粒界拡散層，中間層など各層別の透磁率変化を測定するとともに，電磁的実効ギャップ長を磁気ヘッドの記録再生特性から求めた。

一方，拡散のないガラス接着条件では溶融状態におけるガラスの粘度が増大し，1μm以下の狭小ギャップへのガラスの流入条件を選択する必要がある。そこで，2平面間の粘性流体の運動方程式を用いて計算と実験により流入特性を把握した。

これらの研究を通して，フェライトとの相互拡散による磁気特性変化のない，1μm以下のガラスギャップの形成法を提示した。

2. ガラス接着におけるフェライト・ガラス成分の相互拡散

2.1 実験試料と実験方法

接着実験に用いた，フェライトおよびガラスの性質と主成分比を表5.1～2と表5.3～4に示す。ガラスは600℃前後の低融点のものであり，主成分は鉛の酸化物である。フェライト試験片は10□×2mmに整形し，被接着面はR_{max} 0.1μm以下の鏡面に仕上げた。これらの個片をガラス接着して，接着断面に対して斜め研摩し，拡散層の深さが実寸法の10倍に拡大されるようにした。（図5.1）ガラス接着層の厚さは10～20μmとした。接着温度は気泡の少ない泡切れ温度[511)]（溶融ガラスの粘性10^2 poise）において，3種の時間を水準に選び，表5.5に示す条件で接着した。雰囲気は1～10^{-1}Torrである。

表5.1 フェライトの性質

性質 ＼ 材料		Ni－Znフェライト KR4，焼結	Mn－Znフェライト HR5－1，ホットプレス
初透磁率（μi）	100kHz	1500±15%	3000±15%
	1MHz	1350	1500
	5 〃	550	300
損失係数（tanδ/μi）（100kHz）		20×10^{-6} max	15×10^{-6} max
最大透磁率（μ_{max}）（1kHz）		2,500	10,000
飽和磁束密度（Bs）150e（ガウス）		3,200	4,300
残留飽和密度（Br）（ガウス）		1,600	1,500
抗磁力（Hc）（エルステッド）		0.2	0.1
温度特性（$\Delta\mu_1/\mu_2/\Delta T$）－20～＋70℃		6.0×10^{-6}	1.0×10^{-6}
キュリー温度（Tc）（℃）		135	130
比抵抗（ρ）（Ω－cm）		1	10^6
焼結密度（S・D）（gr/cm^3）		5.30	5.10
ヴィッカース硬度（Hv）		650	550
熱膨張係数（α）（$\times10^{-7}$/℃）		90	110

表5.2　フェライトの主成分（%）

試料＼成分	Fe	Zn	Cu	Ni	Mn
Ni－Znフェライト	45.3	22.0	0.037	11.3	——
Mn－Znフェライト	49.0	10.9	0.0012	——	12.2

表5.3　ガラスの性質（コーニング・ガラス）

性質＼ガラス・コードNo.		7570 高鉛	8463 高鉛
熱膨張係数×10^{-7}/℃（0～300℃）		84	104
温度特性	歪点（℃）	340	300
	徐冷点（℃）	360	316
	軟化点（℃）	440	377
	作業点（℃）	560	（460）
密度（比重）		5.42	（6.22）
ヤング率×10^{11}（dyne/cm^2）		5.70	（5.20）
ポアッソン比		——	（0.27）
誘電特性（1MHz 20℃）	力率	.22	（.19）
	誘電率	15.	（17.0）
	誘電損失	3.3	（3.2）

注．（ ）内は近似値。

表 5.4　ガラスの主成分（％）

成分＼試料	7570	8463
PbO	75.30	82.46
B_2O_3	10.70	9.20
SiO_2	3.38	5.00
Al_2O_3	9.60	2.84
ZnO	――	0.01 以下
Sb_2O_3	――	0.44

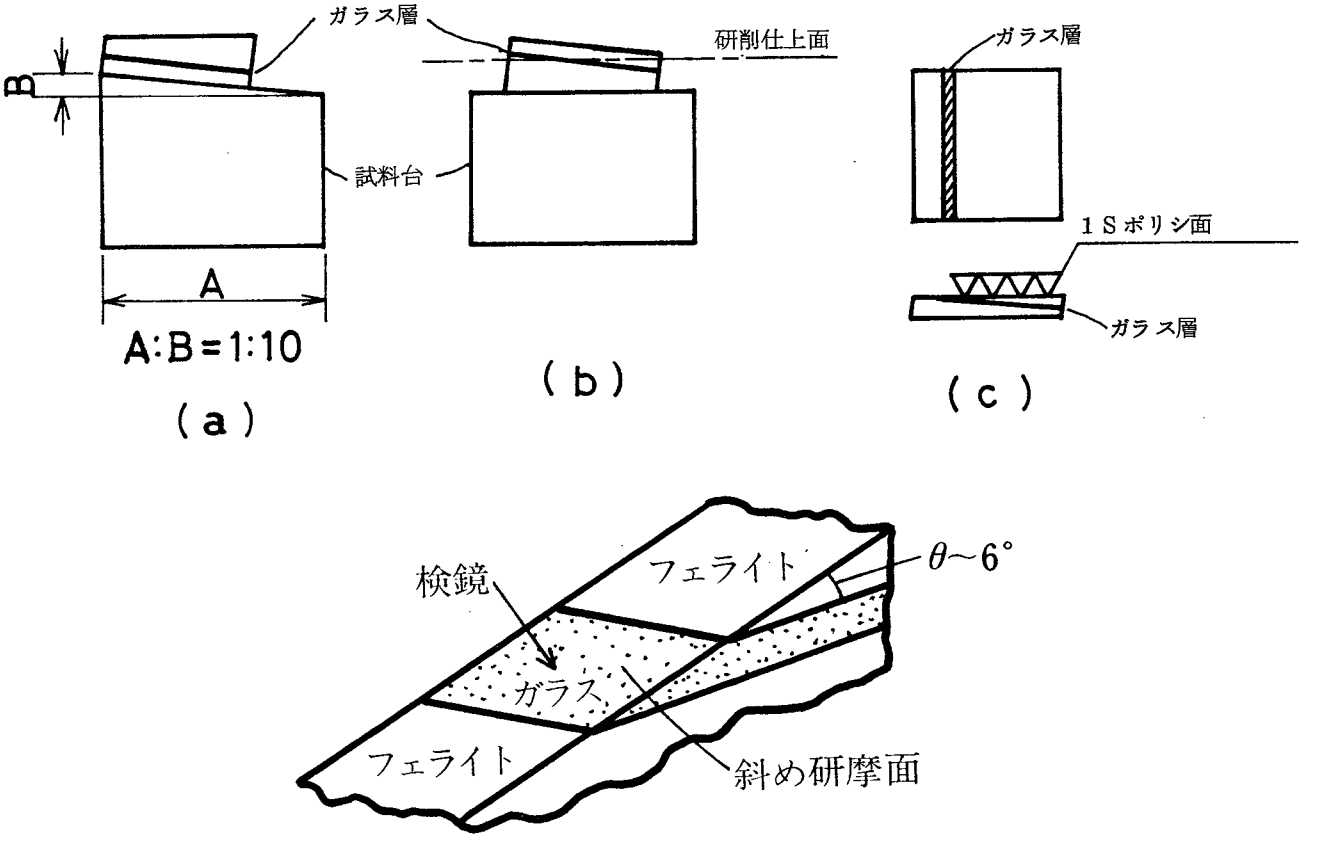


図 5.1　拡散層の斜め研摩による分析・観察法

表 5.5　ガラス接着条件（温度・時間）

材料		最高温度とその時間		加熱速度	冷却速度
フェライト	ガラス	(℃)	(hr)	(℃/min)	(℃/min)
KR4 (Ni－Zn)	7570	660	1/4	11	2.4
			1	12	2.6
			2	14	4.5
HR5－1 (Mn－Zn)	8463	560	1/4	10	3.2
			1	10	3.3
			2	12	2.6

注．加熱冷却速度は変形温度（粘性 10^{12} ポアズ）と泡切れ温度（粘性 10^{2} ポアズ）との間の平均値である。

2.2　結果と考察

図 5.2 にMn－Zn フェライトのガラス接着界面近傍の拡散状況を示す。(a)は研摩面の顕微鏡写真である。ガラス層に隣接して約 6 μm 厚さの粒界拡散部がある。(b)にこの部分の XMA* によるPbMα 特性X線像を示す。Pb 成分がフェライトの粒界に選択的に拡散している状況が明らかである。粒界部は転位をはじめとする多数の欠陥の集積部であり，拡散係数が大きいため，粒内に対して選択拡散が生じたものである。同様の傾向は加工変質層の歪層に対しても起こる。すなわち，加工変質層を残した試料をガラス接着すると，エッチングで取除いた試料の場合よりも拡散層が深く，加工変質層に蓄積された歪エネルギが拡散を助長する。したがって，コア形成においては拡散層を低減させるためにも加工変質層は望ましくない。図 5.2 (a)において，粒界拡散層の次にラッピング時粒子が脱落して多数の微小孔の発生する層が約 50～60 μm ある。（これを仮に中間層と呼ぶ）この層において，XMA 分析では，ガラス成分は検出されず，さらに感度の高いIMA による定性分析を行った。

ガラス成分におけるAℓの最小検出濃度はXMA が～1,000 ppm に対してIMA では0.1 ppm である。IMA 分析の結果，粒界拡散層から 4 μm 前後の位置までガラス成分の拡散

＊　島津 EMX－SM

が認められたが，中間層の大部分には拡散は生じていない（図5.3）。したがって，中間層はガラス成分ガスによる腐食により粒界部が脆弱化し，ラッピング中結晶粒子が脱落したものと考えられる。一方，ガラス層中にはフェライト粒子の折出が多数みられ，粒界の溶出により，脱離した結晶粒子と考えられる。この状況をFeK_αの特性X線像とこの線分析結果として図5.4に示す。

Ni－Znフェライトの場合について図5.5にガラス層近傍のPbM_α特性X線像を示す。粒界拡散もMn－Znの場合に比べて1桁小さくXMA装置の分解能の限界で，図5.5では明らかでない。またMn－Znの場合みられた中間層およびガラス層中へのフェライト粒子の析出はない。

ガラス接着条件と相互拡散との関係を表5.6～7にまとめた。接着温度が接着時間よりも拡散深さに与える影響が大きく，泡切れ温度より約100℃低い作業温度では相互拡散がほとんどみとめられなかった。このときのXMA分析結果を図5.6に示す。図5.2，図5.4と比較して明らかのように，鉄成分，鉛成分の拡散はない。

表5.6　ガラス成分PbのMn－Znフェライトへの拡散深さ

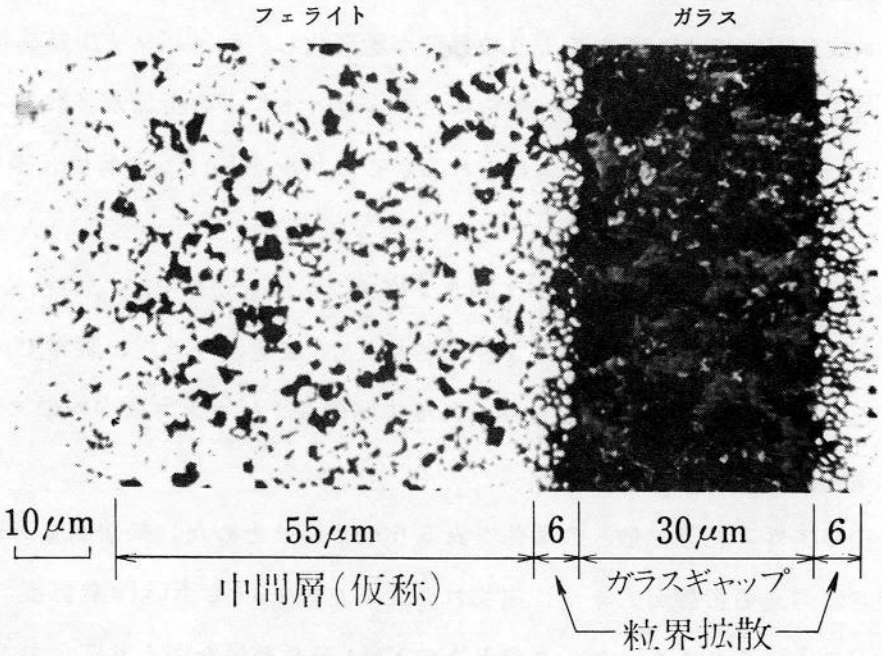
接着条件	拡散深さ（μm）			中間層幅
	特性像の寸法	チャートの寸法	実寸法（平均）	実寸法（μm）
560℃，2hr	64	58	6.1	53.0
〃　1〃	44	48	4.6	40.0
〃　1/4〃	33	28	2.9	11.5

注．実寸法は図寸法の1／10である。

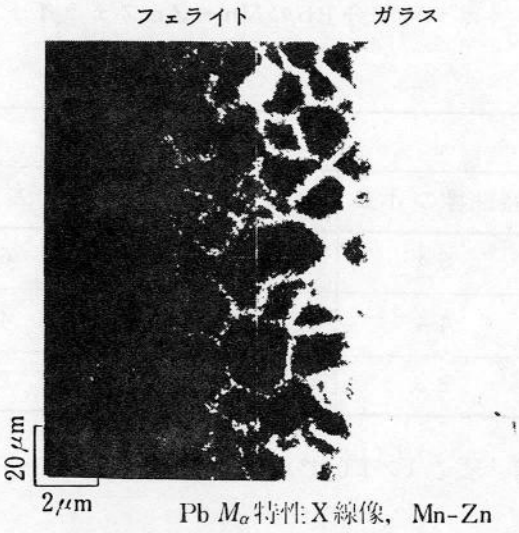
表5.7　Ni－Znフェライト成分のガラス層への拡散深さ

接着条件	特性像の寸法（μm）	実寸法（μm）
660℃，2hr	30	3.0
〃　1〃	15	1.5
〃　1/4〃	6	0.6

注．実寸法は図寸法の1／10である。

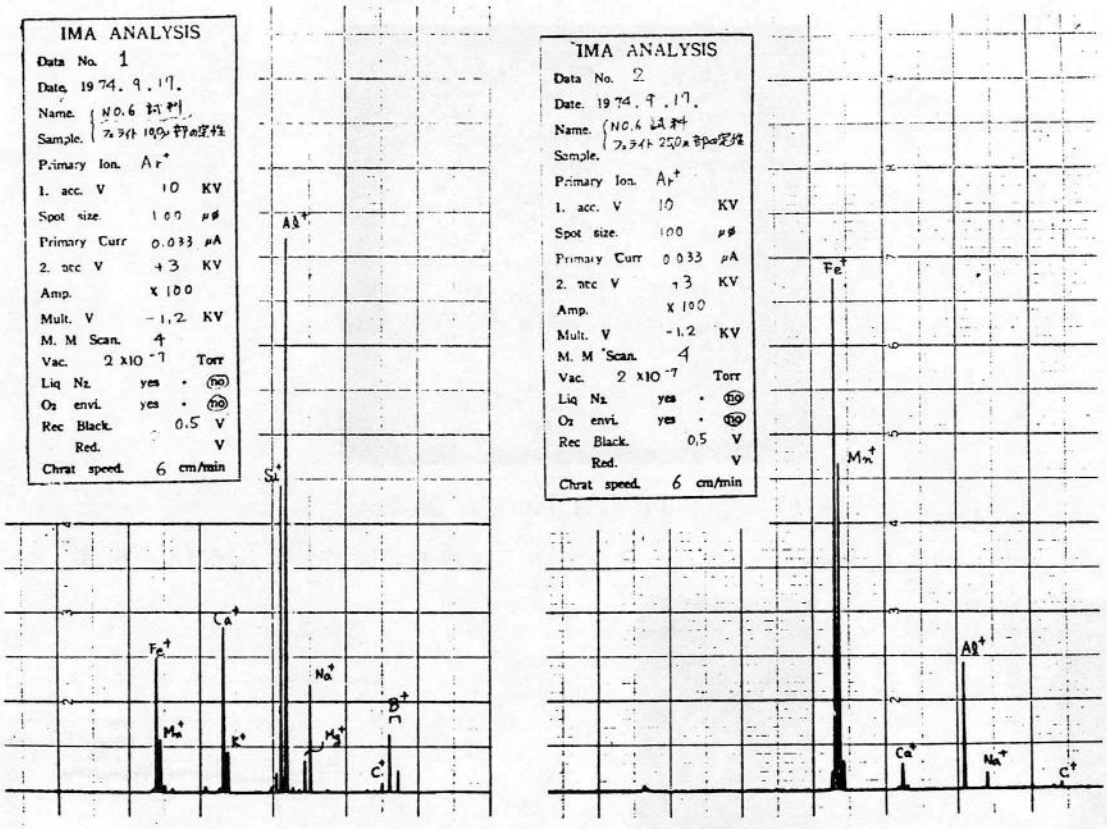


(a)　拡散層の顕微鏡写真



(b)　XMA分析

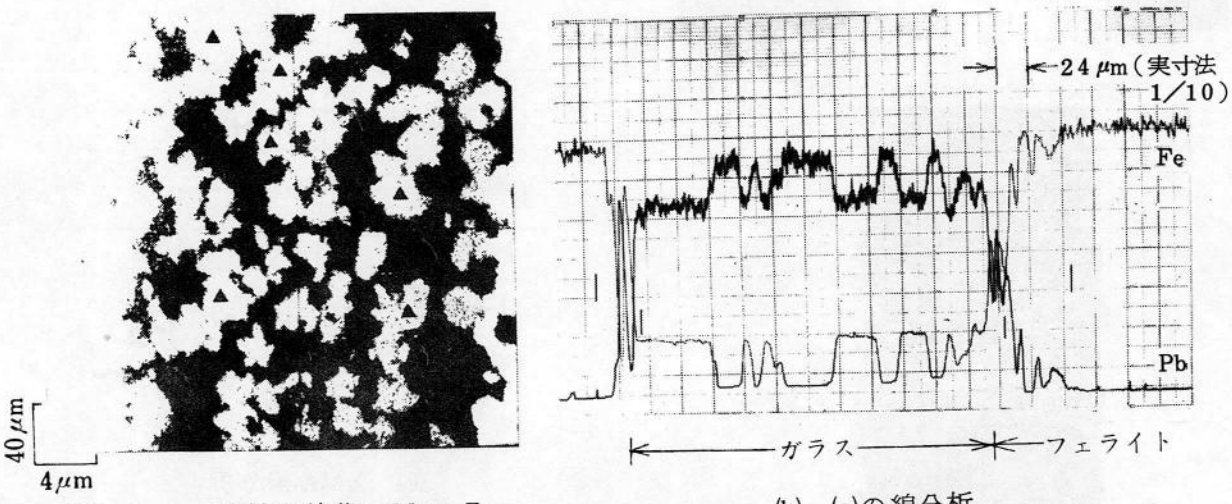
図 5.2　Mn－Znフェライトにおけるガラス接着界面の拡散状態



(a) 接着界面から10μmの位置　　(b) 接着界面から25μmの位置

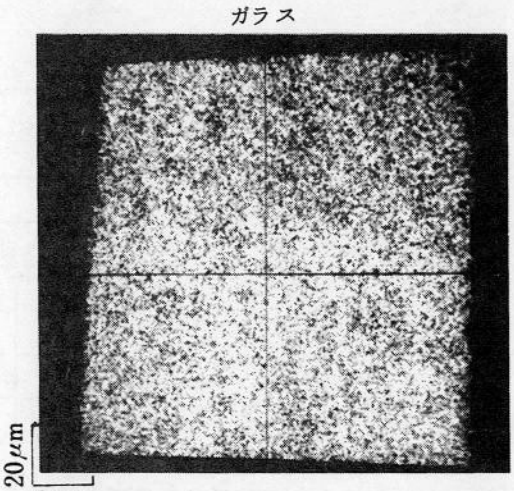
図5.3　Mn－Znコアのガラス接着部近傍のＩＭＡ分析

（接着条件：ガラス8463, 泡切れ温度560℃, 2時間）



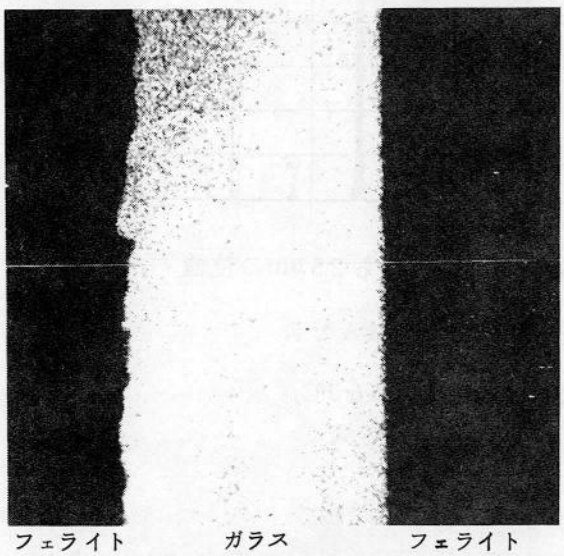
(a) FeKα特性X線像，Mn－Zn　　(b) (a)の線分析

図5.4　ガラス層中へのフェライト粒子の析出を示すXMA分析

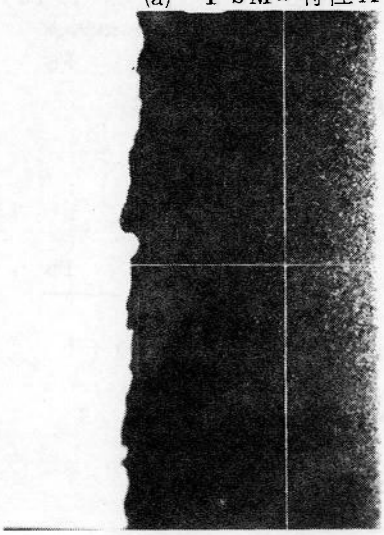


Pb M_α特性X線像，Ni-Zn

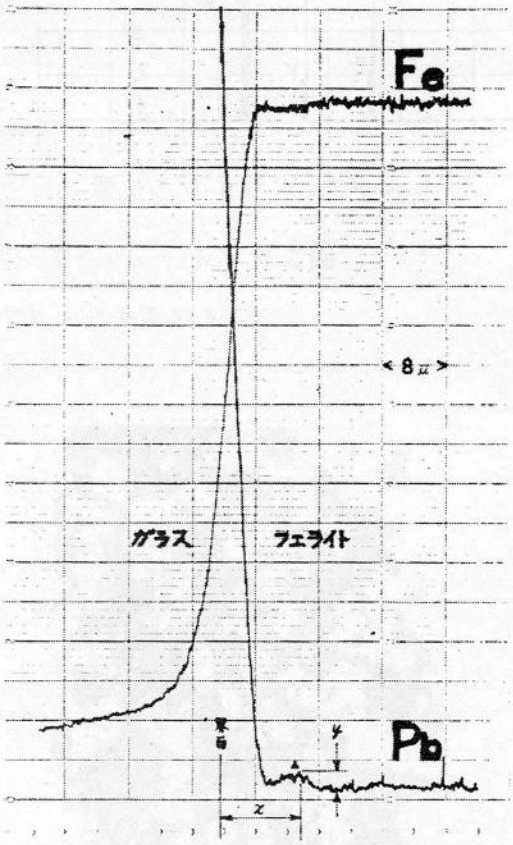
図 5.5　Ni－Znフェライトのガラス接着界面におけるXMA分析像



(a)　PbMα特性X線像



(b)　FeKα特性X線像



(c)　XMA線分析

40μm ※

（※斜め研摩のため実寸法は1／10）

図 5.6　Mn－Znフェライトの作業温度における接着界面付近の分析

2.3　本節のまとめ

ガラス接着によるフェライトとガラス成分の相互拡散状況について，ガラス接着条件を変えてXMA分析により検討した。

Mn－Znフェライト系の拡散がNi－Zn系より大きく，特に粒界における選択的拡散が生ずる。拡散深さに対して最も影響の大きい要因は接着温度であり，Mn－Znフェライトにおいて粒界拡散の大きい泡切れ温度（ガラス粘度10^2poise）に対して，これより100℃と低い作業温度（ガラス粘度10^4poise）で接着を行うと，Mn－Zn，Ni－Znともに拡散はほとんど認められない。

3.　相互拡散による磁気特性への影響

3.1　実験方法

相互拡散部の磁気特性の測定は，図5.7のような，ガラス接着したコアを切断分離し，一方に残した界面近傍の中間層，粒界拡散層，ガラスギャップの各部分を1～数10μmずつ除去加工し，そのたびごとに2個のコアを接合し，磁気抵抗の変化を追跡測定する。すなわち加工前後の変化量が除去した層に基づくと考えて，除去した層の抵抗が算出できる。図5.7のコアのガラス接着は泡切れ温度で2時間行い，その後コアの中間層，粒界拡散層，ガラスギャップを残して切断してBコアを作り，Aコアはガラス接着しないもので作る。ここで両コアの平均磁路長を測定しておく。

図5.7のA，Bコアのつき合せ面を接合したときの磁気抵抗Rは，中間層の磁気抵抗をR_1，粒界拡散層の磁気抵抗をR_2，ガラスギャップ，ABコア接合時の空隙部，コアのフェライト部分のそれぞれの磁気抵抗をR_3，R_4，R_0とすると次式のようになる。

$$R = R_0 + R_1 + R_2 + R_3 + R_4$$

$$= \frac{\ell_0}{\mu_0 S} + \frac{\ell_1}{\mu_1 S} + \frac{\ell_2}{\mu_2 S} + \frac{\ell_3}{\mu_3 S} + \frac{\ell_4}{\mu_4 S} \qquad (5.1)$$

$\ell_{0\sim4}$は各部の平均磁路長，$\mu_{0\sim4}$は各部の透磁率，Sはコアの断面積である。

切り離したA，Bのコの字形コアのつき合せ面の加工に際しては，コアの断面積が小さく，高精度の平行平面を得るのが難しいため，あらかじめ，図5.8(a)に示すような組立ジグ内に接着，固定する。その後，同図(b)のようなガラス円板（平行度1μm以内，平面度

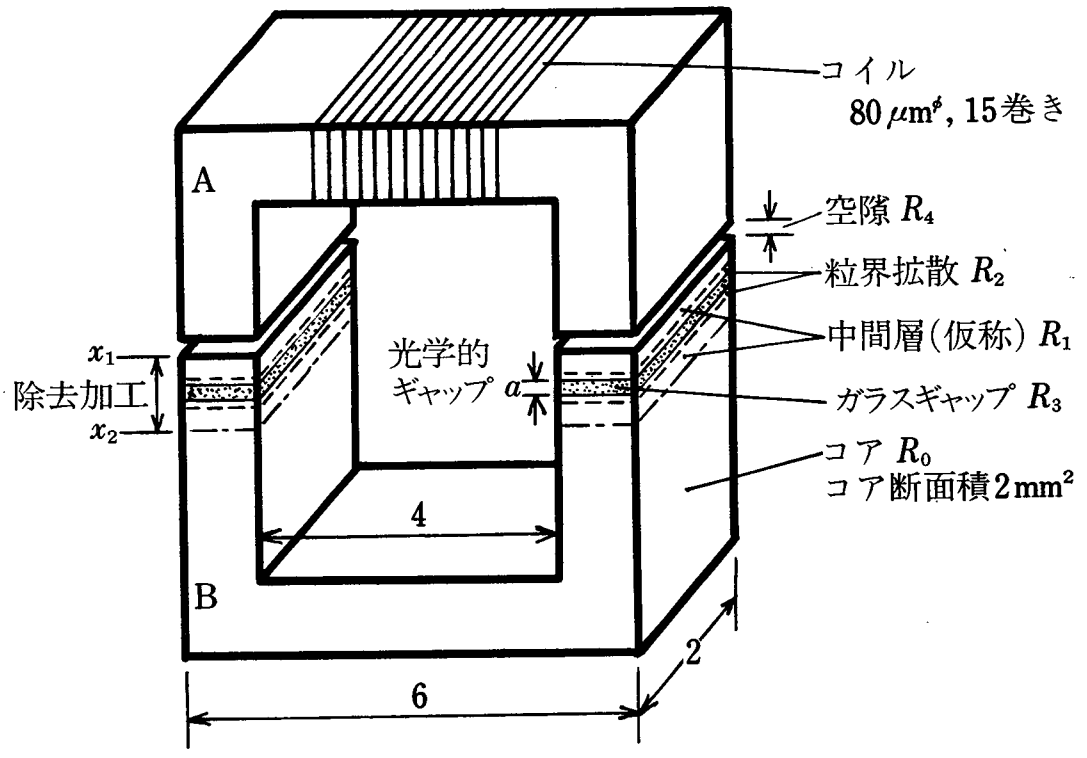


図 5. 7　相互拡散部の磁気特性測定用モデルコア

0.3 μm以内）の中央に(a)の試料を周囲のダミとともに接着，固定し，ラッピング（GC#2000，WA#4000，亜鉛皿），ポリシング（ダイヤモンド1 μm，すず皿）を行う。同図 5. 8 (c)はコアとジグとの仕上がり平面度であり，表面粗さはR_{max} 0.1 μm以内である。

加工後，A，Bコアを接合して磁気抵抗を測定する際，接合時の空隙量を図 5. 9 のようにしてあらかじめ評価した。すなわちBコアの組立ジグは非磁性フェライトで作り，上のAコアの組立ジグはガラスで作られている。両者の四つのつき合せ面どうしを合わせて，ガラス製ジグの上部からつき合せ面に生じた干渉縞を観察して接合部の空隙量を測った。干渉縞は自然光で 2 色程度であり，3 ～ 5 回の繰返し設置においても再現性を維持できた。空隙量は 0.1 μm以下と考えてよい。また，接合の繰返しごとに磁気抵抗値も参照し測定値に変動のない点から空隙量の変動が少ないことを確かめた。測定周波数はコアの周波数特性に変化の少ない 0.5 MHz を用いた。

3. 2　結果と考察

1）コアつき合せ面を薄層ずつ除去加工したときの磁気抵抗の変化を図 5. 1 0 に示す。同図(a)のMn－Znコアにおいて，中間層では磁気抵抗の変動がほとんどなく，同図(b)のNi

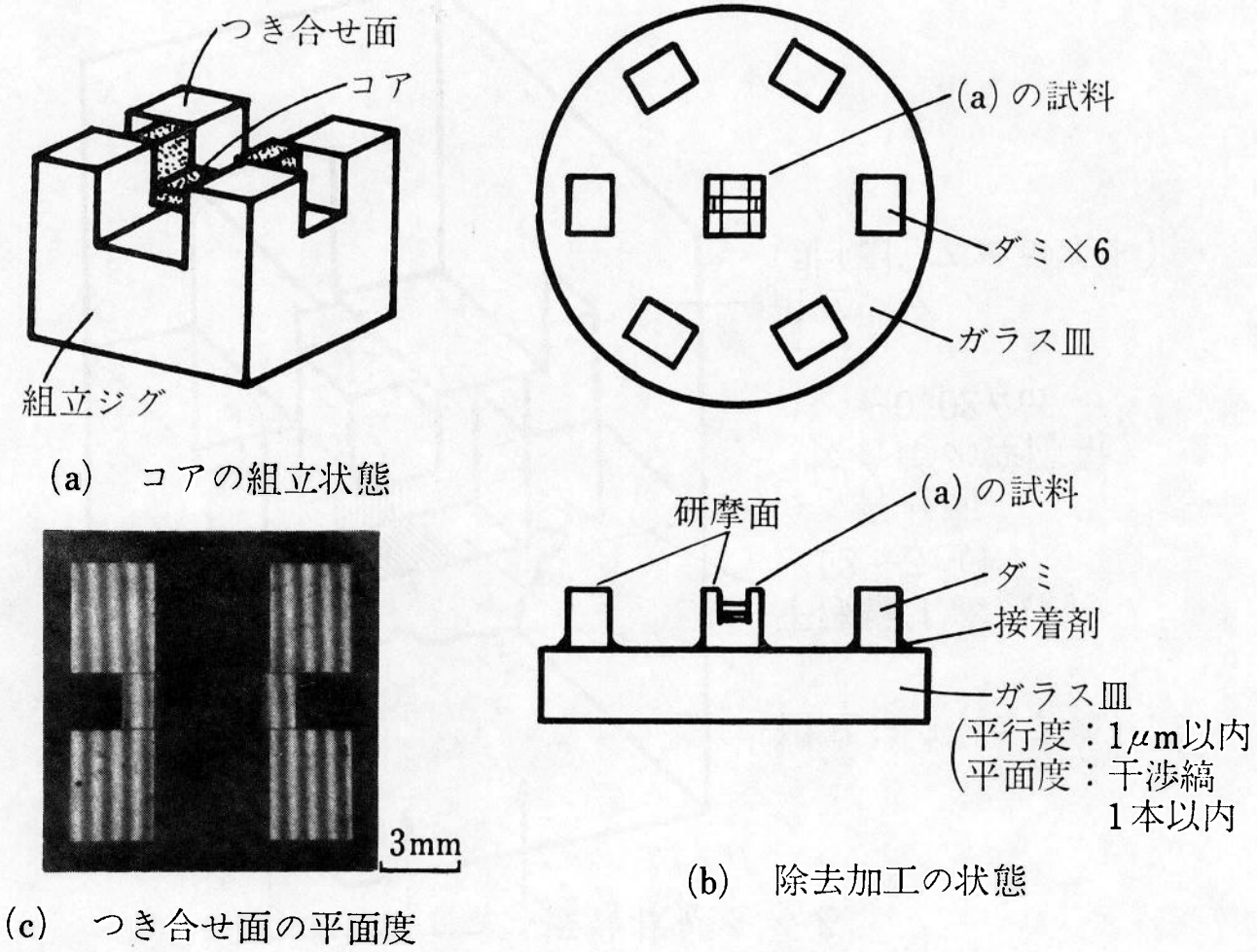


図 5.8 コアの研摩用ジグと研摩面精度

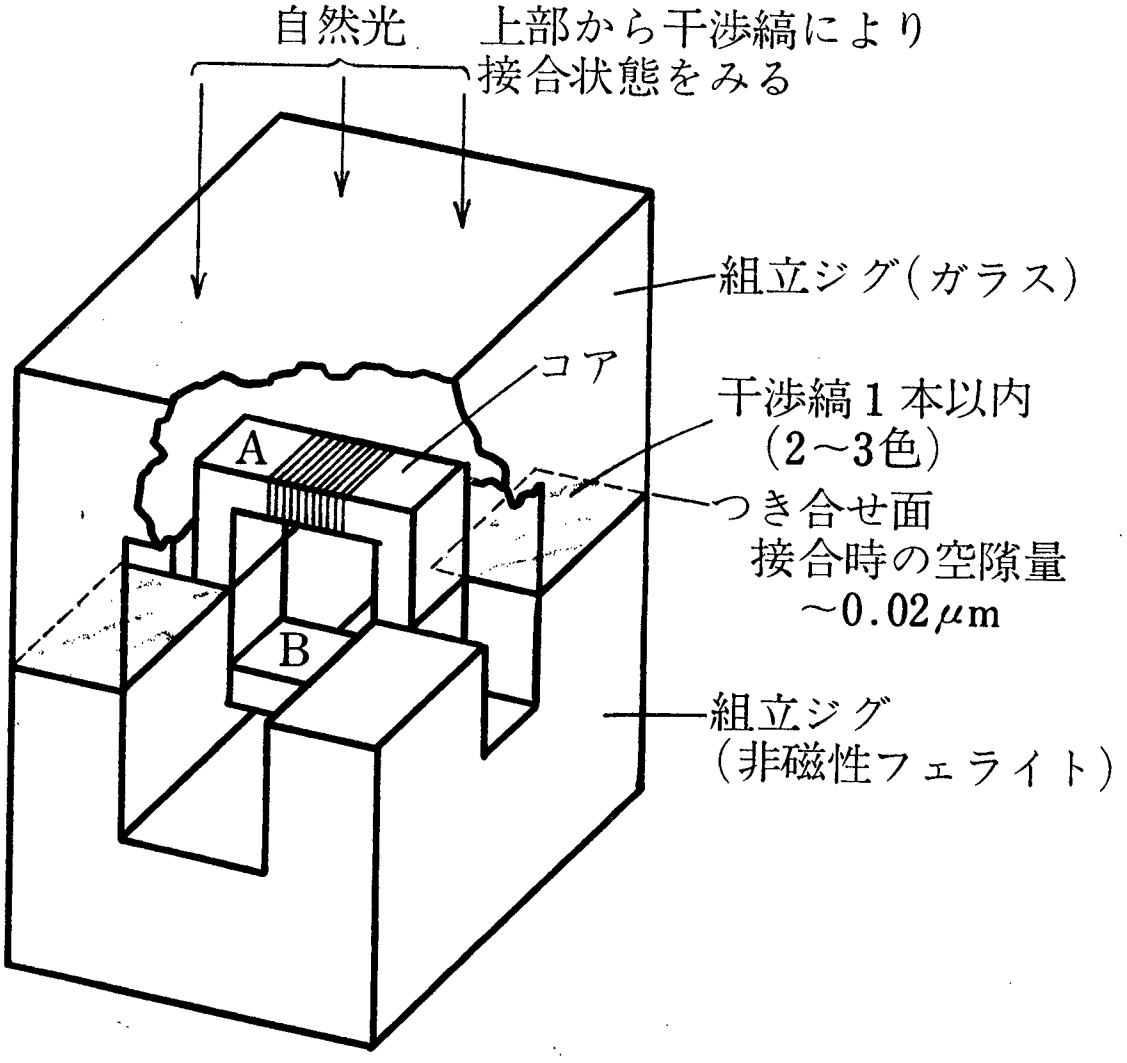
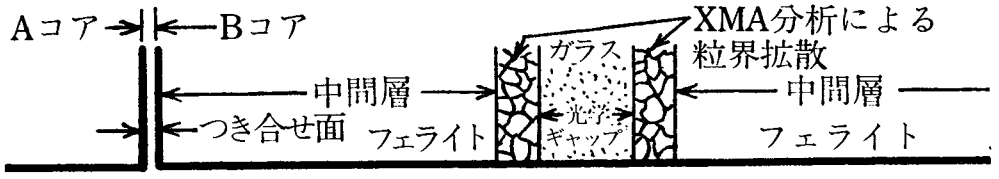
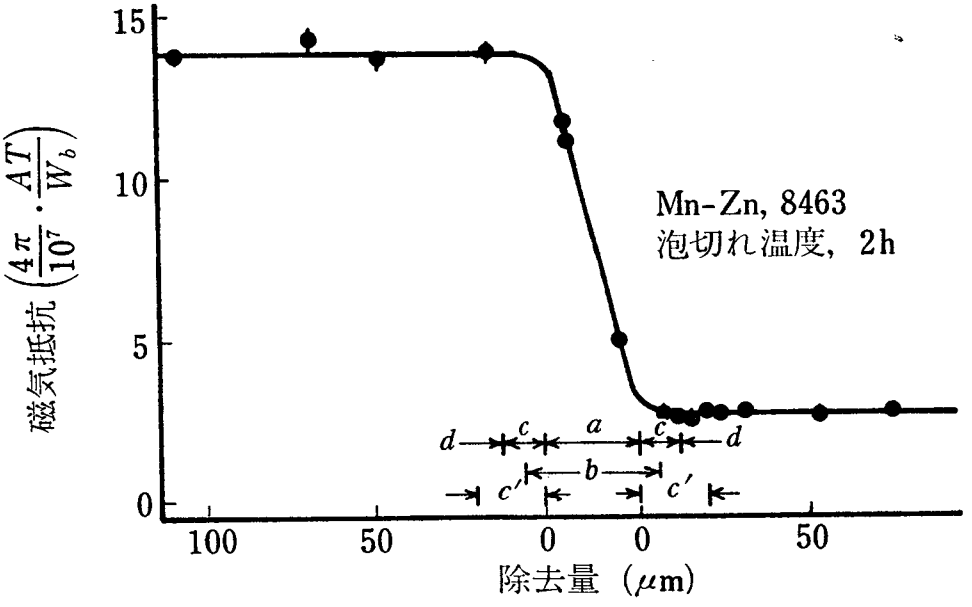
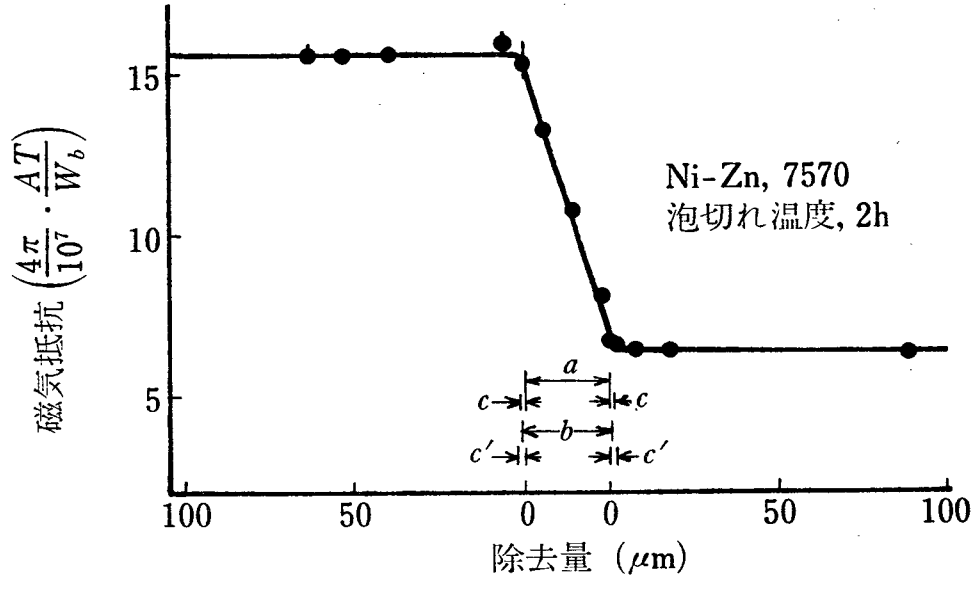


図 5.9　コアの磁気特性測定用組立ジグ





(a) Mn−Znコア



(b) Ni−Znコア

図 5.10　薄層除去過程における磁気抵抗の変化

－Znコアではフェライト部分での磁気抵抗の変動がほとんどない。

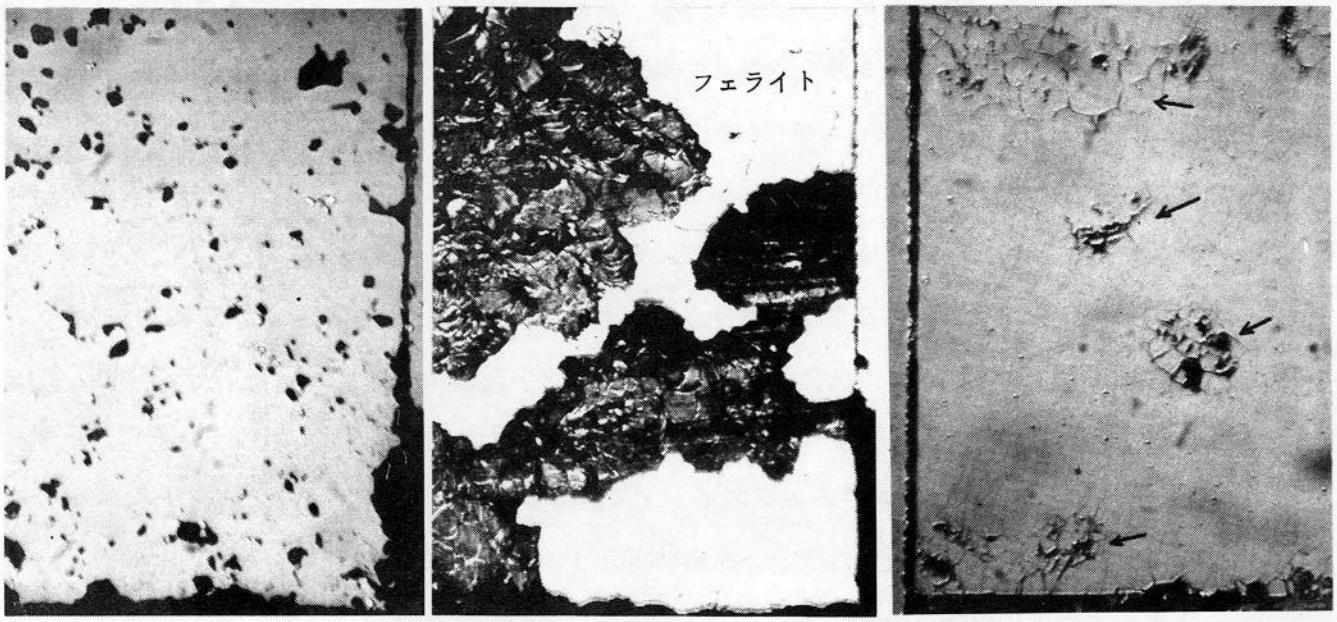
表5.8に図5.10における磁気抵抗変化からギャップ部のガラスと拡散層近傍のフェライトの透磁率を計算した値を示す。ガラス部の透磁率が非磁性材料値1から1.5～1.8に増加している。その原因はガラスギャップ内の析出粒子（Mn－ZnコアではFe成分，Ni－ZnコアではAℓ成分）の影響と考えられる。ガラスの透磁率の増加は磁気抵抗の減少とそれに基づく実効ギャップの減少を予想させる。また，フェライトの透磁率は0.5MHzにおけるMn－Znの初透磁率2500に対して，拡散層，特にごく界面近傍で35～70に減少し，Ni－Znの初透磁率1400に対して6～14に減少している。Mn－Znフェライトではガラスが粒界に拡散した層に相当し，磁性結晶粒子が非磁性ガラスに囲まれた状態になり，磁気抵抗が高くなっていることを示す。

表5.8　相互拡散によるガラス・フェライトの透磁率変化*

No.	材　　料	ガラスギャップの透磁率	フェライト側へのガラスの拡散層	
			界面からの距離（μm）	透　磁　率
1	Mn－Zn，8463	～1.8	～10	35～70
2	Mn－Zn，8463（界面エッチ）	～1.7	～4	30～50
3	Ni－Zn，7570	～1.5	～1	6～14

＊　片側ギャップの2か所の界面のうち1か所の値に換算

b）図5.11(a)はつき合せ面を薄層ずつ除去加工しながら研摩面を観察した結果の一部で，Mn－Znコアの中間層に相当する。ガラスとフェライトの界面から約60μmの位置で，ガラス接着界面近傍の断面の光学的観察と同様，空孔の多い状態にある。同図(b)はフェライト側からガラス層へ移行する部分である。粒界を通した相互拡散により，ガラス相とフェライト相が入り混っている。さらに同図(c)はガラス層からフェライト側へ移行する部分（幾何学的寸法では約1μmガラス側にある）で，矢印の部分にガラスがフェライトの結晶粒界に拡散した跡が残っているのがみえる。これは粒界拡散の深さが不均一であることを示している。このように拡散層・ガラス層・拡散層を通して薄層除去加工面の観察によってフェライト面にガラスの拡散部がなくなったところを仮想の界面とした。



(a) 中間層における空孔　(b) フェライト側からガラス層へ入る界面　(c) ガラス層からフェライト側へ入る界面

図 5.11　薄層除去過程における界面拡散層近傍の状態
（Mn－Znフェライト）

表 5.9　各評価法によるギャップ長

No.	材　料	光学的ギャップ長 a（μm）	除去加工により測定したギャップ長			除去加工による拡散層（μm）***
			b **（μm）	b／a	拡大量（μm）	
1	Mn-Zn, 8463	28	40	1.4	12	10
2	〃　（エッチ）*	24	32	1.3	8	3.5
3	Ni-Zn, 7570	25	27	1.1	2	1

注．ガラス接着条件は泡切れ温度 2hr；ギャップ長は両側の合計値。
＊ ギャップ対向面をあらかじめHFでエッチングしてガラス接着をしたもの。
＊＊ 粒界拡散の影響が一部加算された寸法になる。
＊＊＊ 界面からの片側寸法。

この両界面間をガラスのギャップ長bとし，斜め断面（１０倍に拡大）の光学的検鏡により測定したギャップ長aとを比較して表5.9に示した。ギャップ長bはaよりいずれも拡大しており，Mn－Znコアでは特に顕著である。bのaに対する拡大量はXMA分析で評価した粒界拡散層深さに対応する。ただし，本方法によれば，ＸＭＡが一断面の分析であるのに比し，全体の詳細な観察になっている。

3）表5.１０に拡散層のあるガラスギャップを実際の磁気ヘッドに組み込んで記録再生の特性から評価した実効ギャップ長を示す。同じガラス接着条件の試料№3（Ni－Zn)のギャップ拡大比b／aが表5.9の薄層研摩一観察から評価した拡大比とほぼ一致している。このことより1)におけるガラスギャップ透磁率の増加が実効ギャップの減少に影響を与えていないことになる。また，接着時間を1／4hr程度にすればMn－Znフェライトでも実質上の影響は少ない。

以上，拡散の著しいガラス接着条件の泡切れ温度・2時間で相互拡散と磁気特性との関係を検討した結果，粒界拡散が実効ギャップ拡大の主要因であることがわかった。拡散成分が低融点ガラスの主成分であるPbであることから，組成比からの改善は困難である。そこで，ガラス接着の温度を泡切れ温度より約１００℃低い作業温度とし，保時時間を2時間にすると相互拡散がＸＭＡ分析でみとめられず，これによる磁気特性への影響はほとんどない。しかし，作業温度ではガラスの粘性係数が約2桁増すため，1μm以内の狭小ギャップへの流入度が問題になる。

表5.１０　磁気ヘッドコアの記録再生特性による実効ギャップ長

№.	材　　料	泡切れ温度による接着時間（hr）	光学ギャップ長a（μm）	記録再生特性によるギャップ長b（μm）	b／a	拡大量（μm）
1	Mn－Zn，8463	1	6.2	7.06	1.14	0.86
2	Mn－Zn，8463	1／4	12.4	12.67	1.02	0.27
3	Ni－Zn，7570	2	7.0	7.66	1.09	0.66

3.3　本節のまとめ

磁気ヘッドコアのギャップ形成におけるガラス接着によって生ずるガラスとフェライト

の相互拡散層の磁気特性の変化を明らかにした。磁路内に拡散層を含むコの字コアを作成し，拡散層を薄層ずつ研摩除去しながら磁気抵抗変化を測定し，ガラス層および拡散層の磁気特性をはじめて直接測定した。また，拡散層を有するコアを実際のヘッドに組込み記録再生特性からも実効ギャップ長を評価した。

前節で明らかになったMn－Zn材料における粒界拡散層は，フェライトの初透磁率の1／100程度に低下し，ガラス層ではフェライト粒子が析出した状態で，透磁率が1から1.5～1.8に増大することがわかった。記録再生特性から評価した場合，粒界拡散層は，実効ギャップの拡がりにほぼ対応することが明らかになった。

4. 磁気コアギャップへのガラスの流入特性

前節でフェライト結晶へのガラスの拡散は実効ギャップの拡大や透磁率変化を引きおこすことを定量的に示した。拡散を防ぐには，第2節で述べたようにガラス接着の温度を泡切れ温度から約100℃低い作業温度にすることである。このときXMAの分析で確認できないほど拡散層は低減される。しかし，溶融状態のガラス粘度が10^2ポアズから10^4ポアズに増大し，狭小ギャップ（～1μm）へのガラスの流入が懸念される。そこで，ガラスの狭小ギャップへの流入限界に対して，粘性流体の2平面間の運動方程式を利用して近似的な推定計算を行い，ギャップ幅0.5～10μmへの実際の流入特性を把握した。

4.1　2平面間へのガラスの流入特性

次式のような非圧縮性粘性流体の2平面間の運動方程式を使って，流入特性の近似計算を行った[512)]。

$$\overline{v} = -\frac{\ell^2}{12\eta} \cdot \frac{P}{y} \qquad (5.2)$$

ここに，　$\overline{v}$：平均流速（cm／sec）

ℓ：2平面間の距離（cm）

η：粘度　（poise）

P：液面の上昇にともなって変化する圧力（dyne／cm^2）

y：流入高さ　（cm）

図5.12はこの状況を説明するものである。同図の毛細管上部のメニスカスにおけるΔP

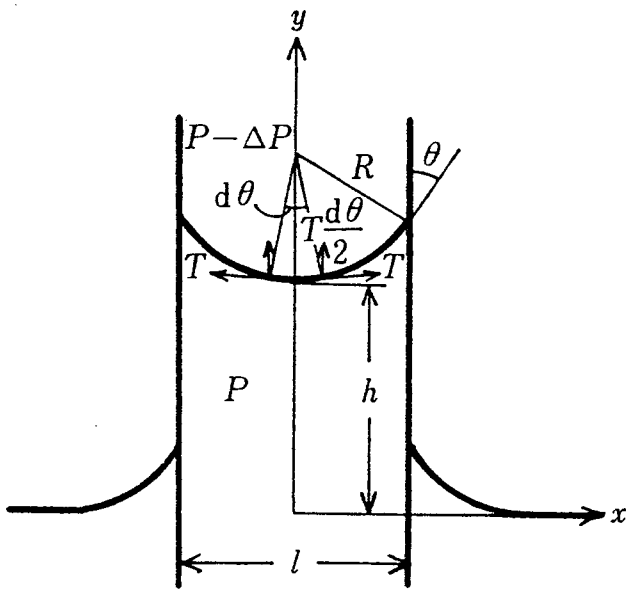


図 5.12　毛細管現象による流入モデル

は本実験におけるℓが非常に小さい（～10^{-4}cm）ので無視できる。本図は下からの流入であるが，磁気ヘッド製作におけるガラス接着では，上部にガラス丸棒を載せて溶融させ流入させるので，ガラスの重力を考慮して圧力Pを求めると次式となる。

$$P = -\frac{2T\cos\theta}{\ell} - (\rho - \rho_0)\,g\,y + \rho_0\,g\,y \qquad (5.3)$$

ここに　　T ：表面張力　（dyne／cm）

θ ：接触角　（rad）

ρ ：流体の密度　（g/cm^3）

ρ_0 ：空気の密度　（g／cm^3）

である。（ 5.3 ）式を（ 5.2 ）式に代入すると（ 5.4 ）式になる。

$$\overline{v} = \frac{\ell T\cos\theta}{6\eta y} + \frac{\ell(\rho - 2\rho_0)\,g}{12\eta} \qquad (5.4)$$

（ 5.4 ）式における第２項は２平面間の距離（この場合ギャップ長）ℓが～10^{-4}と小さい値のため無視できるので，（ 5.5 ）式のようになる。

$$\overline{v} = \frac{\ell T \cos\theta}{6\eta y} \qquad (5.5)$$

さらに，y方向の各点の平均流速を一定とすると，$y = \overline{v}t$ としうるので，流入速度$\overline{v}$および流入深さyは次の2つの式で表わせる。

$$\overline{v} = \sqrt{\frac{\ell T \cos\theta}{6\eta} \cdot \frac{1}{t}} \qquad (5.6)$$

$$y = \sqrt{\frac{\ell T \cos\theta}{6\eta} \cdot t} \qquad (5.7)$$

但し，時間tはガラスを溶融させる場合の炉の一定温度における保時時間である。

上の（5.6）（5.7）式のうち，炉の温度，時間t，ガラスの粘度ηを一定にすると，接触角θが決まり，表面張力Tの値を得れば，任意のギャップ長ℓに対する流入速度$\overline{v}$，流入深さyの値が算出される。

4.2　実験方法

4.1に述べた流入速度$\overline{v}$，流入深さyの計算式を実験的に確かめるため，実際に各種のギャップ長を設定して流入深さを測定した。使用したフェライトの形状・寸法は図5.13のようである。またギャップ長ℓの設定は，10μmの場合パーマロイ箔，5μmはコンスタン箔を使用し，1μm以下については金属マスクを使って，接合面の一方にϕ0.6mmのAg蒸着を行い，干渉縞により蒸着膜の厚さを測定して用いた。

ガラスの表面張力に関するデータはなく，通常の測定法である液滴重量法，吊環法なども本実験では溶融状態における温度が高く，粘度が高いため困難なので，（5.5）式を次式のようにおきかえ　設定した1つのギャップ長（10μm）に対する実際の流入深さから逆算して，実験条件における表面張力とした。

$$T = \frac{6\overline{v}\eta y}{\ell \cos\theta} \qquad (5.8)$$

なお，接触角θについても，流入部の断面研摩試料を透過顕微鏡により撮影した写真か

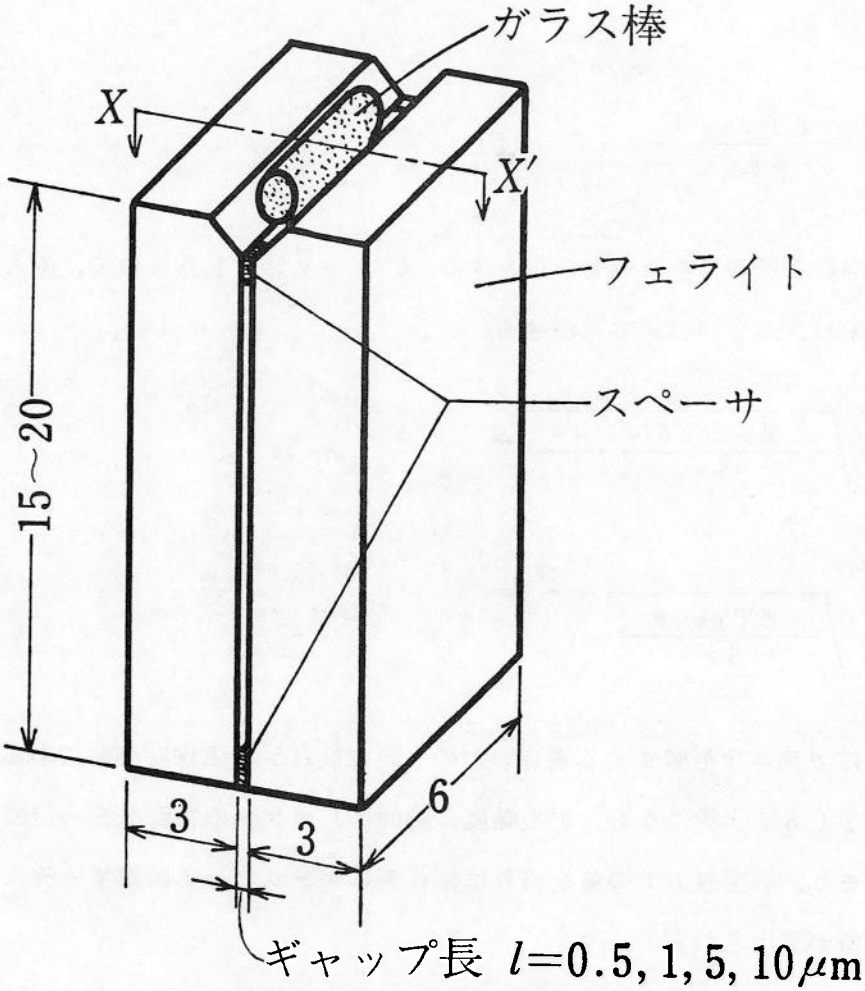


図 5.13　ガラス流入特性測定用実験試料

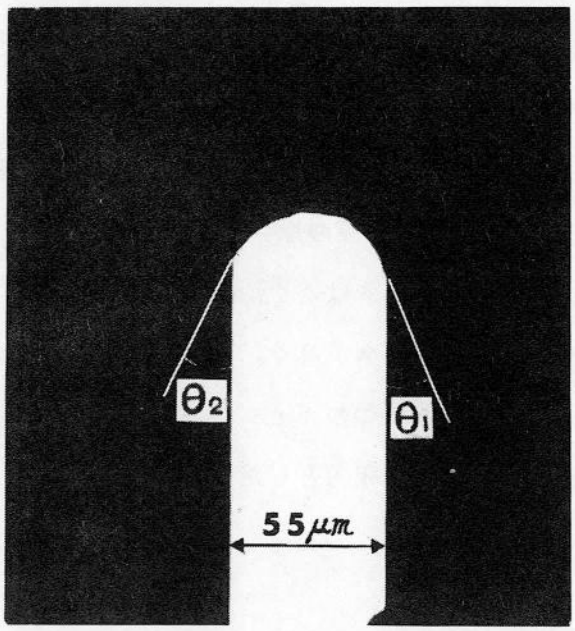
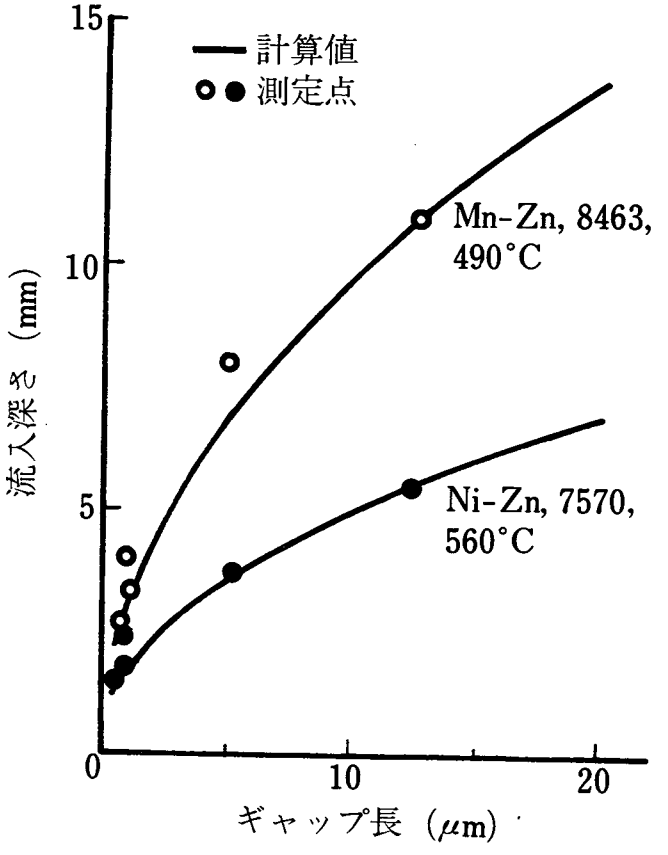
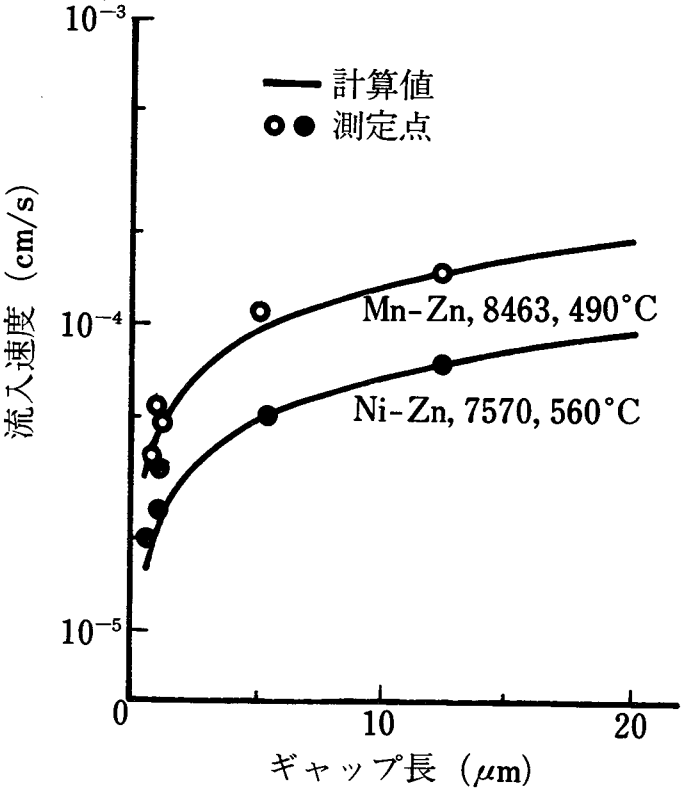


図 5.14　ガラス・フェライトの接触角測定（断面の透過顕微鏡写真）
（$\theta_1 + \theta_2$）・1／2



(a)　ギャップ長と流入深さとの関係



(b)　ギャップ長と流入速度との関係

図 5.15　フェライトギャップへのガラスの流入特性（計算値と実測値）

ら（図5.14）測定して用いた。実験に用いたフェライト，ガラス材料の特性およびガラスの溶融条件を表5.11に示す。炉温度の上昇速度は毎分8～11℃，下降速度は毎分3.5～4.5℃（炉温度の誤差±10℃）である。

表5.11　材料とガラスの溶解条件

		(1)	(2)	(3)
材料	フェライト	Mn－Zn	Ni－Zn	Mn－Zn
	熱膨張係数 α／℃	110×10^{-7}	90×10^{-7}	110×10^{-7}
	ガラス	8463	7570	8407
	熱膨張係数 α／℃	104×10^{-7}	84×10^{-7}	100×10^{-7}
ガラスの溶解条件	作業温度 (℃)	490	560	～760
	粘度 η(gf/cm·sec)	1×10^{4}	8.5×10^{3}	1×10^{4}
	流入時間 t (sec)	7200	〃	〃
固液界面の接触角 θ（度）		20	24	22

4.3　結果と考察

ギャップ長12.4μm，接着時間2時間における流入深さの実測値から計算したみかけの表面張力Tは，Mn－Zn，8463ガラスの490℃で8.7×10^{3}dyne/cm，Ni－Zn，7570ガラスの560℃で1.9×10^{3}dyne/cmである。また接触角θの測定値は表5.11の中に示した。これらの値を用いて（5.6）（5.7）式により，他の各ギャップ長に対する流入深さ，流入速度の計算値を表5.12の左欄に，また，実際の試料による測定値を右欄に示す。これらをギャップ長に対する流入深さと，流入速度の関係を表わしたのが図5.15である。図において実線が近似計算によるもので点標示が実測値である。これによると両者はほぼ一致し，本実験経過で示したごとく，一つのギャップ長に対してだけあらかじめ流入深さを測定して，みかけの表面張力，接触角を求めておけば，他のギャップ長は近似計算で推定ができることになる。また，この実験を通じて，4.2節に述べたフェライトとガラス間で相互拡散のほとんど生じない接着条件（作業温度）でも0.5μm程度の狭小ギャップにガラスが均一に流入することが確認された。

なお，作業温度で2時間保持した場合，ギャップ長0.1μmに対する流入深さは計算上，

Mn－Znと8463ガラスの組合せで1mm，Ni－Zn，7570ガラスの組合せで0.5mmとなる。0.5μm以下のギャップ長に対してはフェライト材料における気孔欠陥，被接着面の仕上げ面あらさ，表面に付着した油脂皮膜，接着剤等の異物の残留が流入深さに与える影響が大きい。

表5.12　計算値と実測値

材料	計算値			測定値			
	ギャップ幅ℓ $\times 10^{-4}$(cm)	流入深さy $\times 10^{-1}$(cm)	流入速度$\bar{v}$ (cm/sec)	ギャップ幅ℓ $\times 10^{-4}$(cm)	流入深さy $\times 10^{-1}$(cm)	流入速度$\bar{v}$ (cm/sec)	みかけの表面張力T (dyne/cm)
(1) Mn−Zn 8463	0.5	2.19	3.04×10^{-5}	0.69	2.7	3.8×10^{-5}	
	1.0	3.09	4.3 〃	0.9	4.0	5.6 〃	
	5.0	6.92	9.62 〃	4.9	8.1	1.1×10^{-4}	
	10.0	9.8	1.36×10^{-4}	12.4	11.0	1.5 〃	
	20.0	13.8	1.92 〃	16.8	12.0	1.5 〃	1.2×10^{6}
(2) Ni−Zn 7570	0.5	1.1	1.53×10^{-5}	0.44	1.5	2.1×10^{-5}	
	1.0	1.56	2.16 〃	0.9	1.8	2.5 〃	
	5.0	13.48	4.83 〃	1.0	2.5	3.5 〃	
	10.0	4.93	6.84 〃	5.3	3.7	5.1 〃	
	20.0	6.96	9.67 〃	12.4	5.5	7.6 〃	1.9×10^{5}
(3) Mn−Zn 8407	0.5	1.5	2.1 〃				
	1.0	2.2	3.0 〃				
	5.0	4.9	6.8 〃				
	10.0	6.9	9.6 〃	2.8	7.8	1.1×10^{-4}	4.3×10^{5}
	20.0	9.7	1.4×10^{-4}				

4.4　本節のまとめ

炉内で溶解させたガラスのフェライトギャップへの流入特性を検討した。非圧縮性粘性流体の2平面間の運動方程式をもとに，流入速度に関する近似計算式を導き，ガラスの表面張力，フェライトに対する接触角などのワンポイントデータを得ることによって各種のギャップ長に対する流入深さを計算できることを明らかにした。具体的にフェライト，ガラスの相互拡散をほとんど生じない接着条件においても0.5μm以下の狭小ガラスギャップ

を形成できることを計算と実験により明らかにした。

5. 本章の総括

磁気ヘッド用フェライトコアのギャップはガラス接着によって形成される。ガラスとフェライトの相互拡散層はフェライトの磁気特性を劣化させ，記録再生特性に悪影響を及ぼす。

各種ガラス・フェライト材料の組合せによるガラス接着で生ずる拡散層を物理分析と加工面観察，磁気特性により評価した。また狭小ギャップへのガラスの流入性について検討した。おもな結果は以下のとおりである。

(1) Mn－Zn系フェライトの粒界部へ低融点ガラスの主成分Pbが，選択的に拡散する現象がXMA分析の結果明らかになった。これは粒界部が転位や不純物など多数の欠陥が集積しており，拡散係数が高くなっているためと考えられる。

(2) Ni－Zn系フェライトでは熱的安定性が高く，Mn－Zn系に比べて粒界拡散も1桁小さい。

(3) 拡散深さを支配する大きな要因はガラス接着温度である。Mn－Znフェライトのガラス接着において，ガラスの泡切れ温度より100℃低い作業温度で接着すると拡散現象は認められない。

(4) 磁気コアの磁路内に拡散層を挿入し，拡散層を薄層ずつ研摩除去しながら磁気抵抗の変化を測定することによりガラス層およびフェライトの拡散層の磁気特性を直接測定した。Mn－Zn系フェライトにおける粒界拡散層の透磁率はもとの材料の1／400に低下し，フェライト粒子の析出したガラス層では透磁率が1.5～1.8に増大する。

(5) 拡散層を有するコアを実際のヘッドに組み込んで記録・再生特性から実効ギャップ長を評価した。Mn－Zn系フェライトでは光学的な測定によるギャップ長6.2μmに対して14％の拡大が確かめられた。この値は分析における粒界拡散層と対応している。

(6) ガラス接着時のフェライト・ガラスの相互拡散を抑制するため，接着温度を100℃下げるとガラスの粘度は2桁も増大する。粘度の増大に対して1μm以下の狭小ガラスギャップの形成可否を検討した。非圧縮性粘性流体の2平面間の運動方程式をもとに，流入速度に関する近似計算式を導き，実験結果と比較した。0.5μm以下の狭小ギャップの形成が可能であることが計算と実験により明らかになった。

参　考　文　献

501）三野満子，渡辺純二：精密機械44，6（1978）685

502）J. Watanabe, Y. Ueno et al：Proc. I. C. P. E.，（1974）Ⅱ－114

503）角井良治，岩沢　嵩ほか：昭和43年電通学会全国大会論文集S14（1968）12

504）菅谷　汎ほか：電通学会磁気記録研究会資料（1966）3・33

505）村山智一ほか：昭和46年精機学会春季大会前刷（1971）334

506）田上　正：実用新案公報　昭和48－11294

507）津田英俊：実用新案公報　昭和49－16737

508）角井良治ほか：昭和45年電気四学会連合大会論文集（1970）1973

509）岩沢　嵩，小原正晴：昭和45年電気四学会連合大会論文集（1970）321

510）三野満子ほか：昭和49年精機学会秋季大会前刷（1974）251

511）たとえば森田，成瀬編：ガラス工学ハンドブック，朝倉書店（1963）

512）たとえば高野：岩波講座基礎工学16，流体力学Ⅰ，Ⅱ，岩波書店

第6章　ＥＥＭの原理を利用した平面加工装置の開発

1. 緒　　言

フェライト結晶の加工によって形成される加工変質層は，磁気特性を低下させたり，フェライトとガラスの相互拡散を助長させる。またＬＳＩ用のＳｉ，ＧａＡｓ等半導体基板，光部品用誘電体結晶基板においても，加工変質層が，それぞれの電子部品の性能を劣化させる[601)~604)]。したがって，加工変質層の発生しない高精度の加工技術の開発が期待されている。

これまで，結晶基板の加工法としてタールピッチや錫，鉛などの軟質金属，ウレタンゴム，ポリウレタン不織布など樹脂を定盤として，１μｍ前後の微粒子を使ったポリシングが実行されてきた[605),606)]。これらの加工方法でも平面精度の高い，加工変質層の少ない加工面が得られている。しかしながら，ポリシヤ定盤の摩耗[607)]や圧力・温度による変形のため，再現性よく加工するのは困難である。また微粒子を被加工面に定盤面で押しつける機構であるため，異物や大径粒子の引っかき作用で深いスクラッチ痕が発生することもある。

森らは微細な粒子を被加工面に衝突させ，原子のオーダで弾性破壊的に加工するメカニズム（Elastic Emission Machining）を提唱した。そして，微粒子を懸濁させた液中でポリウレタン球を回転させて，粒子を水平に駆動し球の対向部分にあたる小面積ずつを完全に擾乱なしに加工している[608)]。大きな平面を加工する場合は球を走査し軌跡の重なりなどを制御する必要がある反面，工具摩耗という従来加工法における本質的な問題点がなく，加工能率の再現性も優れているため，曲面形状の加工も可能であるという有利さがある。また，粒子の作用も極く微小領域に限られ，被加工面に垂直な方向の力の作用が小さいので加工変質層も低減される。

加工変質層の低減に本質的に有効なＥＥＭの原理を応用し，かつ大きな平面まで同時に高精度に加工できる装置を検討した。平面加工物を浮上させるためには，平面ディスクと対向するテーパ・フラット面をもつ磁気ヘッドの相対関係を逆に配置することで達成できる。

円環状工具を放射状に分割し，各分割部を回転方向に微小角傾斜したテーパ面とフラット面に形成する。分割部の大きさは加工面に最小３個が対向するようにする。このような工具を加工液中で回転すると平面に浮力が作用し円板状加工物が浮上する。このとき，浮上すきまを通過する微粒子が加工面にほぼ水平に衝突して，極微小量を加工する。まず，特定の工具面形状に対して，流体運動方程式をもとに浮上力の分布を計算する。これをもとに被加工物の平面全体にわたって均一な浮上力を発生させる最適な工具面形状を設計・試作し，浮

上特性を測定して確認した。本加工法によりフェライトをはじめSi，GaAsの基板の加工に適用し，高精度，無擾乱の加工面を得た　。

本加工技術の特徴は加工物との接触・摩擦がないので，工具面摩耗や熱変形がなく，基準面が保持されて，高精度の平面を熟練技術なしに再現性よく得られること，微粒子が面上を水平に運動して加工するため，加工変質層がほとんど生じないことである　。

2. 装置設計

被加工物を安定に浮上させ，微粒子を駆動して研摩するため特殊な工具面形状を設計して用いた。本研究において，$\phi 3''$～$\phi 5''$の大直径半導体基板をも複数個同時に加工できること，被加工物の着脱，工具交換が容易なことも考慮して設計した。

2.1　工具面形状設計

円板状の被加工物を浮上させるために，動圧力発生の機構要素として，円周方向に緩く傾斜した面をもつ数個のパッドからなる動圧形のスラスト軸受が有効である。加工中はつねに被加工平面に少なくとも3個以上のパッド相当面を対向させて，安定な浮上形態とする必要がある。パッド形状としては加工の高能率化に適すると予想されるテーパ・フラット形を選択した。

図6.1は被加工平面に対向するテーパ・フラット形工具面の一断面である。このような形状のすべり軸受における静的浮上力の計算式は以下のように導出できる[611),612)]。

図6.2において，下側平板がx軸に平行に一定速度Uで動いており，層流状態を仮定すると，非圧縮性粘性流体の運動方程式は

$$\frac{dP}{dx} = \eta \frac{d^2 u}{dy^2} \qquad (6.1)$$

となる。ここでPは軸受面に作用するy方向の分圧力，ηは流体の粘度，uは流体のx方向の速度である。（6.1）式をyについて積分すると

$$\frac{dP}{dx}\frac{y^2}{2} = \eta u + Ay + B \qquad (6.2)$$

となる。ここでy＝hにおいてu＝0，y＝0においてu＝Uなる境界条件のもとに積分

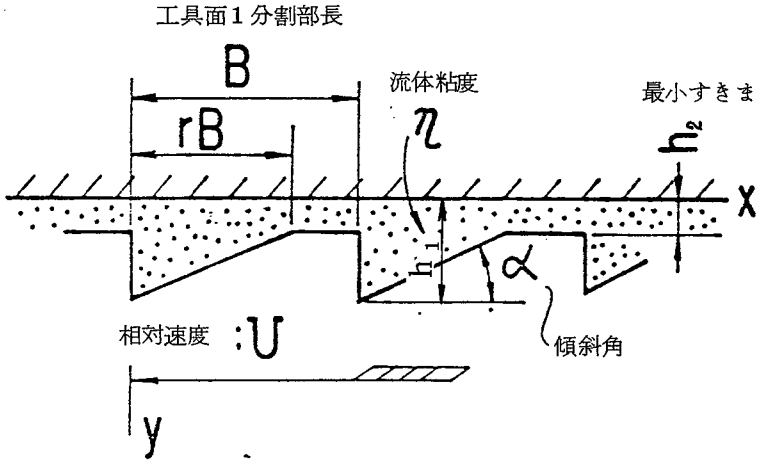


図 6.1　テーパ・フラット工具の断面

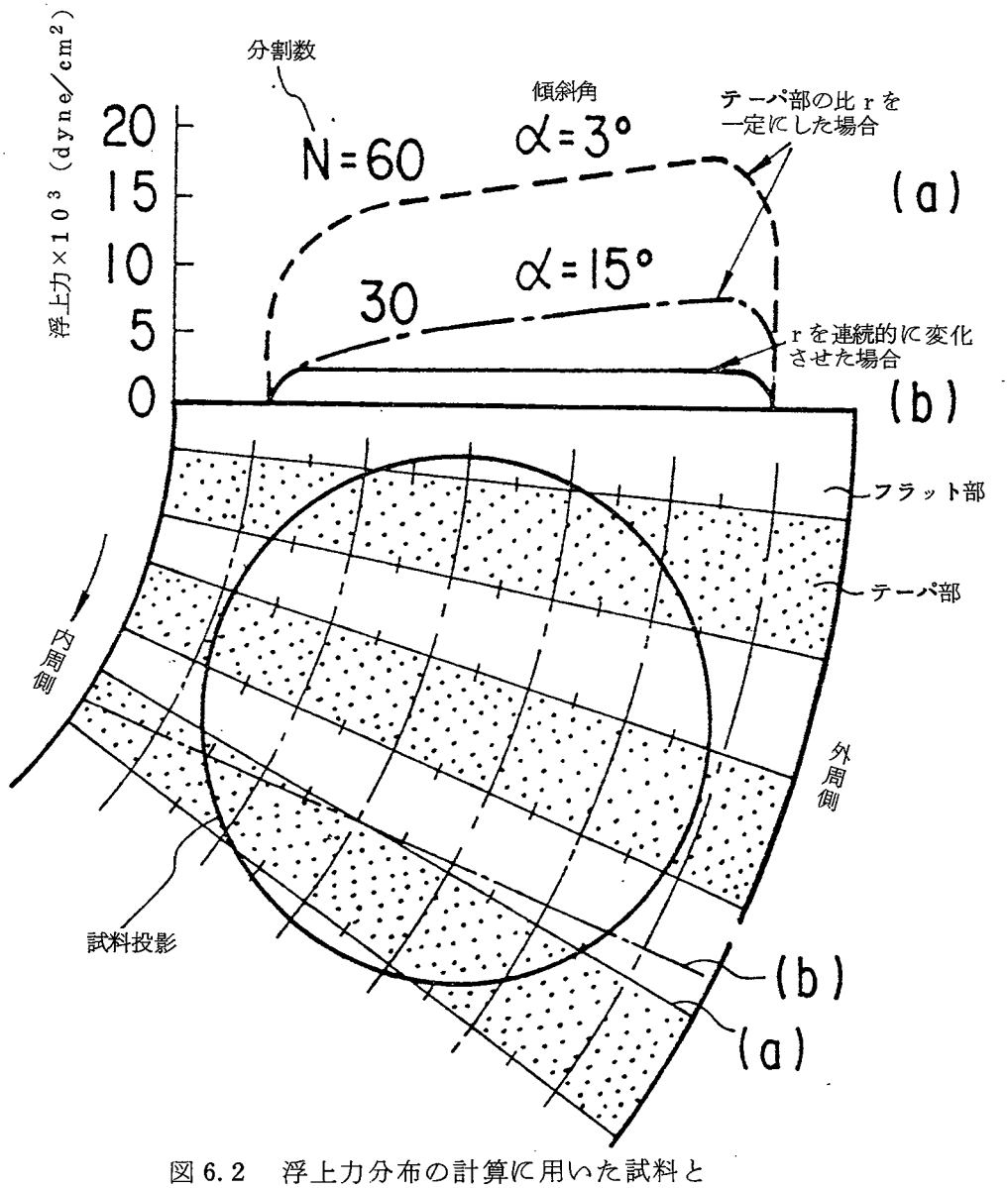


図 6.2　浮上力分布の計算に用いた試料と
工具面の相対配置（下）と計算結果（上）

定数A，Bを求めると（6.2）式は

$$u = \frac{1}{2\eta}\frac{dP}{dx}(y-h)y + U\left(1-\frac{y}{h}\right) \qquad (6.3)$$

となり，これはx点における流体の速度分布を示す。次にx点におけるすきまhを通して流れる液体の単位幅あたりの流量をQとすれば，

$$Q = \int_0^h u\,dy = \frac{Uh}{2} - \frac{h^3}{12\eta}\frac{dP}{dx} \qquad (6.4)$$

となり，これを変形して

$$\frac{dP}{dx} = \frac{6\eta U}{h^2} - \frac{12\eta Q}{h^3} \qquad (6.5)$$

を得る。ここで，図6.1より$0 \leqq x < rB$において，$h = h_1 - \alpha x$であり，この条件のもとに（6.5）式を積分して

$$P_1 = \frac{6\eta U}{\alpha(h_1-\alpha x)} - \frac{6\eta Q}{\alpha(h_1-\alpha x)^2} + C_1 \qquad (6.6)$$

となる。ここにrは1分割部長Bに対するテーパ部の比，αは工具形状の傾斜角，C_1は積分定数である。（6.6）式において，$x=0$で$P_1=0$，$x=rB$で$P_1=P$としてC_1，P，Qの関係式を得る。

一方，$rB \leqq x \leqq B$において$h=h_2$一定であるから，（6.5）式を積分して，

$$P_2 = \left(\frac{6\eta U}{h_2^2} - \frac{12\eta Q}{h_2^3}\right)x + C_2 \qquad (6.7)$$

を得る。（6.7）式において，$x=rB$で$P_2=P$，$x=B$において$P_2=0$を条件として，C_2，P，Qの関係式を得る。ここで無次元の浮上すきまとして，

$$b = \frac{rB\tan\alpha}{h_2} \fallingdotseq \frac{rB\alpha}{h_2} \qquad (6.8)$$

を考えると，

$$h_1 = h_2 (1+b) \tag{6.9}$$

となる。（6.8）（6.9）式を使い，C_1，C_2，P，Qの関係式から，各々を計算すると以下のようになる。

$$Q = \frac{h_2 (b+1)\{b(1-r)+1\}}{2(1-r)(b+1)^2 + r(b+2)} U \tag{6.10}$$

$$C_1 = \frac{6\eta UBr}{h_2^2 \cdot b} \frac{\{2b(1-r)+1\}}{\{2(1-r)(b+1)^2 + r(b+2)\}} \tag{6.11}$$

$$C_2 = \frac{6\eta UB}{h_2^2} \frac{rb}{\{2(1-r)(b+1)^2 + r(b+2)\}} \tag{6.12}$$

となり，静的負荷力の単位幅あたりの大きさW_Oは，

$$W_O = \int_O^B P dx = \int_O^{rB} P_1 dx + \int_{rB}^B P_2 dx \tag{6.13}$$

として求められ，幅Lの軸受に対しては

$$W = \frac{6\eta ULB^2}{h_2^2} K_W (r, b) \tag{6.14}$$

となる。ここに$K_W(r, b)$はウェッジ係数であり，

$$K_W(r, b) = \frac{r^2}{b^2} \ell_n (1+b) - \frac{2r^2}{b(b+2)}$$

$$+ \frac{br(1-r)}{2(1-r)(b+1)^2 + r(b+2)} \left(\frac{r}{b+2} + \frac{1-r}{2} \right) \tag{6.15}$$

と表わされる。

（6.14）式より，浮上力は相対速度，工具面形状に依存するため，工具の内周側と外周側では値に差が生じる。そこで図6.2の下部に示すように工具の内周部から外周部まで10等分に同心円で分割して各分割部のテーパ・フラット部による浮上力を計算した。仮に浮上すき間を一定とした場合の浮上力の分布は図6.2の上部に示したようになる。また，円周方向の放射状分割数およびテーパ部の傾斜角を変化させたときの浮上力の分布を図6.3に示す。このようにテーパ・フラット部の全長B（図6.1）に対するテーパ部の長さの比rが内周から外周まで一定の場合，内・外周の速度差分，およびBの大きさ分だけ外周側で浮上力が大きくなる。実際には，浮上力は内・外周側とも一定で釣合い状態となるため，対向面間の浮上すき間は内周側で小さく，外周側で大きくなる。すなわち被加工物が内周側へ傾いた状態で安定する。そこで，全面にわたって一定の浮上すき間を得るために，内・外周の速度差，形状寸法差に基づく浮上力差を矯正する必要がある。（6.14，6.15）式において，内外周の差はUとBとK_Wであって，UとBは外周側で共に大きくなる要因であり，浮上力の補正はウェッジ係数K_Wに依るほかない。（6.15）式よりK_Wの変化要因は傾斜角αおよびテーパ部比率rである。αを内外周で変化させるのは計算上では可能であっても実際に工具を製作するのは容易ではない。そこでテーパ部比率rを内周から外周までの間で連続的に変化させて浮上力を計算した結果を図6.2の実線で示した。この例ではrを0.35から0.78まで変化させると浮上力が一定になる。このような工具面形状のrを決めるには，K_Wとrの関係を予め計算して図表化しておくと，工具設計図表として用いることができる。図6.4～図6.5にテーパ部傾斜角αが5度の場合，浮上すきまを5μm～1μmに設定したときの工具分割部長さBをパラメータとしてK_Wとrの関係を示した。図に示されたBの値は工具内径ϕ160mm，外径ϕ360mmで有効バンド幅100mmの中央に$\phi 3''$の試料を置いたとき，10分割したバンドの内側から3番および8番目の分割部長さに相当する。放射状分割数は30，45，60，90の場合にあたる。この図を使って（6.14）式の変換式

$$K_W = \frac{h_2^2}{6\eta B} \cdot \frac{P}{U} \qquad (6.16)$$

より，P，U，h_2を決めて，被加工物全面でPを一定にし，K_Wを計算して該当するBの曲線との交点として逆にrを決めることができる。

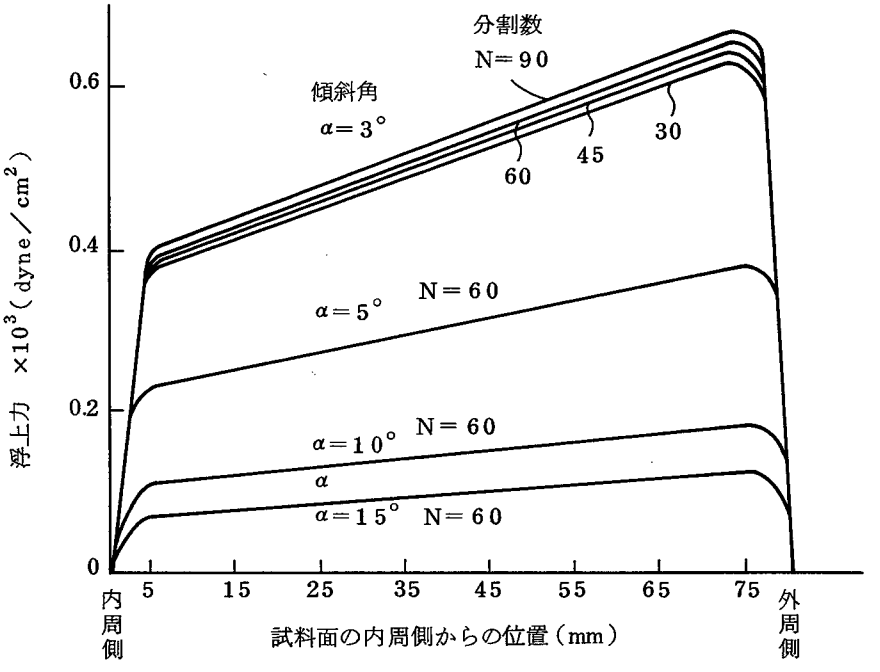


図 6.3　傾斜角 α の変化と浮上力分布（計算値）

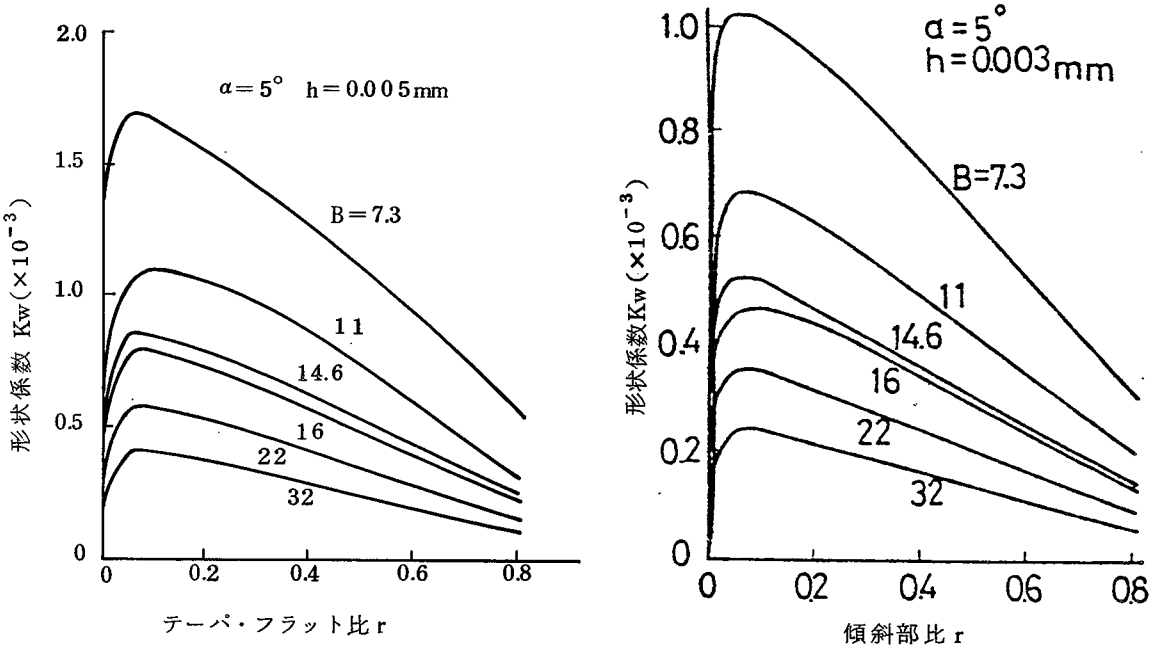


図 6.4　テーパ部長さの比 r と形状係数 K_W の関係（計算値）

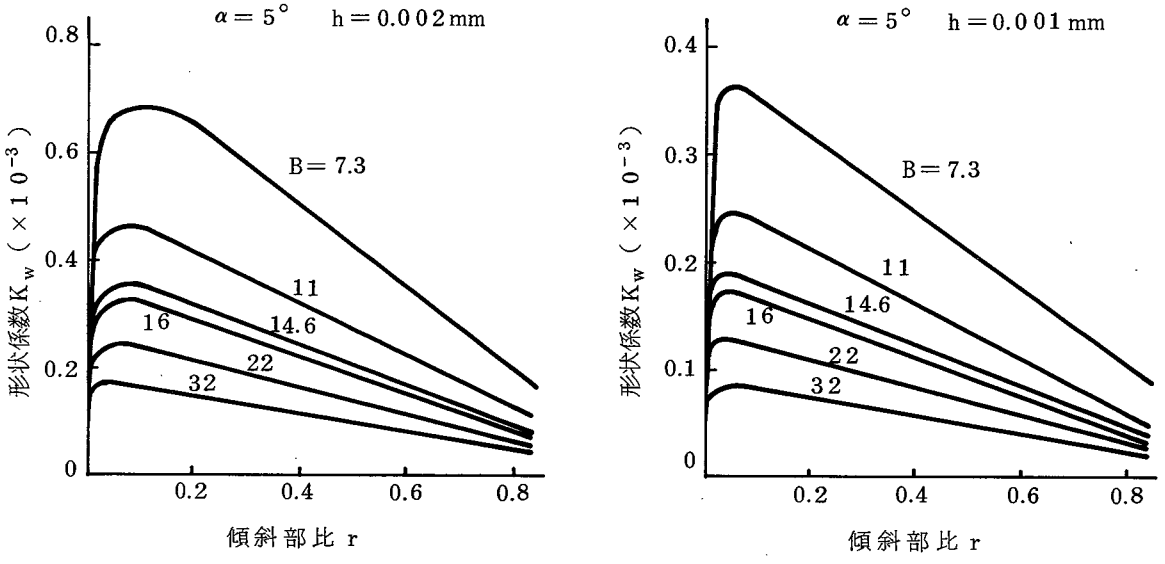


図 6.5　テーパ部長さの比 r と形状係数Kwの関係
（計算値）

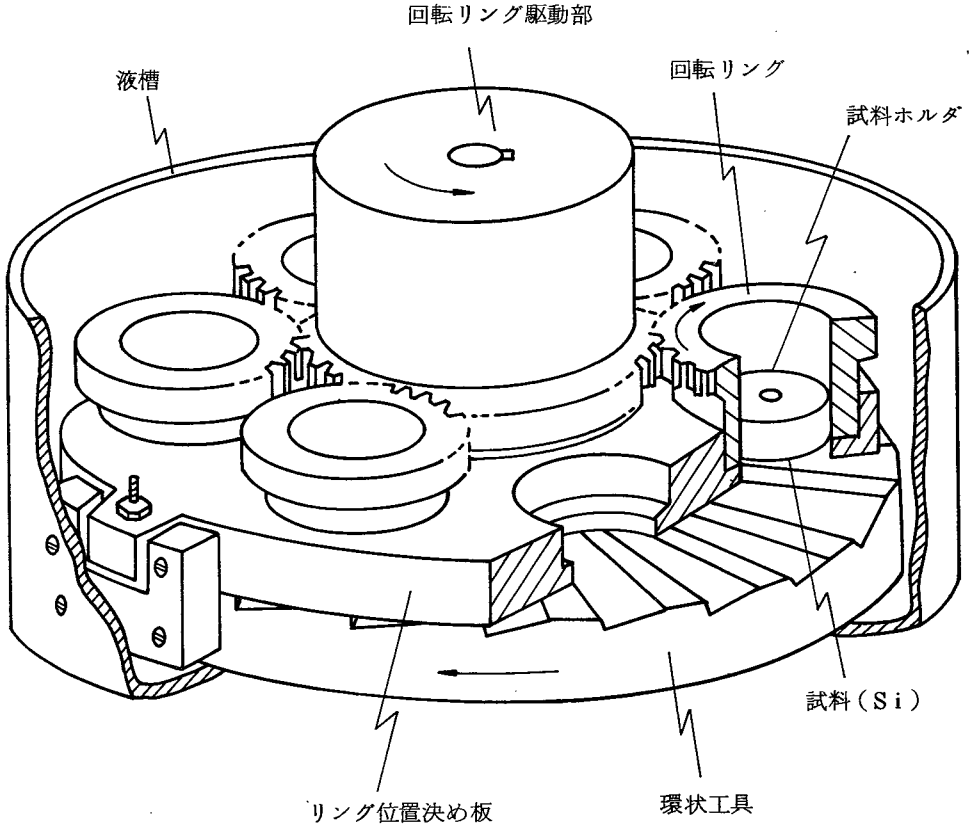


図 6.6　設計・試作した非接触加工装置の概略図

2.2　設計した装置

図6.6に設計した装置斜視図を，図6.7に槽内の写真を示す。表6.1に装置のおもな仕様を示す。設計に際しての基本的な考え方は，(1)ϕ3″程度の被加工物を同時に6枚加工可能である。(2)被加工物の着脱は工具との接触がおこらない。(3)被加工物は加工面に特定方向の流線軌跡を残さず，偏心した自転を行うよう摩擦リングを設ける。(4)リング位置決め板を持ち上げることにより，工具交換を容易にする。(5)加工液槽内側6箇所につい立状金具をとりつけ，工具回転によってつれ回る液が衝突し，攪拌を行う。(6)軸系は工具回転用，リング回転用の二重構造で，加工液の侵入は遮断する等々である。

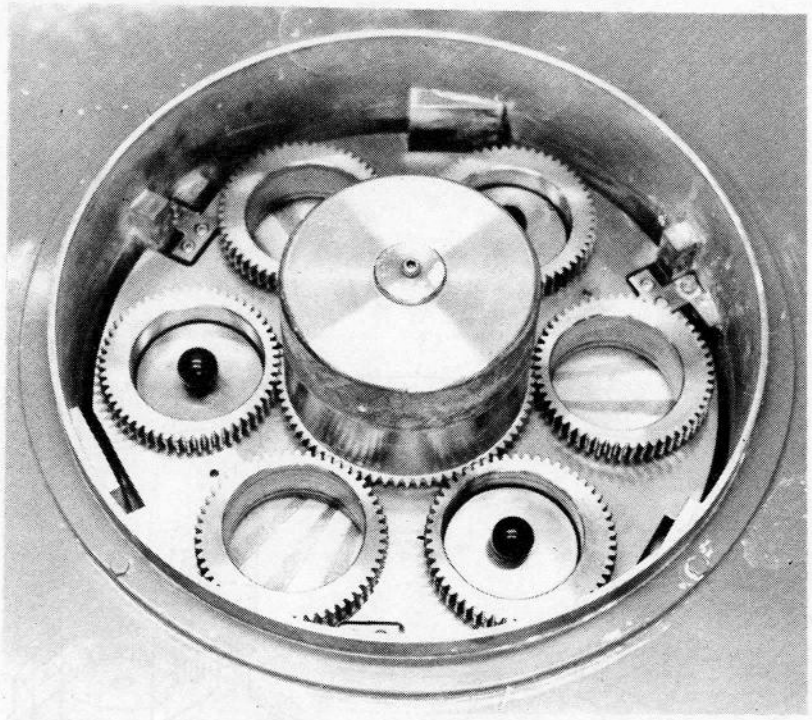


図6.7　試作した加工装置の内部

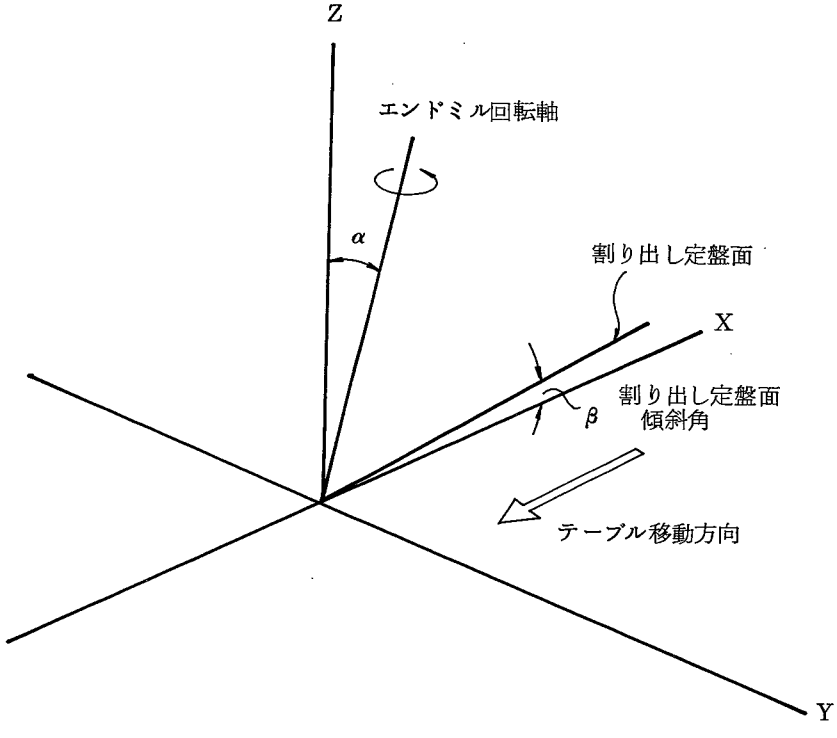
表6.1　試作した装置の仕様

定　盤　径	外径ϕ360mm，内径ϕ160mm
回　転　数	0～500rpm無段変速
加工物直径・数	最大径ϕ80mm×6個
加工液容量	約2000cc
そ　の　他	加工物偏心自転，液槽部，工具定盤部，加工物自転用歯車等耐食鋼

2.3　試作工具

(1)　工具材質　　工具材料の選択において考慮すべきことは，水分の浸透性が小さいこと，すなわち動圧力発生時液膜を保持すること，高周波の振動を吸収し，適度な弾性により微小な凹凸を変形により緩和すること，成形加工が容易で耐薬品性を有すること等でこれらは浮上特性に関係する。一方，加工能率を高くするには加工液と工具面間の相対すべりを少なくし，微粒子を有効に駆動させる。工具材質はウレタンゴム，塩ビ不織布，テフロン（コーティング膜），ステンレスとした。

(2)　工具面の形成法　　ポリウレタンゴムは厚さ3mm～5mmの板状のものをステンレス定盤に貼りつけ，エンドミルを使って成形加工した。工具形状における傾斜角αを一定にし，分割長Bに対するテーパ部の比rを内周から外周まで連続的に変化させ，放射状に等分割するために，図6.8に示すようにエンドミル軸をα度傾け，被加工工具円板を割り出し定盤に固定して，これをrの変化に応じた角度分βだけ傾斜させて加工した。

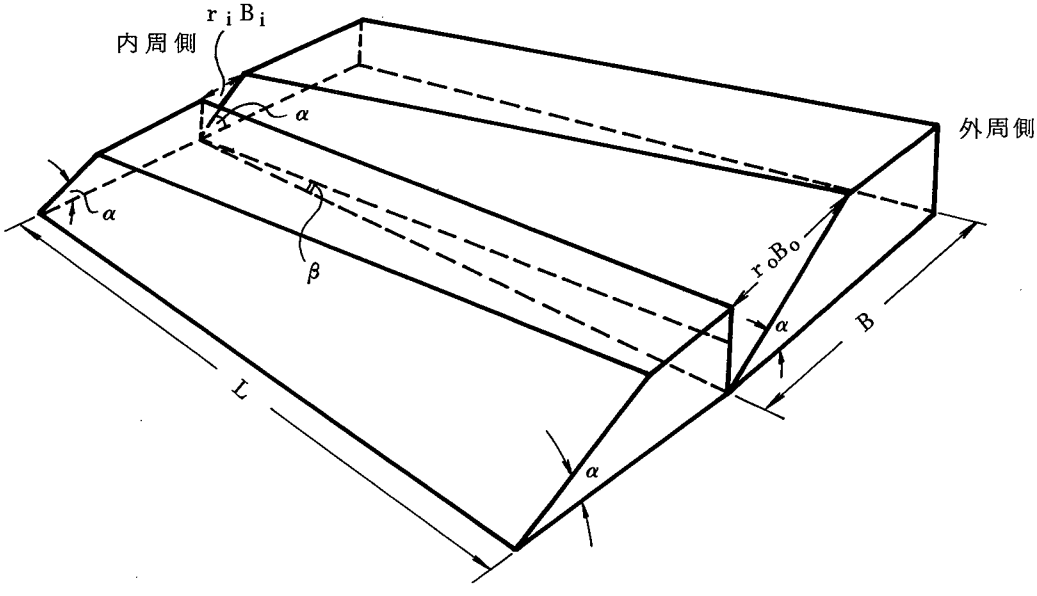


XY面	フライステーブル平面
X軸	テーブル移動方向
Z軸	通常フライス回転軸方向
α	回転軸傾斜角YZ面内

図6.8　工具面成形加工におけるエンドミル，被加工面，テーブル系の相対位置関係

例えばｒを0.3から0.6に変化させる場合，６０等分工具では図6.9のような幾何学的関係からβ＝0.32度傾けることになる。エンドミルによる成形加工後平面に整形するため，研削仕上げを行う。

一方，他の材質工具は直接成形加工できないので，所定形状に成形したステンレス定盤に貼りつけたり，テフロンの場合は被膜焼付けで形成した。



B：分割幅（B_i：内周側，B_o：外周側）
r：Bに対する傾斜部の比（r_i：内周側，r_o：外周側）
α：傾斜角　　β：工具面形成時の傾き角
L：工具幅

図6.9　試作工具面形状の１部
（$L\beta = r_o B_o \tan\alpha - r_i B_i \tan\alpha$）

3. 浮上特性

3.1 測　定　法

浮上すきまは，試料ホルダ上面に直接電気マイクロメータ端子をつけて測定した。まず，工具を１rpm以下にして，これを浮上零の基準とし，回転数を増加，減少させる過程で，各回転数に相当する浮上量の平均値を浮上すきまとした。測定点は工具回転方向の前後２点と工具の内・外周方向の２点の計４点である。円板状工具面の回転に伴う振れに対する試料面の追随性を検討するため，１回転あたりの面振れを１０μm以下にした場合と２５～３０μmに増大させたときの浮上すきまの変動も測定した。

3.2　浮上特性

図6.10に工具面形状におけるテーパ部の比率rを内周から外周まで0.3と一定にしたウレタンゴム工具に対する浮上すきま測定データを示す。すきまは外周側で大きく，内周側で小さい。一方，図6.11はrを内周側で0.35，外周側で0.78とし，連続的に変化させた場合の工具における，浮上すきまhと負荷Wの関係の計算値と実測値を示す。計算は（6.14）（6.15）式をもとに，$\phi 3''$ 被加工面あたり約40区画に分割し，各部に対する浮上力の合計より求めたものである。2～5μm付近の測定値と計算値はかなりよい一致を示している。また内・外周で計算を基に形状補正したため，浮上すきまはどの点においてもほぼ一定値を得ており，工具面形状設計の考え方，および形成法の妥当性が明らかになった。また，工具面が30μm前後の面振れを起こした場合にも，浮上すきまの変動は小さく（図6.12），液膜のバネ剛性が大きく，被加工面の工具面に対する追随性のよいことが明らかになった。一方，被加工物に載置する重錘が大きくなると，追随性は低下

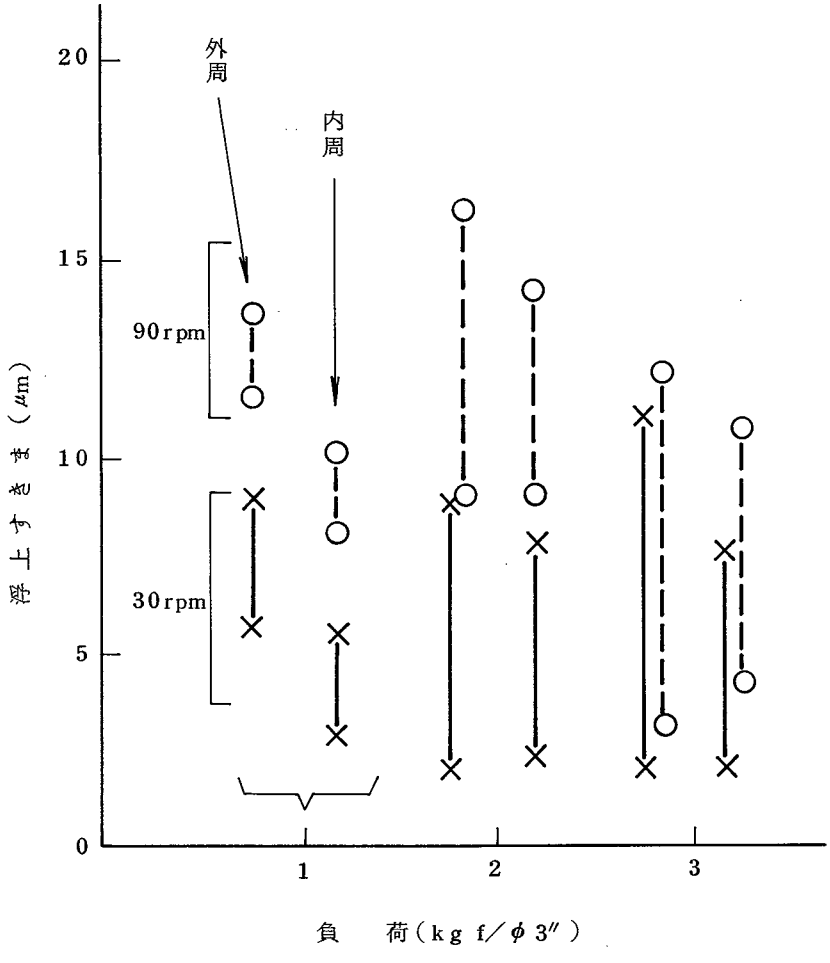


図6.10　負荷と浮上すきまの関係（傾斜部比率rが一定）

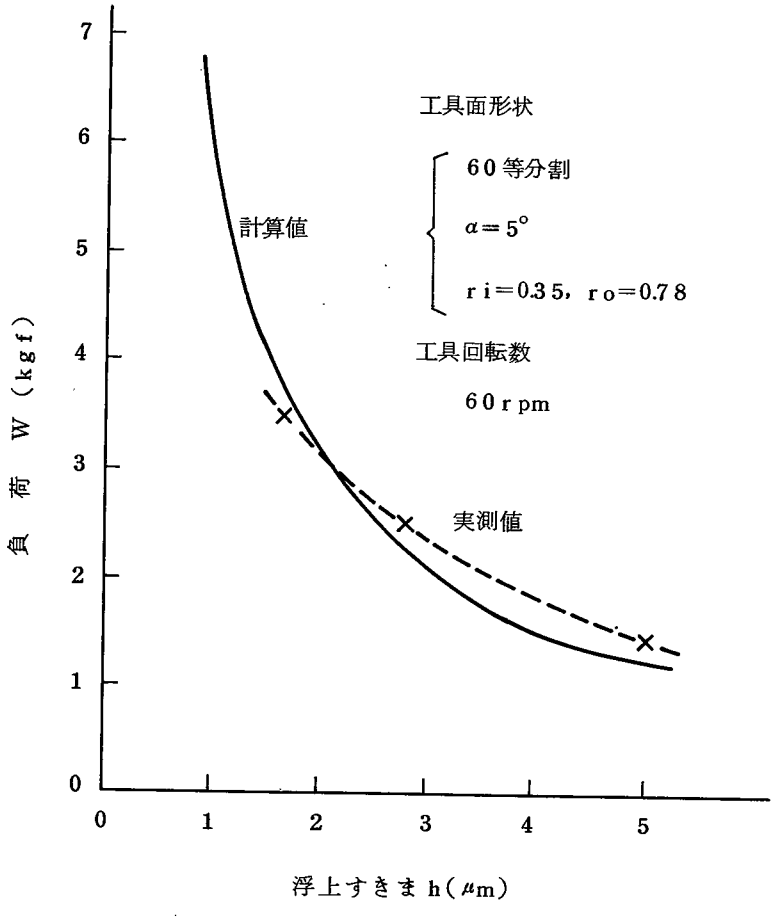


図 6.11　負荷と浮上すきまの関係

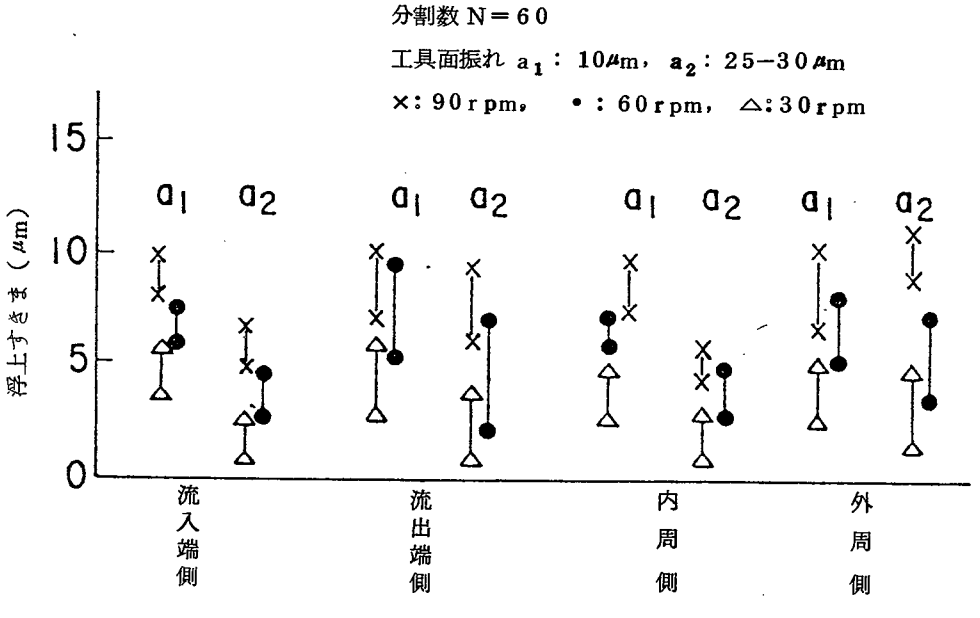


図 6.12　工具面振動に対する追随性

し，すきまの変動も大きくなる。この点に対しては，平行バネによる負荷法で解決できる。

工具材質の浮上特性に及ぼす影響は大きい。塩化ビニル系の不織布やポリエステル布を工具とした場合，浮上すきま測定値の再現性が低く，すきま変動も大きい。これは静止負荷時の変形が大きく，測定における零基準の設定ができないこと，液の浸透性があり，流水膜が保持できないため，安定した浮上力が得られないことによる。前述のごとく，ウレタンゴムでは安定した浮上特性を得ている。

4. 加工特性

前節までに設計した装置と工具を使って加工面の形状精度，加工した結晶面の加工変質層，加工能率などの特性を評価した。各特性の評価にあたって，円板状の被加工物に対する特性を得るため，半導体Si基板（表6.2に材料特性を示す）を使用し，加工変質層の評価では，フェライト単結晶のリング状トロイダルコアを加工してその磁気特性も把握した。

4.1 加工面の形状精度

工具面形状におけるテーパ部の比rを一定にして，分割数と回転数および負荷を変えると加工中の被加工物ホルダの傾き，（内外周の浮上すきまの差）が変えられる。図6.13に浮上すきまの差（H_0-H_i）と得られた加工面の平面度の関係を示す。両者は，ほぼ直線関係にあり，（H_0-H_i）を減少させることによって，平面度の向上が期待できる[613),614)]。図6.14は傾きのあるときの平面度の1例である。図6.15は均一安定浮上を目標として設計・試作した工具による加工面の時間による変化過程を示したものである。このときの加工条件を表6.3に示す。初期形状は，弗・硝酸混液でエッチした基板で，10μm以上の不規則な凸面形状をしているが，加工の進行にしたがって，平坦部が徐々に拡大され，最終加工面では，外周から3mmを除いて干渉縞1本以内，約0.3mm／φ3″の平面度を得ている。このように，初期の複雑な表面形状が徐々にではあるが確実に高い平面精度に加工されていくことが重要で，このことは初期形状に依存しないで再現性よく，最終面形状を得ることを示している。従来の接触研摩法では，工具面摩耗により形状が変化したり，非摩耗性工具を使った場合にも接触摩擦による温度上昇のため，工具基盤・試料貼付基板の熱変形によって平面度が変化することが多かったことから，本加工法の特徴が明らかになっている。図6.15における表面あらさの変化を図6.16に示す。最終的にはR_{max}10Å（＊タリステップ　縦倍率×10^6）前後となる。一方，接触式の研摩による場合，工具

表 6.2　Si 結晶の性質

結　晶　系*	ダイヤモンド構造 劈開面（111）（110） すべり面（111）
硬　さ	ヌープ1400，モース7
熱膨張係数	4.2×10^{-6}（1／deg）
従弾性係数 （kg／mm^2）	＜110＞ 1.74×10^4 ＜100＞ 1.33×10^4
ポアソン比	＜110＞ 0.063 ＜100＞ 28
融　点	1400℃
化学腐食液	KOH，NaOH（アルカリ系） HNO_3 ＋ HF （酸系）

＊　本実験で使用した基板（100），P型，比抵抗5～10Ω・cm

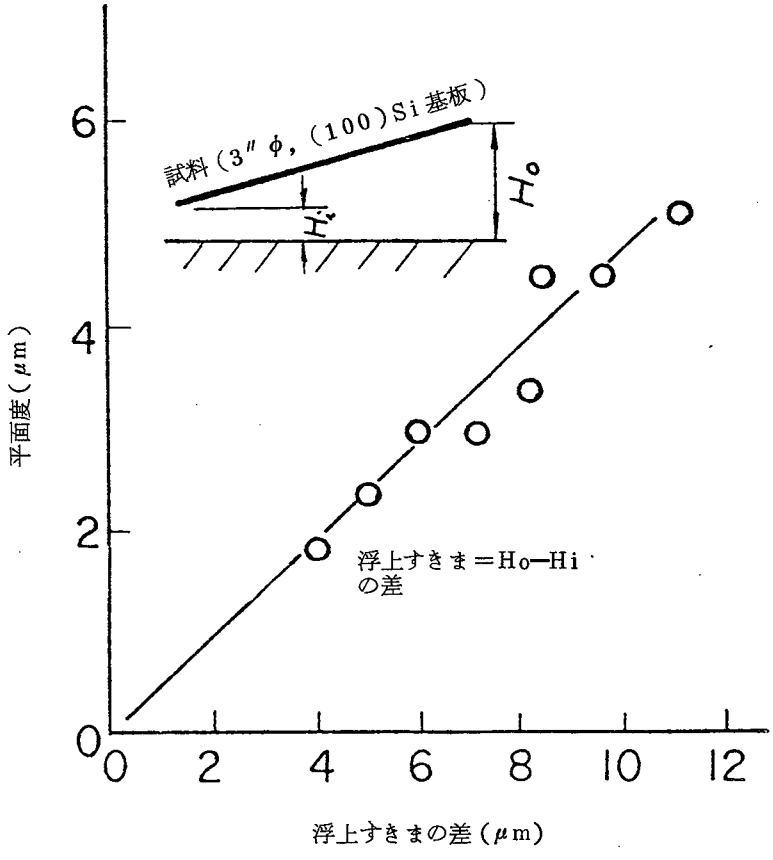


図 6.13　内・外周の浮上すきまの差と加工面の平面度の関係

摩耗や温度上昇のため，化学的研摩液を使った場合には，化学的溶去作用が強くなり，表面あらさもR_{max} 40Å以上になることがあり，熟練技術者による管理なしには再現性のよい高精度の研摩面が得にくい。[615)]

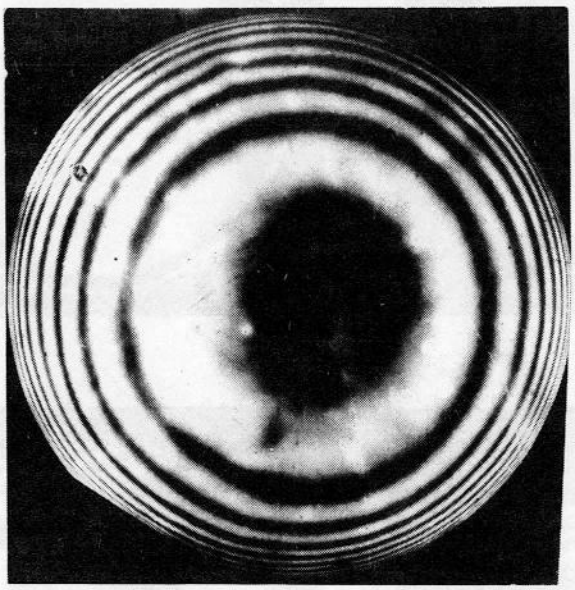


図6.14　内・外周の浮上すきまに4μmの差があるときのφ3″基板の平面度

表6.3　条　件

試　料	φ3″Si基板(100)，P型 5～10Ω・cm	
工　具	材　質	ポリウレタンゴム　硬度65
	形　状	分割数60，テーパ角5° 直径 φ360mm テーパ部比　内周0.35，外周0.78
ポリシ剤	粒　子	SiO_2 0.24μm(平均径) 濃度 5%(wt)，液PH12
条　件	工具回転数	60rpm
	試料自転数	15rpm
	圧　力	66×10^3(dyne/cm^2)

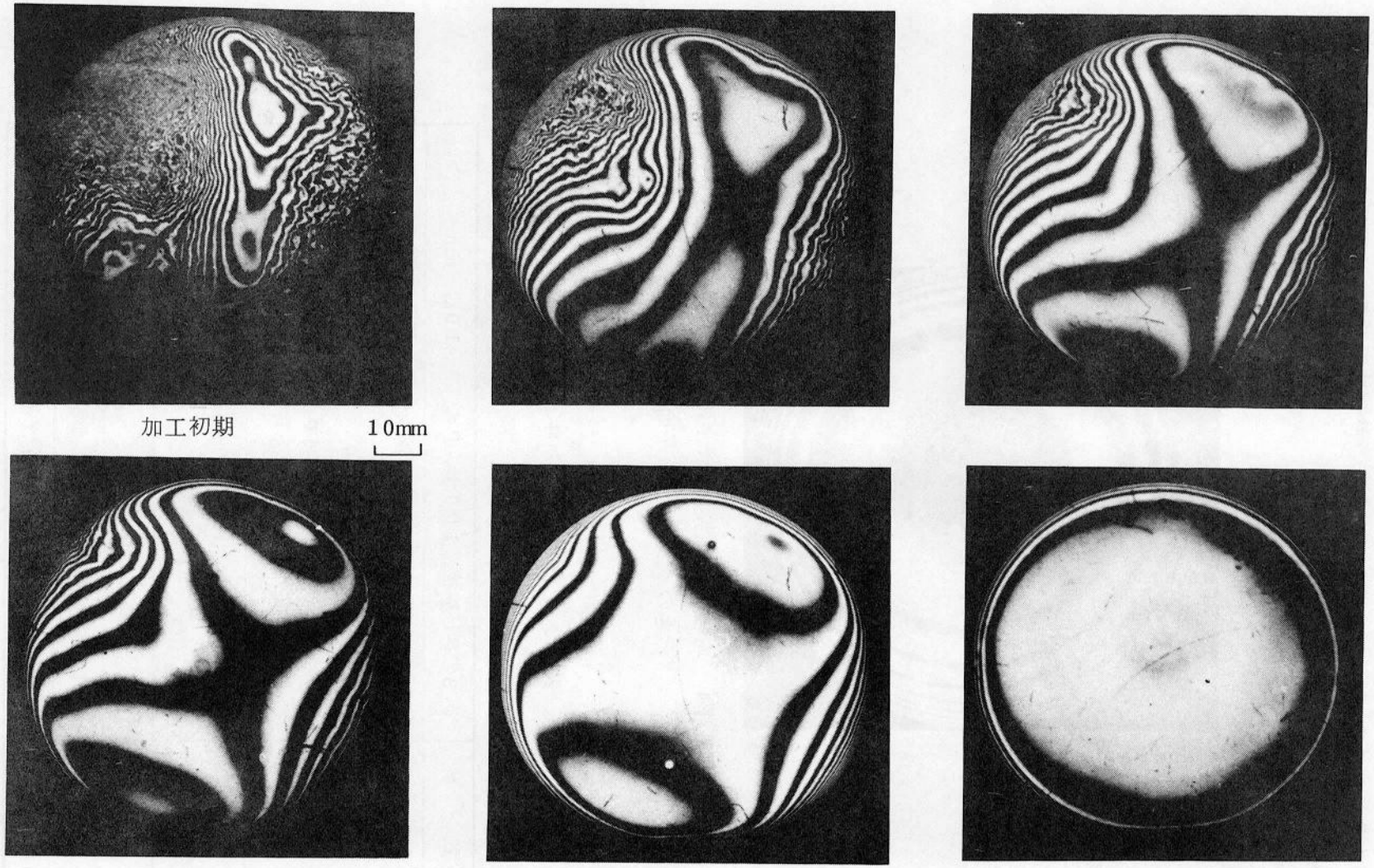
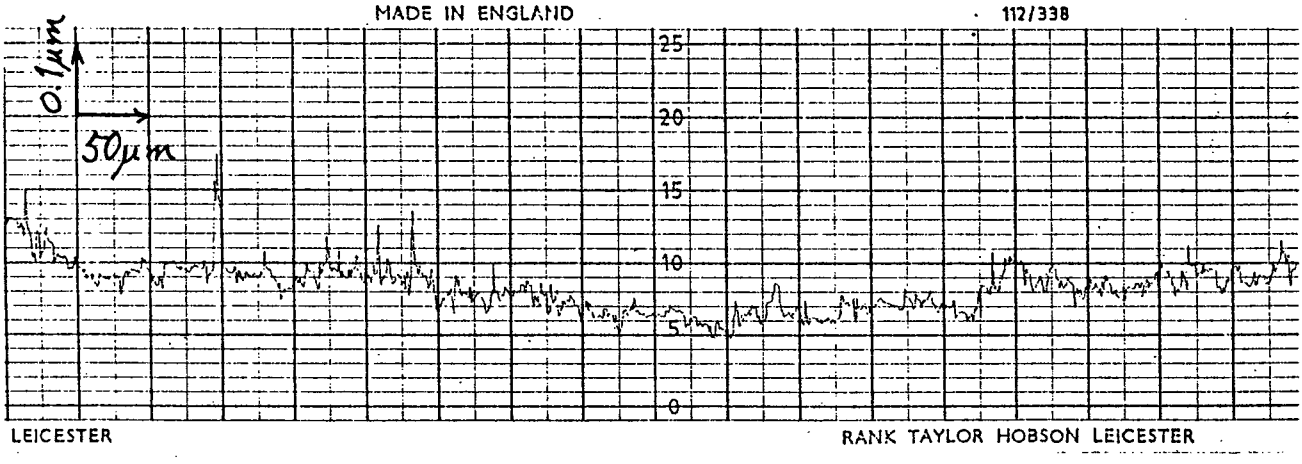
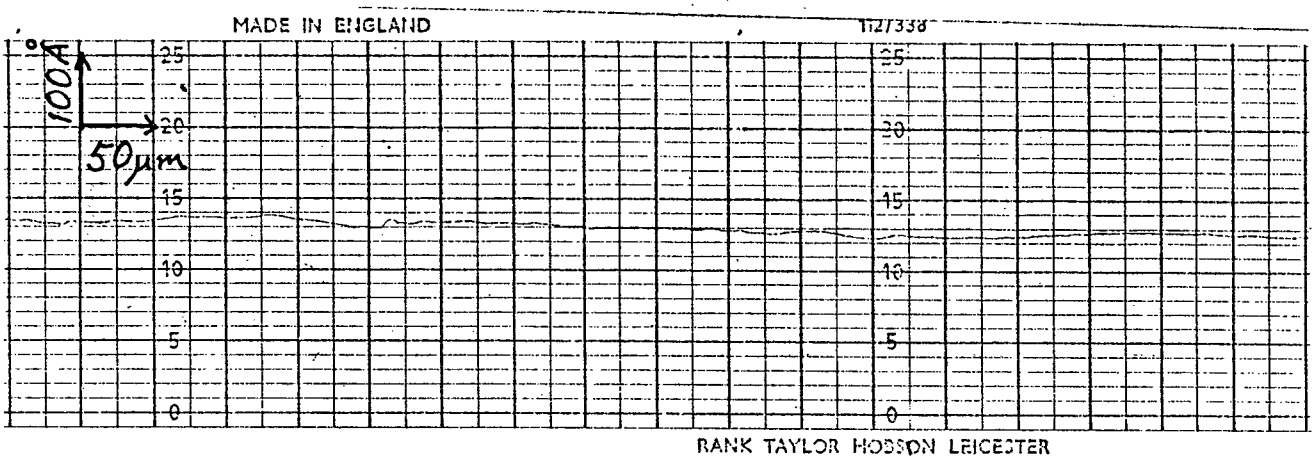


図6.15　加工過程における平面度の変化（内・外周の浮上すきま零に近い場合）

［工具　分割数60，テーパ部傾斜角5°
工具　材料ウレタンゴム（H：65），使用粒子SiO_2：0.24μm］



加工初期の表面あらさ



加工終了後の表面あらさ

図 6.16　加工中の表面あらさの変化
（図 6.15 に対応）

4.2　加工面の結晶性の評価

1）実験方法　Mn－Zn フェライト単結晶（100）薄板よりリング状のトロイダルコアを超音波加工により打抜き，巻線（ポリウレタン被覆線，線径 80 $\phi\mu$m，巻数 20 回）を施こし，15％ HCℓ 液中で，エッチングしながらベクトルインピーダンスメータによりインダクタンスとレジスタンスを測定した。超音波加工のひずみにより低下した透磁率が，元の材料値に回復するまでエッチングを行って，これを出発試験片とした。トロイダルコアの寸法形状は外径が ϕ 6 mm，内径が ϕ 4 mm，厚さは 0.4 mm と 0.2 mm である。この試験片を ϕ 3″ のホルダ中央に 2 個はりつけ，外側にこれを取り囲む形で，別の薄板フェライト単結晶をすきまなくはりつけた。このホルダを浮上させて，試作した加工機

により加工した。加工条件を表6.4に示す。こうしてコアの表裏面を研摩した後，加工面の電子回折像を観察し，さらに巻線を施こし，ベクトルインピーダンスメータにより透磁率を測定して元の材料値と比較した。

一方，Si基板に対しては弗・硝酸エッチしてひずみを除いた基板を同じくφ3″のホルダに貼りつけて加工した。条件は表6.3と同じである。Si基板に対しては電子回折像による評価と，熱酸化後の積層欠陥密度による評価[616]，および，基板上にショットキーダイオード[617]を形成し，その電流ー電圧特性により評価した。このため，同一条件で3枚の基板を加工した。また従来の接触式による研摩の特性と比較するため，$A\ell_2O_3$ 1μm，ZrO_2 0.1μmの微粒子による通常のポリシングを行った試料も作製した。

表6.4　加　工　条　件

試　　料	Mn－Zn系単結晶フェライト（100）面 初透磁率μ：4000（at 10kHz） トロイダルコア（外径6mm，内径4mm，厚さ0.4，0.2mm）	
ポリシ剤	粒　　子	酸化第二鉄（Fe_3O_4）
	液	粒子濃度5％（wt）PH ～4
条　　件	工具回転数	60rpm
	試料自転数	15rpm
	圧　　力	44×10^3（dyne／cm^2）

＊　工具材質，形状は表5.3と同じ

積層欠陥密度の検出法は，基板をwet O_2中で1100℃，2時間熱酸化し，表面に生成したSiO_2膜をエッチングで除去した後，欠陥検出用のWright液でエッチングして顕微鏡により積層欠陥密度を計数するものである。手法と条件を表6.5にまとめて示す。

一方，ショットキダイオードの作製では，まず基板裏面に電極金属を蒸着する。この場合オーミックコンタクトとするために，特に密着性に注意する必要があり，電子ビーム蒸着法を採用した。電子ビーム蒸着では，基板温度が300～400℃になることがあり，また表面側への金属付着による汚染が起こる可能性もあるので，加工前に裏面のみ

先に電極を形成した。加工後基板を洗浄し，表面側へのスポット状（ϕ2mm）電極形成には，極表層の結晶性も変化させないよう，通常の抵抗加熱法を用いた。測定法と条件を表6.6に示す。ダイオード特性の測定法を図6.17に示したポイントコンタクトにより，電流－電圧特性を測定した。

2）実験結果と考察

フェライト単結晶加工面の電子回折像を図6.18に示す。明瞭な菊池線が観察される。さらにトロイダルコアにより，透磁率の周波数特性を測定した。浮上式の加工法で加工したコアは元の材料の透磁率と全く一致しており，透磁率評価法でみるかぎり，ひずみ

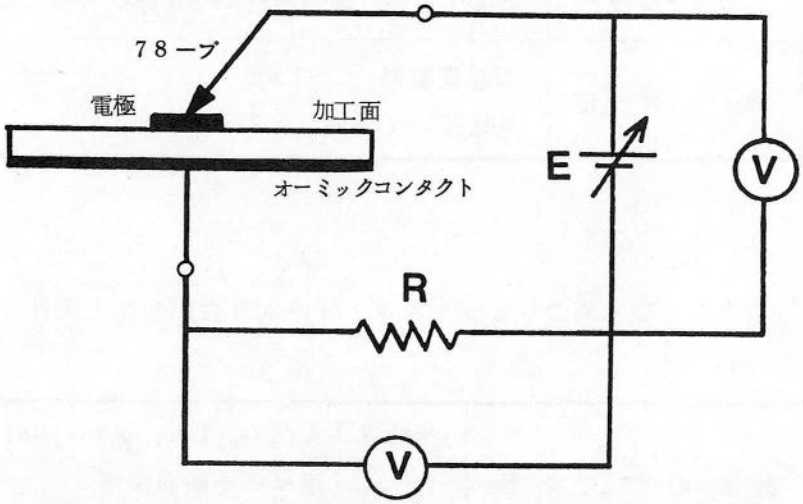


図6.17　ダイオード特性評価法

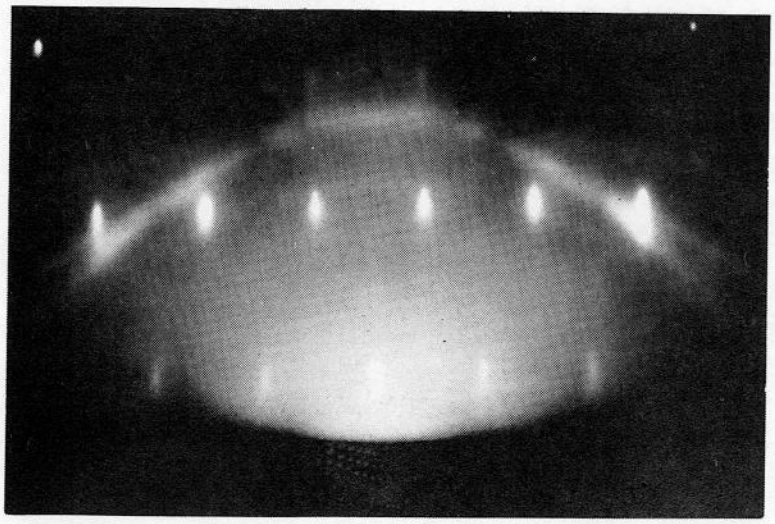


図6.18　Mn－Zn単結晶フェライト（100）面
加工面の電子回折像

表6.5　Si基板加工面の積層欠陥密度の評価工程と条件

1	基板洗浄	有機溶剤：トリクロルエチレン・アセトン 超純水　10分 界面活性剤（超音波）　10分 超純水　10分
2	熱酸化	温度：1100℃　時間：120分 雰囲気：ウェットO_2（90℃温水通し） 酸素ガス流量　1Sℓ／分
3	酸化膜剥離（エッチング）	HF：H_2O＝1：2（HF濃度46％） 時間15分，超純水洗浄20分
4	測定	顕微鏡観察（×100） 基板X，Y方向（2mm毎）

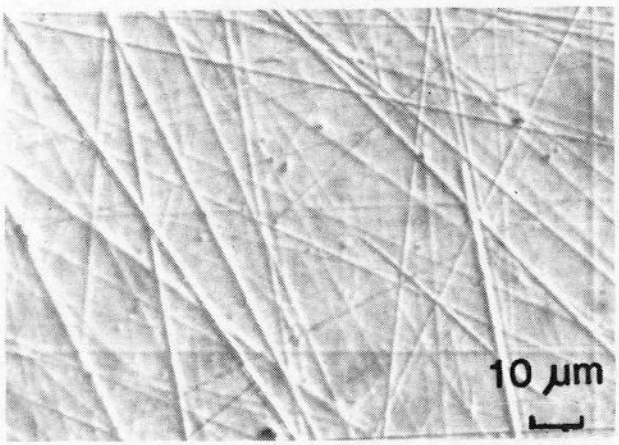
表6.6　加工面のショットキダイオード特性測定法と条件

試料の作成	基板の加工条件	接触式：$A\ell_2O_3$ 1μm，ZrO_2 0.1μm 塩ビ系不織布使用 浮上式：ZrO_2 0.1μm，ポリウレタンゴム
	裏面電極の形成（オーミックコンタクト）	第一層　Ti 500Å 第二層　Au 2000Å 電子ビーム蒸着法（基板温度300℃以下）
	表面電極の形成（ショットキコンタクト）	直径　2mm　Aℓ電極 厚さ　～1000Å メタルマスク使用，抵抗加熱蒸着
測定	装置	V－I特性測定用プローブ
	条件	室温，ピンプローブ接触，電圧変化

はほとんどないことが明らかである。一方，同じ微粒子と工具で，接触式の研摩を行ったコアについてはわずかに透磁率の低下がみられるが，顕著な差はない。第4章において，透磁率が構造敏感特性であり，ひずみに対する感度が高い状態を明らかにしたが，100Å以下の極薄層の加工変質層の影響は検出し難いことがわかる。

そこで加工ひずみによる影響が生じやすい半導体Si結晶をとりあげその加工特性を明らかにした。図6.19は塩ビ不織布を工具面とし，SiO_2粒径1～3μmにより接触式と浮上式（非接触）で加工した表面の比較写真である。接触式の場合の明確な条痕に比べ，非接触式では顕微鏡的にみた引っかき痕は観察されない。また電子回折像では，接触式において，ハロー像しかみられないのに対して，非接触法では，明瞭な菊池線がみえる。（図6.20）しかしながら，積層欠陥密度の検出法によれば，図6.21のようにSiO_2粒径の1～3μmによって非接触加工した表面についても10^3個／cm^2の積層欠陥が検出される。電子回折法と比べて本評価法の感度が高いことが明らかである。次にSi基板に対して，ウレタンゴムを工具として，工具面形状も均一安定浮上するよう設計・試作して使用し，SiO_2粒径を0.24μmとすると，積層欠陥密度は10個／cm^2以下とほぼ無ひずみの加工面を得ている。これは同じ工具材料と粒子で接触式で研摩した場合の密度200～500個／cm^2に比べて1桁以上の差になることが明らかになった。

図6.22に3種の条件で加工したSi基板上に形成したダイオードにおける逆方向電流－電圧特性を示す。正常な半導体表面と金属との接触によって電位障壁（ショットキバ



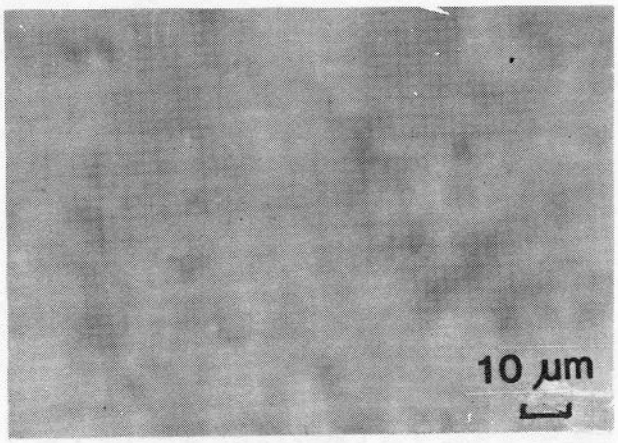


図6.19　研摩面の顕微鏡観察
工具：塩ビ系不織布
粒子：SiO_2（平均粒径1～3μm）

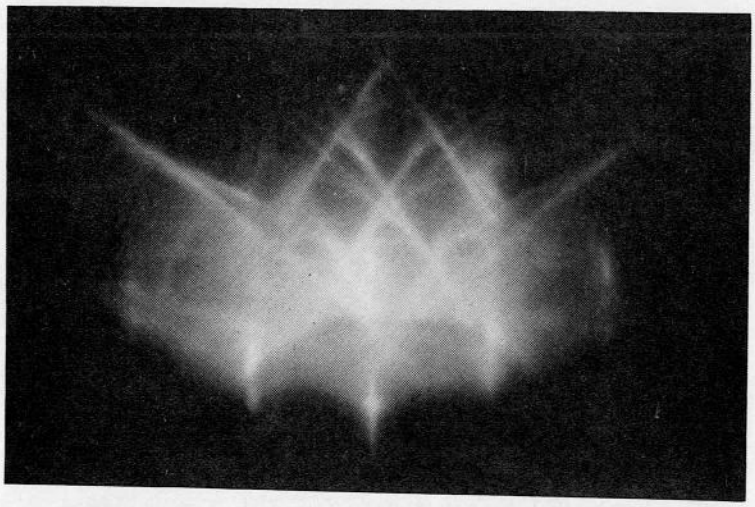


図6.20　浮上式研摩面（図5.20）の電子回折像

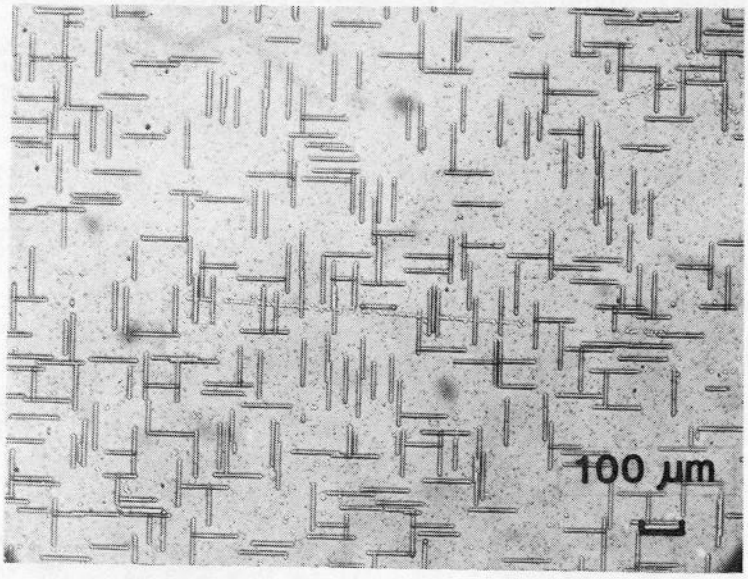


図6.21　浮上式研摩面（図5.20）の積層欠陥密度

リア）を生じ，電圧－電流特性はダイオードの特性を示す。しかし，半導体表面に欠陥や結晶構造上の乱れがあると，正常な障壁が形成されず，逆方向に漏れ電流を発生することになる。図6.22において，0.1μm　ZrO_2により非接触加工した基板による素子は逆方向の漏れはないが，同条件で接触法により研摩した基板によるものでは，正常なダイオード特性を示さず，特に$A\ell_2O_3$　1μm粒子で加工した基板において，顕著な漏れ電流が発生している。なお，これらの基板に対して熱酸化による積層欠陥密度を評価するとZrO_2粒子による非接触式の加工面で10個／cm^2以下，接触式では10^3個／cm^2のオーダであり，$A\ell_2O_3$粒子の場合多数のスクラッチが発生しており，欠陥密度

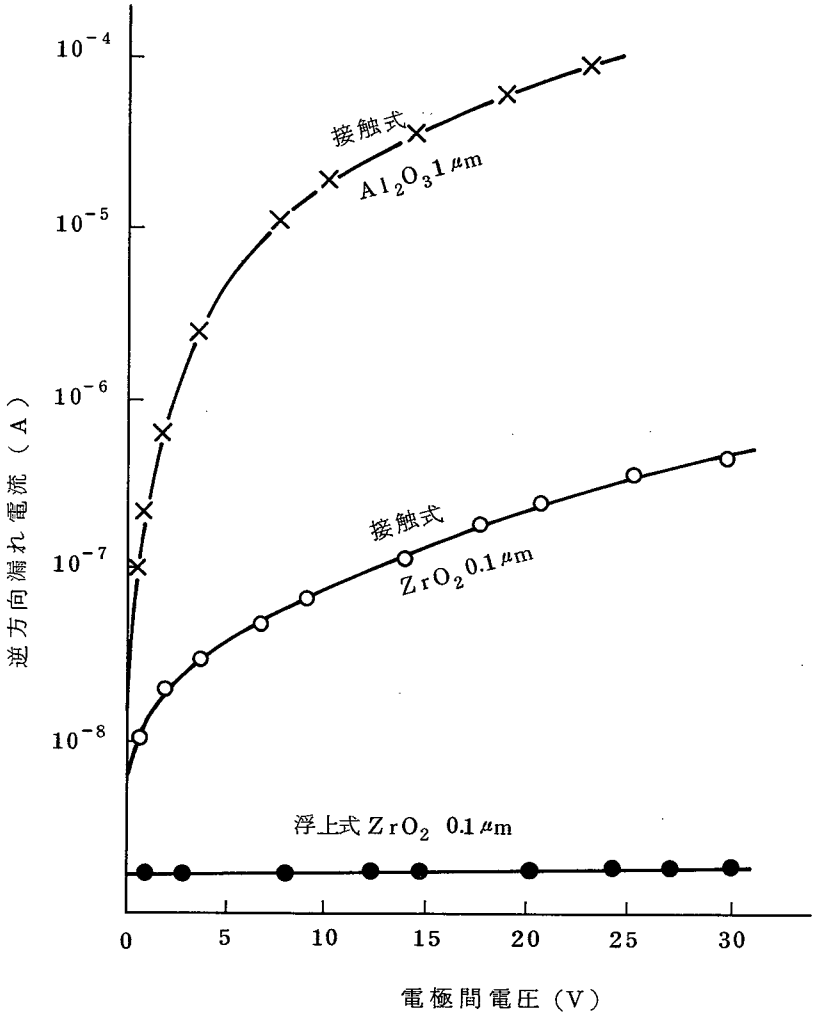


図 6.22　各種加工面に形成したショットキダイオードの特性

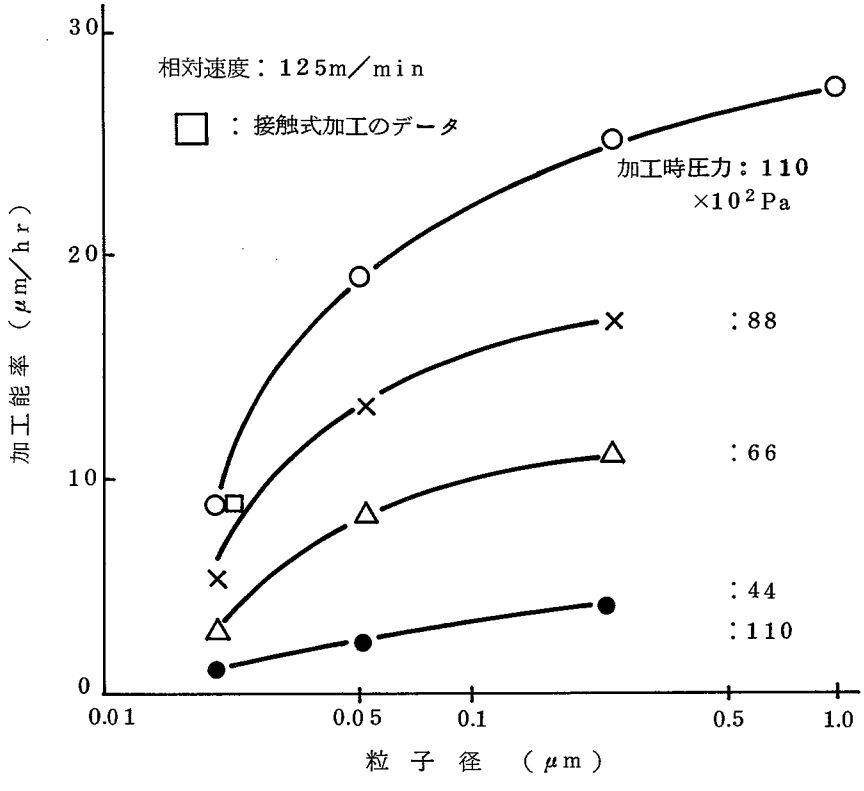


図 6.23　浮上式加工における能率（塩ビ不織布工具）

の積算は不能である。

以上のようにフェライト結晶における磁気的特性よりもさらに加工ひずみに対して敏感なSi半導体に対しても，その加工ひずみを検出し得ない高品質の仕上げ面を得ることができる。

4.3 加工能率

図6.23は使用粒子径と負荷を変化させたときの加工能率の一例である。工具面は塩ビ系の不織布をテーパ・フラット形に加工したステンレス基盤上に貼付したものである。負荷を増加して浮上すきまを減少させると能率が向上する。これは被加工面と工具面間隔の減少により，流体の速度勾配が大きくなり，平行流に近づくことにより，微粒子と被加工面間の相対運動が促進されるとともに，被加工面への作用粒子数も増大するために加工量が増加することになる。負荷その他の条件を同じにして工具回転数を増やすと加工能率は減少する傾向にある。これは（6.14）式からも判断できるように流速の増大により浮上すきまが拡がるので，上述と逆の結果となっている。したがって本方式による加工の能率に対しては粒子の運動エネルギを増大しても効果は少なく，むしろ，被加工面に対して相対運動する粒子数を増大させることにより，向上することになる。したがって本加工法において，テーパ，フラット工具におけるフラット部を安定浮上を得る範囲で広くとることにより，平行流となる距離を増大させると，加工能率は向上する。

非含水性のウレタンゴム工具による加工能率は，負荷1～3kg（圧力20gf／cm^2～70gf／cm^2）で0.6μm～1μm／hrと非常に低い。さらに弾性変形の少ないテフロン膜を焼付けた工具，ステンレスの工具では加工がほとんど進行しない。このように工具材質によって加工能率に大きな差がある。微粒子が被加工面に一定の圧力で押しつけられ，加工面の極表層の微小域に原子オーダの変形を及ぼし，粒子の運動に伴って変形部が剝離させられ，除去が進行するという定性的なモデルを考えると，加工能率に影響する直接の要因は単一微粒子に対しては，粒子の被加工面への押しつけ力，相対運動の距離である。ウレタンゴムのような高弾性，非含水性工具では，流体膜が保持され，浮上すきまが一定で大きく，粒子の被加工面への作用力が小さくなる。一方，塩ビ系の不織布等含水性工具では流体膜の保持作用が少なく，工具表面からの実質浮上量が小さいため，繊維の一部は接触状態に近い。このため，工具面に保持された微粒子が被加工面に強く押しつけられ，さらに工具と共に被加工面と摺動するため，加工能率に大差がでるものと推定される。

5. 本章の総括

流体によって運動エネルギを与えられた微粒子が加工面に沿って相対移動するとき，加工面の極微少量を除去するＥＥＭの原理をもとに，大面積の平面を同時に加工できる新しい加工法を実現した。その研究過程と結果をまとめると以下のとおりである。

(1) 平面加工物を定盤面に対して浮上させるため，定盤面の形状を設計した。回転方向に傾斜するテーパ面とフラット面の組合せを１つの分割要素とし，これによって発生する浮上力を非圧縮性粘性流体の運動方程式をもとに計算した。

(2) 円形定盤の内・外周の速度差・形状差を補正して，被加工面全面に均一な浮上力を発生させる定盤形状が設計でき，単純な加工法によって製作できた。

(3) 微粒子を混入した加工液中で定盤を回転させることにより，直径ϕ８０mmの被加工物を数μmの均一なすきまを保って安定に浮上させることができた。定盤面が回転ごとに３０μm前後の振れを有しても良好な追随性を示した。

(4) 本装置を使って加工したϕ８０mm円板試料の平面度は0.3μm以内であり，定盤面の摩耗がなく，安定した加工条件の設定ができるため，再現性よく加工できた。

(5) Mn－Znフェライト単結晶のトロイダルコアを加工し，その透磁率を測定したところ，元の材料特性を示し，加工変質層による低下はなかった。

(6) フェライト結晶よりさらに加工歪に敏感な半導体Si結晶を加工した結果，積層欠陥密度は１０個／cm^2以下と無ひずみに近く，加工面に形成したショットキダイオードの特性もリーク電流のない良好な特性を示した。

(7) 加工液に被加工物の化学エッチ用薬品を混ぜることにより，微粒子の機械作用と化学作用の複合効果で高能率で加工変質層のない高精度な加工面を得た。

参　考　文　献

601）森　勇蔵ほか：高精度，6－1（1975）22

602）S. Nanba ,M Kawabe et al ：J. Vac. Sci.Technol.,12, 6(1975)1348

603）A. Taloni and W. J. Rogers：Surface Science, 19(1970)371

604）河西敏雄，野田寿一ほか：通研実報，20, 4(1971)915

605）上野嘉之ほか：昭和47年精機学会春季大会前刷（1972）335

606）唐木俊郎ほか：精密機械，46, 3（1980）331

607）宇根篤暢ほか：精密機械，48, 3（1982）341

608）森　勇蔵：精密機械，46,（1980）659

609）大平文和ほか：昭和56年精機学会春季大会前刷（1981）771

610）渡辺純二・鈴木淳平：精密機械，49, 5（1983）655

611）O. Pinkos and B. Sternlight：Theory of Hydrodynamic Lubrication, McGraw-Hill（1961）63

612）M. C. Shaw and E. F. Macks：Analysis and Lubrication of Bearings, McGraw-Hill（1949）314

613）鈴木淳平・渡辺純二：昭和52年精機学会秋季大会前刷（1977）213

614）渡辺純二・鈴木淳平：昭和54年精機学会秋季大会前刷（1979）497

615）飯山重幸ほか：精密機械，36，6（1970）375

616）C. J. Varker et al：J. Appl. Phys., 45（1974）272

617）たとえば半導体ハンドブック編纂委員会：半導体ハンドブック，（1977）32

第7章　磁気ヘッドの製作に必要な加工技術

1. 緒　　言

前章までに，フェライトの高精度無ひずみの加工技術，ガラス接着による構成技術など基本技術についての研究内容を述べた。磁気ヘッドを製作するには，実際のヘッド形状に加工する技術およびヘッド特有の材料構成によって生ずる加工技術上の課題がある。本章ではこれらのヘッド製作工程で必要とされる種々の技術の検討結果をまとめて述べる。

フェライト単体コアはコイル巻線用にコの字形状をとるものが多い。また，スライダとコアをすべてフェライトで形成したモノリシックヘッドでは，スライダ浮上面およびコアの記録再生幅は狭幅化研削によって決められる。[101] これらの加工には形状研削技術が必要である。[701]

ヘッドのスライダ面は磁気ドラムのような円筒面に対向するものは平面が多いが，磁気ディスクのように平面に対向するものでは，逆に円筒面や球面を呈することがあり，浮上面の形状加工技術が必要である。さらに浮上面はドラム用ヘッドのようにフェライト単体コアを積層して多トラック化したものでは，フェライトコア間の漏えい磁束をシールドするため銅等金属板が挿入されてあり，フェライト，スライダ用セラミック，銅等加工特性の異なる構成材料を同一平面に加工する技術も必要である。[702] この他，コア単体の厚さを揃えるために加工時の接着層厚さを均一化する技術，フェライト単結晶を高能率，無ひずみに加工するためのメカニカル・ケミカルポリシング技術についての検討内容を述べる。

2. 形状研削

図7.1に示す磁気ヘッドは，記録・再生作用をはたすフェライトコア部および磁気ディスク媒体面に対して浮上させるためのスライダ部はすべて同一のフェライト材料より構成されている。本ヘッドは中央部および両側に断面が台形状の尾根が形成されている。中央部は記録・再生用のコアによるもので，台形の幅がトラック幅に相当する。両側は浮上力を発生させるためのもので，台形幅の大きさが浮上力の大きさと対応する。各々の幅はヘッドの最終加工段階で斜面研削によって決められる。この斜面研削では(1)クラック欠けを発生させないこと，(2)幅を±2 μm の精度で研削するために，表面あらさはR_{max} 0.5 μm 以下であること，(3)多量の研削時にも寸法変化が少ないよう，耐摩耗性の大きい研削砥石を用いることなどの技術的な要求がある。ここでは，耐摩耗性の大きい高精度の研削が可能な樹脂結合砥石を開発して用いた。[701]

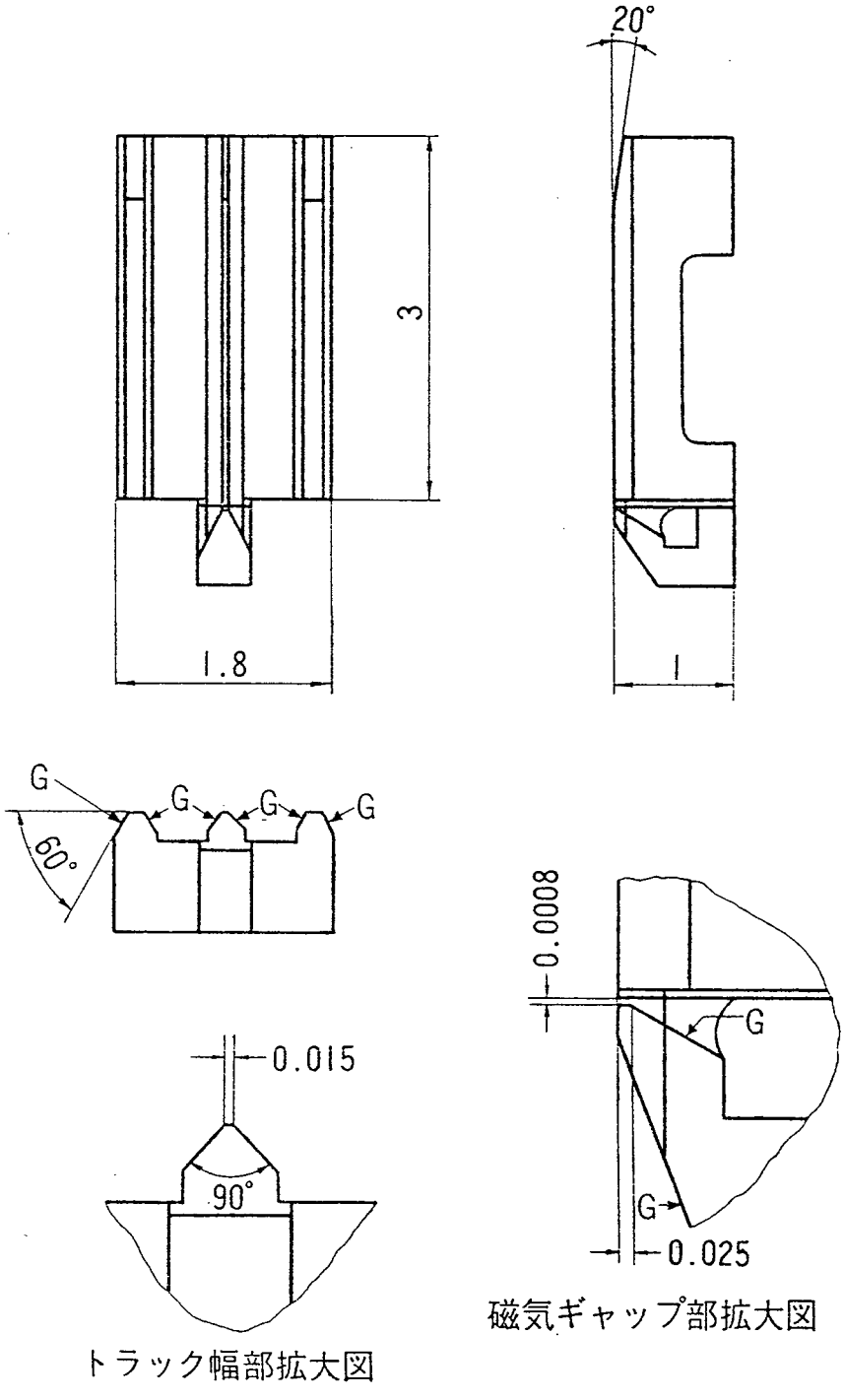


図 7.1　フェライトのみで形成された磁気ヘッドの一例

（G：要研削部）

2.1　樹脂結合砥石

硬脆材料の研削ではメタルボンドのダイヤモンド砥石が多く使用される。耐摩耗性が大きく，研削性にも優れるが，第2章に述べたように研削面下の材料内部に破壊層が生ずる。[703] このため，形状研削時，材料エッジにはクラックや欠けが生じ，磁気ヘッド用の研削には使用できない。一方，従来の樹脂結合砥石は摩耗しやすく高精度の形状研削の寿命が短い。すなわち，従来一般に使用されているフェノール樹脂砥石は研削時の砥石面温度上昇に伴って，樹脂軟化が生じ摩耗が急速に進行する。図7.2は各種樹脂の摩擦面温度に対する摩耗量[704]を示したものである。対向させた試料はフェライトである。フェノール樹脂では50℃前後の初期温度からすでに摩耗が大きい。そして100～150℃付近からは急激に摩耗が進行する。これに対して芳香族ポリエステル系ポリオキシベンゾイルと，これに架橋ポリイミドを配合した樹脂では300℃付近まで極く微量しか摩耗しない。この結果をもとに本樹脂を結合剤とした#800～#2000の微粒ダイヤモンド砥石を試作した。本砥石には結合剤と被研削材が直接接触したとき，潤滑性がよく，摩擦抵抗が軽減されるよう，MoS_2などの固体潤滑剤も混入した。次にMn－Zn系フェライト結晶を研削して実際の摩耗特性をしらべた。フェノール系砥石では数μm前後の低切込みと，100mm／min以下の低送り速度でも摩耗が急激に進行している。これに対して試作した芳香族ポリエステル系ポリオキシベンゾイルと架橋ポリイミドを配合した砥石では40μmの切込みまたは800mm／minの高速送りに対して耐摩耗性の高いことが明らかとなった。図7.3はこれらの摩耗特性をもとに設定切込みに対する研削比（砥石摩耗量に対する被削材の研削量の比）を示したものである。フェノール系樹脂砥石では切込み5μmにおいて50前後であるが，本研究で試作した砥石では40μm前後の切込みにおいても400以上の研削比を示した。さらに，固体潤滑剤を混ぜて試作した砥石で研削実験を行ったところ，研削比は3000以上にも達することが明らかになった。これは従来砥石に比べて，耐摩耗性が2桁以上改善されたことになる。

2.2　磁気ヘッドの形状研削

図7.1に示したヘッドのスライダ両肩部およびコアのトラック幅を決める斜面研削をここに試作した砥石を用いて行った。斜面研削の手法は，図7.4(a)に示すように被加工物を傾けて砥石の円筒面で研削する方法と図7.4(b)，(c)に示すように砥石を剣型に成形してこの斜面部で研削する方法がある。これら2つの方法について，研削面の表面あらさ，加工

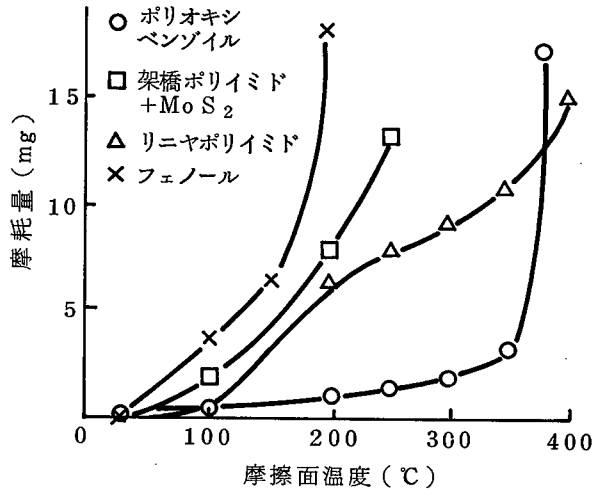


図 7.2　各種樹脂の摩擦面温度に対する摩耗量

（Bowden－Leben 式摩擦摩耗試験
荷重：2kgf，速度 50mm／min）

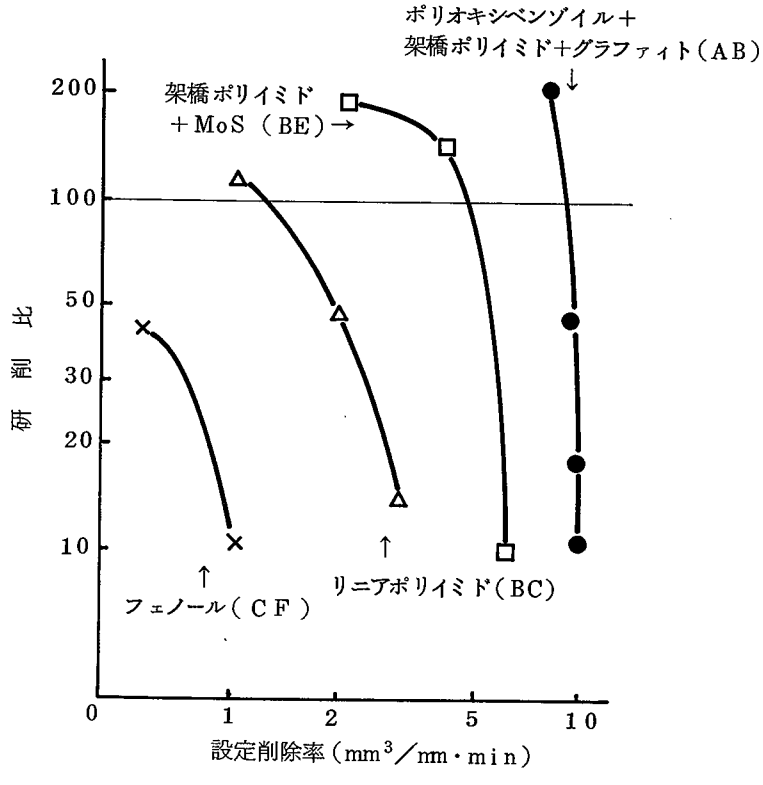


図 7.3　樹脂結合砥石による研削比

（研削条件　砥石：外径 150mm厚さ 3mm，ダイヤモンド 6／12μm
砥石回転数：3200rpm，試料送り速度：200mm／min
切込み：5～40μm，試料：Mn－Zn 系ホットプレスフェライト）

変質層の点から検討すると後者が優れることが明らかになった。すなわち，砥石先端が45度の場合の表面あらさはR_{max} 0.2 μmで円筒面の場合のR_{max} 0.5 μmの1／2以下である。なお表面あらさに関しては砥石先端角零すなわち砥石側面で研削することによりR_{max} 0.05 μmにまで向上する。一方加工変質層は砥石側面の研削面で約0.3 μm，円筒面による研削面で約1 μm程度である。

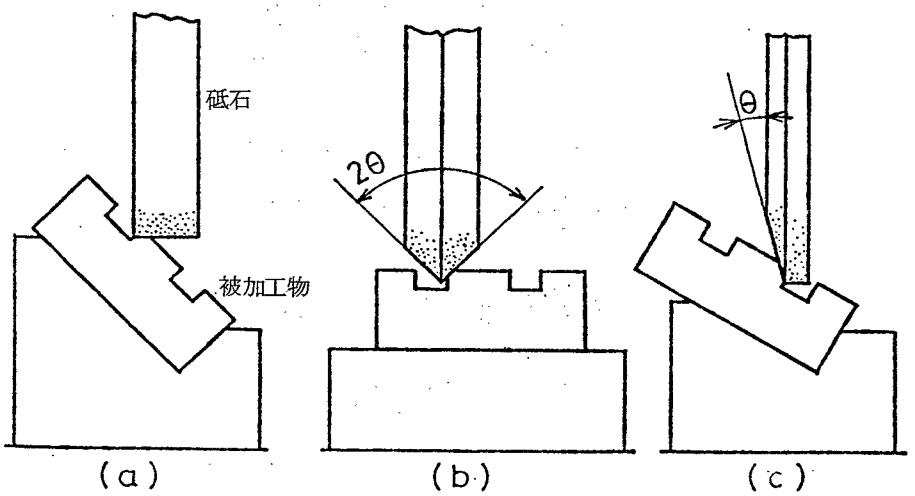


図7.4　斜面研削用砥石形状と研削法

図7.5に先端角90度の砥石を使って，トラック幅決め用の斜面研削を行った結果を示す。4 μm，6 μm，10 μm幅とも欠けなく斜面研削されている。砥石先端角が小さいほど研削表面あらさが小さく加工変質層が少ないが，斜面研削を行った後のトラック幅の欠けは大きくなり，先端角が90度の場合にもっとも欠けが小さくなる。これらは砥石の側面振動や剣型砥石整形の不均一さに原因するものと考えられる。

本砥石は半導体Siの前加工用研削にも使用し，研削液としてKOH希釈液などを使った複合研削実験も行った。[705] 表面あらさR_{max} 0.1 μm以下，熱酸化後の積層欠陥密度評価による加工変質層も0.6 μm以下と高品質の研削面を得ることができた。

2.3　本節のまとめ

フェノール樹脂などの従来砥石における耐摩耗性の低さを改善し，高精度の形状研削を達成するために新しい砥石が開発された。芳香族ポリエステル系ポリオキシベンゾイルと架橋ポリイミドを配合し，固体潤滑剤を混ぜた特殊レジノイドダイヤモンド砥石である。

この砥石は研削比（フェライト被削材）3000以上を有し，従来砥石の性能を2桁向上させるものである。本砥石によって磁気ヘッドのコア幅を決める斜面研削を行ったところ，エッジにほとんど欠けのないトラックを形成できた。

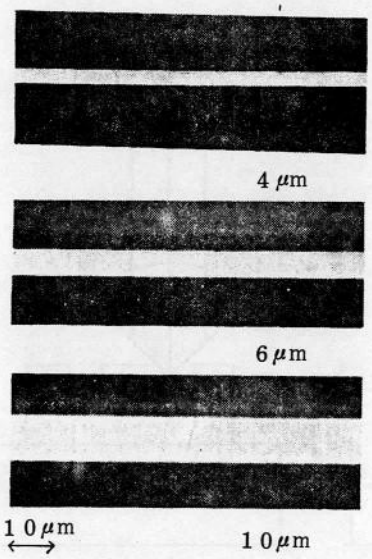


図 7.5　斜面研削したフェライト磁気ヘッドのトラック端部

3. 浮上面加工

平面の磁気ディスク面に対して1 μm前後のすきまで磁気ヘッドを安定に浮上させる場合，磁気ヘッド浮上面の形状が重要な役割を果す。通常使用される形状はスライダ前部にテーパ部を有するフラット面，および球面と円筒面である。ここでは加工上最も困難性の高い円筒面の高精度加工技術について検討した。[706)]

ディスクヘッドに用いられる浮上面の円筒曲率半径は2～4 m付近が常用されている。これは動作中，回転ディスク面に対して良好な追随性，姿勢の復元性を得るとともに，ディスクの起動，停止におけるヘッドクラッシュ（ディスク面との衝突によるヘッド，ディスクの損傷）を防ぐためである。浮上面の加工では表面あらさをR_{max} 0.1 μm以下にし，フェライトコアの欠けをなくし，加工変質層も極力抑制する必要がある。

3.1　加工方式と加工機の設計

従来の円筒面加工は主に研削方式によるもので，[707)]砥石による加工のため表面あらさを

0.5 μm 以下に形状研削するのは難しく，また曲率半径を2～4mとすると10mmの試料で10μm前後と非常に小さいクラウン高さ（円筒面の最低部と最高部の差）に研削することも難しい。そこで，加工機の設計方針として，(1)高精度の平滑面を得るために，加工はラッピングまたはポリシングとすること，(2)平面加工と同様に試料面と工具面は面接触させること，(3)試料と工具の相対運動は特定の方向，位置に偏らないこと，(4)試料と工具の相対回転運動を規制すること等を基礎に進めた。

前記方針のもとに設計・試作した加工機の主要部を図7.6に示す。構成は円筒面ラップ（またはポリシャ），試料貼付台とその保持具，母線方向への案内枠と案内軸受列，鋼球溝，円筒方向への案内溝と試料保持具にとりつけられて中を滑る滑動子，試料部を往復運動させる球状の駆動端をもつ桿である。加工は円筒面ラップ上で試料面を摺動させて行ない，ラップと同一曲率の円筒面を転写させる。その運動は下ラップの回転とこれにならった試料の回転および一定方向の往復運動を組合せたものである。試料の下ラップに対する運動は2本の案内枠で拘束される結果，両者は相対的な回転運動なしにあらゆる方向に往復運動する。これは，通常のレンズ研摩方式における特殊の場合にあたる。所定の曲率をもつ円筒面のラップ形状の維持または修正に必要なことは，試料とラップの摩耗量とその

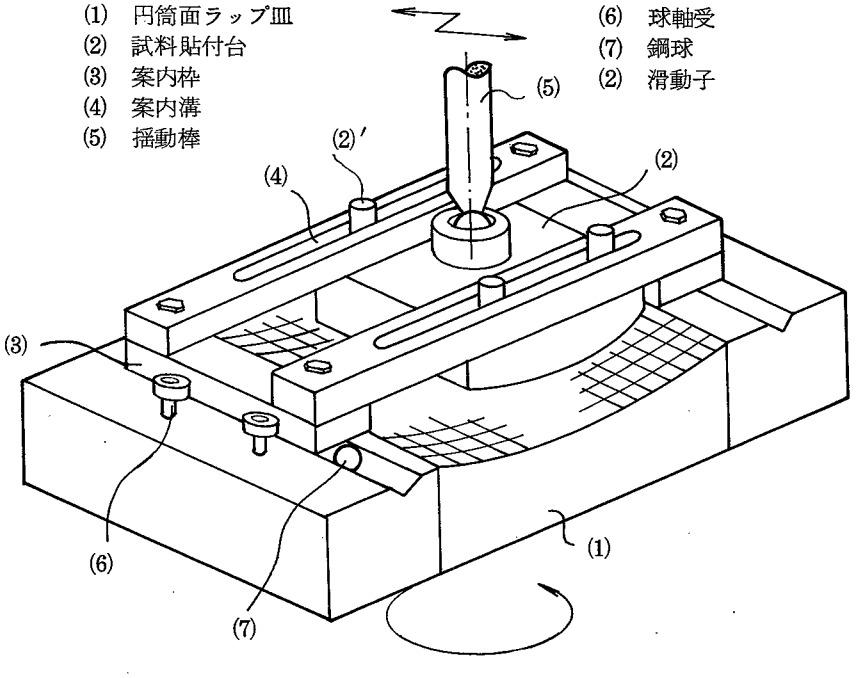


図7.6　設計・試作した加工機主要部

分布を把握することである。これらは，両者の相対運動における軌跡密度と圧力分布に依存する。図 7.6 で下ラップを回転し，試料台を往復揺動させることで，試料上の各点は下ラップ特定方向に偏らない軌跡を描く。図 7.7 は試料中心が下ラップ上に描く軌跡の 1 例

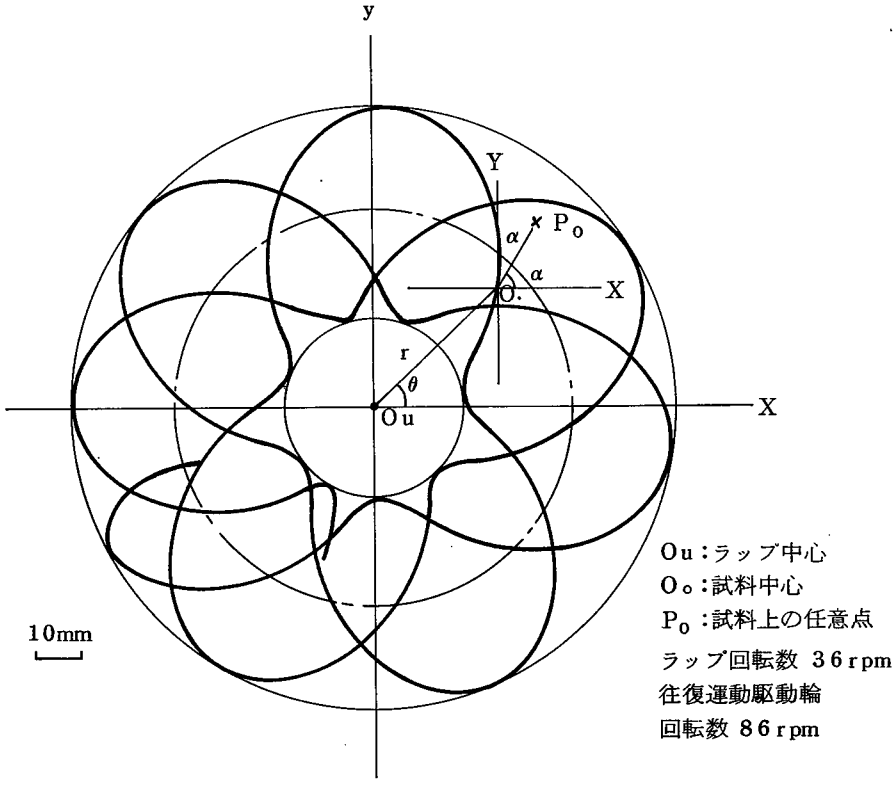


図 7.7　試料中心の軌跡

である。ラップおよび試料の円筒母線方向を x，X 軸とする直角座標を設定すると，中心の軌跡の式は

$$\begin{cases} X_0 = r\cos\theta,\ Y_0 = r\sin\theta \\ \theta = \omega_u t,\ r = A + B\sin(\omega_a t + \beta) \end{cases} \qquad (7.1)$$

となる。ここに

ω_u：下ラップの角速度，ω_a：往復方向駆動輪角速度

A：往復運動の中心の動径

B：往復運動の振幅，β：初期位相

である。往復運動は円孤上の一部にそっているが，この円の半径は十分に大きいので直線状の単振動と考えることができる。

一方，試料上の任意点 P_0 の軌跡は，

$$\begin{cases} x = r\cos\theta + a\cos\alpha \\ y = r\sin\theta + a\sin\alpha \end{cases} \qquad (7.2)$$

となる。ここに $\begin{cases} a：試料中心からの長さ \\ \alpha：P_0O_0とX軸のなす角 \end{cases}$

である。（7.1）（7.2）の比較から試料上の任意点の軌跡は図7.7の中心の軌跡をx，y座標上で方向はx軸に対して角α，長さaだけ平行移動したものである。試料上の各点の摩耗が全走行距離に依存し，かつ，ラップの摩耗のない状態を仮定すると，ラップ面内で運動する限り，各点の摩耗は均一の厚さで進行することになる。

一方，ラップ摩耗については往復運動の中心位置および往復振幅の設定の仕方によってラップ上の軌跡密度に差ができ，このため，不均一摩耗が生ずる。これを補正するには，摩耗と圧力分布との関係を考慮して条件を設定する。[708)] 例えば下ラップ径に対して試料部にはみ出しを与えて外周側により大きな圧力をかけるなどの方法である。

これらの条件設定を可能とする円筒面加工機を設計・試作した。図7.8に全体の外観を示す。おもな仕様は表7.1に示すとおりである。全体の特徴は(i)ラップとりつけ部に大径のスラスト軸受を採用して剛性を高め，回転中の負荷に対する安定性と回転の精度等を保障したこと，(ii)滑動子はカムホロワを使用し，摩耗を防止したこと，(iii)さらにラップ径はφ200の大型がとりつけられ，往復運動の幅が大きくできて加工能率を向上させうることである。

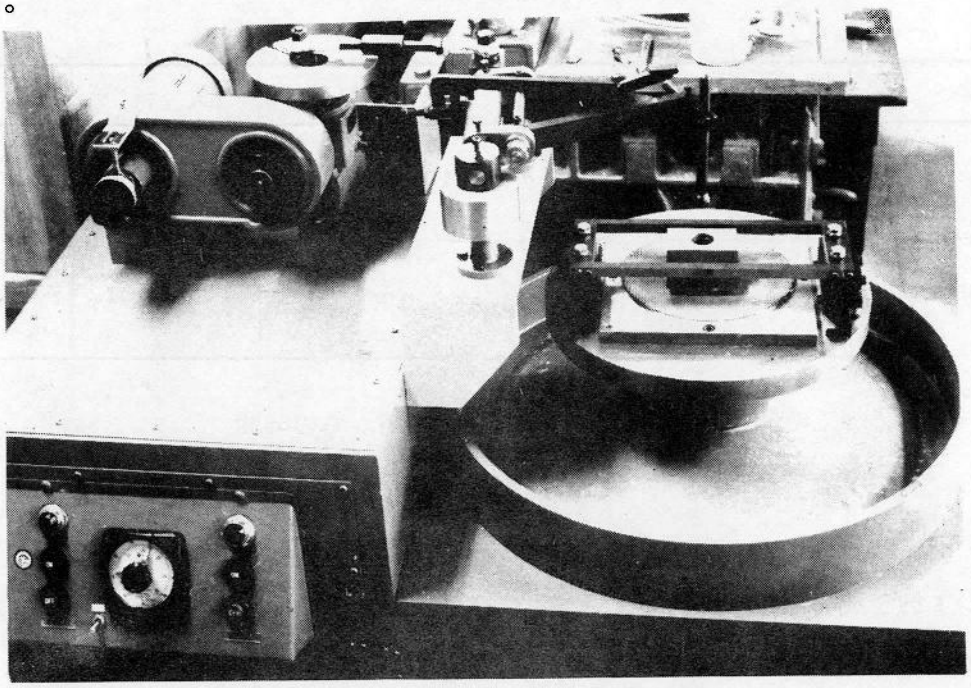


図7.8　試作した円筒面加工装置外観

表7.1　試作した加工機仕様

加工機全体の大きさ	1100×800×660mm³
ラップ皿回転数 ラップ皿外径	10, 30, 50rpm φ200mm
揺動　振動数 揺動幅	19～66.5cpm（無段） 0～120mm
試料台大きさ	80×90mm²
ラップ圧力付加	（均等）平均荷重（0.5～2kgf）

3.2　円筒面ラッピング・ポリシング

試作した加工機を使用し，表7.2の加工条件でフォルステライトをラップした。試料は10mm□で貼付台（φ80）の上に中心対称形にはり，まず鋼ラップとGC#1000砥粒で予備整形ラッピングを行ない，次に黄銅ラップとGC#4000で前加工する。最終は鉛ラップ（黄銅凸ラップを型として鋳込んだ）または錫ラップ（0.5mmの錫薄板を黄銅ラップに接着）と，WA#6000砥粒またはアルミナ1μmの組合せでポリシングした。加工

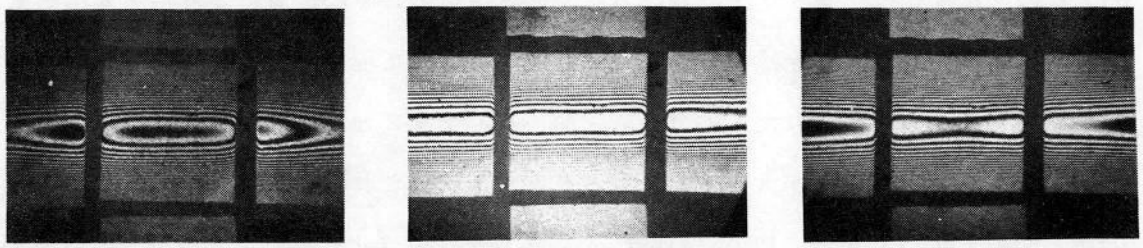
表7.2　円筒面加工条件

	ラップ材質	曲率半径	砥　粒	試　料	加工時間
ラッピング	鋼・黄銅	2100** ～ 2200mm	GC#1000, #4000	フォルステライト 10.5□×4	30～90分*
ポリシング	鉛		WA#6000, アルミナ1μm		60分

*　加工時間の内，ラッピングは平面状態からの時間

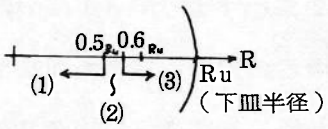
**　ラップはNCフライスにて製作

結果の1例を図7.9に示す。(2)は母線方向に凹凸の小さい加工例で，図7.10は触針あらさ計で測定した試料の円筒面形状である。曲率半径は2200mmで皿形状を転写し，円孤



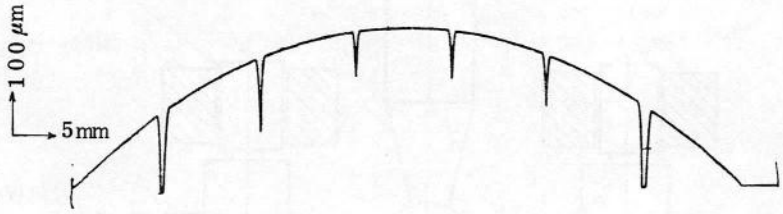
(1)　　(2)　　(3)

円筒加工面の干渉縞
(1) 母線方向凸
(2)　〃　真直
(3)　〃　凹

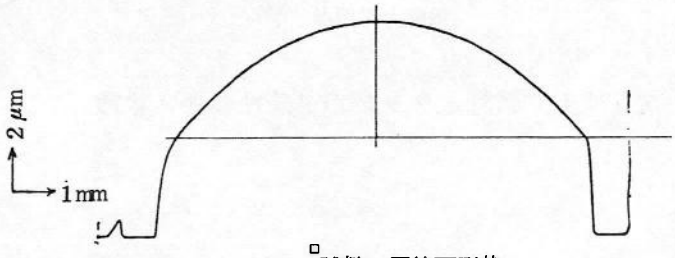


母線方向形状と揺動中心

図 7.9　円 筒 面 加 工 例



φ80試料全体の円筒面形状



10□試料の円筒面形状

図 7.10　試料の円筒面形状（触針先端径 0.8 球による測定）

からのひずみは±5％以内である。図7.9の(1)および(3)は母線方向に凸，凹状を示している。この形状変化は下ラップ上における試料の往復運動の中心位置とふり幅を変化させてラップ皿の端から試料台をはみださせ，その大小によって圧力分布を調節し，皿摩耗を制御することによって得られたものである。加工中，ラップと試料面の密着性不良により，ラップと試料の曲率半径が大きく変化することがある。これは図7.11に示すように，案内溝と滑動子間のすきま（加工中の摩耗），試料を往復させる駆動点と滑動子案内溝部の上下の距たり等のため，案内溝接触点を支点とする垂直面内の微小な回転運動によるものと考えられる。これを改善するため3.1で述べたごとく，滑動子にカムホロワを使用した結果，図7.12に示すように80 mm幅にわたって，ラップと試料面の曲率はほとんど一致しており，両者の摺動が完全な面接触であることが明らかになった。図7.13はこの場合の試料の干渉縞写真である。図7.9の試料と比較しても明らかなとおり，双方の密着性の向上によって試料個々の端だれもほとんど発生していない。

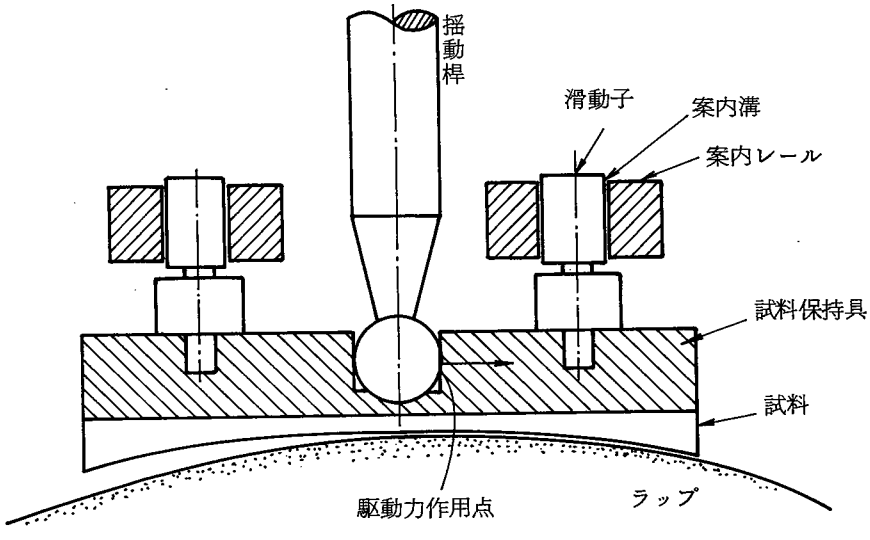


図7.11　試料とラップが密着性の悪い状態

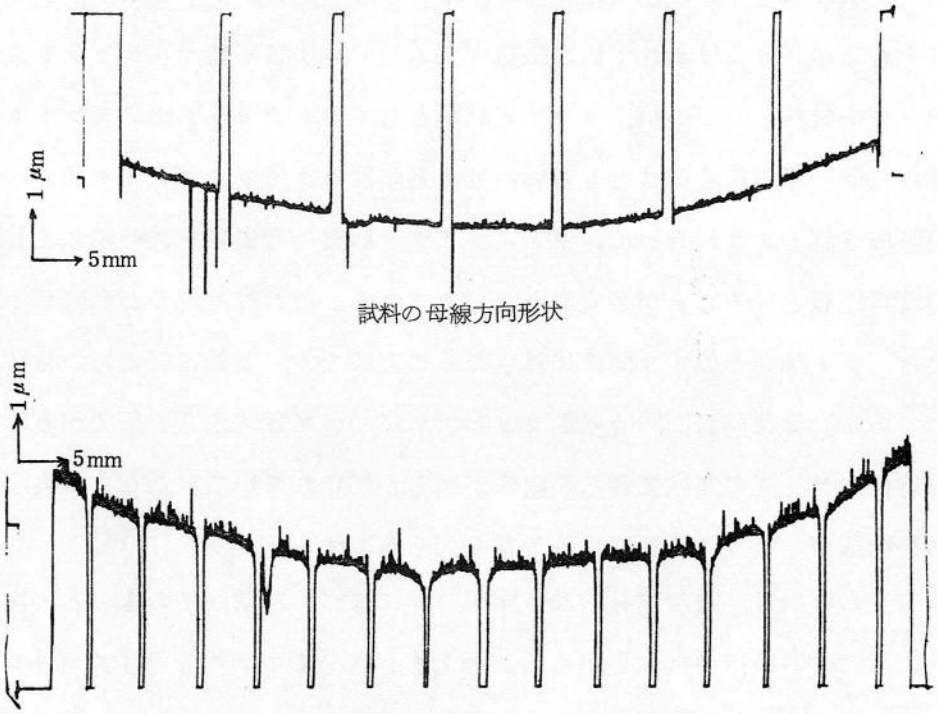


図 7.12　試料とラップの形状の対応

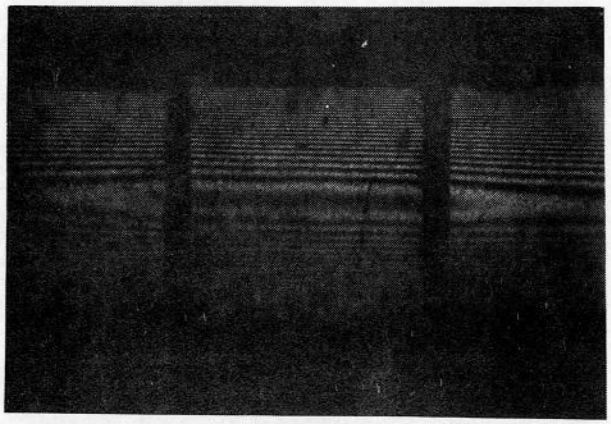


図 7.13　円筒面加工した試料面の干渉縞

（水銀灯 5461Å）

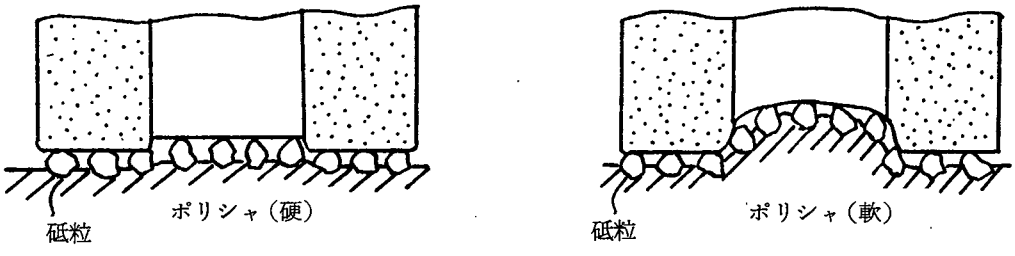
（試料：フォルステライト，ラップ：錫，砥粒：WA＃4000）

3.3　異種材料からなる浮上面の加工

磁気ヘッドのスライダ浮上面はフェライトモノリシックヘッドのように単一材料からなる場合もあるが，従来使われていた磁気ドラム用のコア積層型マルチトラックヘッドのようにシールド材料としての銅，スライダ材料としてのセラミックとフェライトなどが複合構成されて同一平面にくることも多い。特に近年はセラミックスライダ側面に金属薄膜ヘッドが形成されるようになって，硬いスライダと軟質の金属膜を同時に加工して0.05μm以下の段差に仕上げることが必要になってきている。これは段差分が磁気ディスクなどの記録面とヘッド端面とのすき間に加算されることになり，記録密度などの特性を低下させるためである。異種材料の同時平面ラッピングについては河西らの研究があり，[709]被加工材の摩耗特性，ラップの弾性変形との関係が明らかにされている。ここでは実際のヘッドの異種材料構成面を低段差に加工する条件を明らかにする。

段差発生の機構は，被加工材の加工能率の差に基づく初期段階のものと，次にポリシャの弾性変形による段差の拡大とがある。図7.14にそのモデルを示す。ポリシャ剛性の大小にかかわらず作用粒子径が大きいほど，段差は大きくなり，また，一定の加工厚さを取り去った後の収れん段差値はポリシャ剛性の小さいほど大きくなることが予測できる。

図7.15はフェライトコアと銅板を積層し，そのブロックをフォルステライトセラミックスに挟み込んで，ピッチポリシャによりアルミナ1μm粒子で加工した場合の平担性を示す干渉縞である。フェライトと銅の間で0.2μmの段差が発生している。一方，図7.16はフェライトコアと銅板の積層ブロックを鉛ラップとアルミナ1μm粒子で加工した場合の干渉縞である。この場合段差は0.05μm以下でピッチポリシャを使ったものに比べ低段差が達成されており，ポリシャ剛性の影響が明らかである。



(a)　加工能率差に基づく段差　　(b)　ポリシャ変形に基づく段差

図7.14　異種材料の同時加工における段差発生モデル

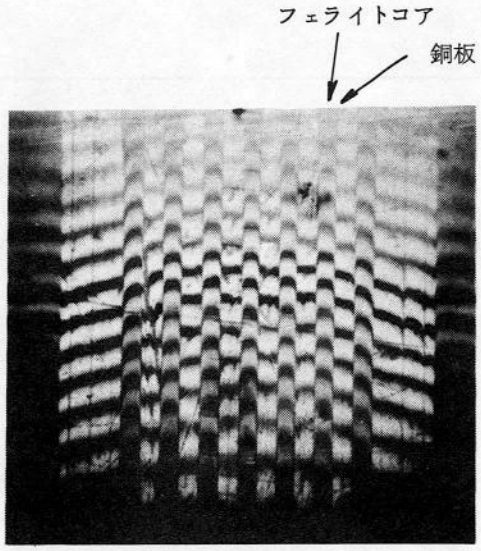


図 7.15　フェライトコア銅板積層体のピッチポリシング面の段差

（加工圧力100gf／cm²　60分加工）

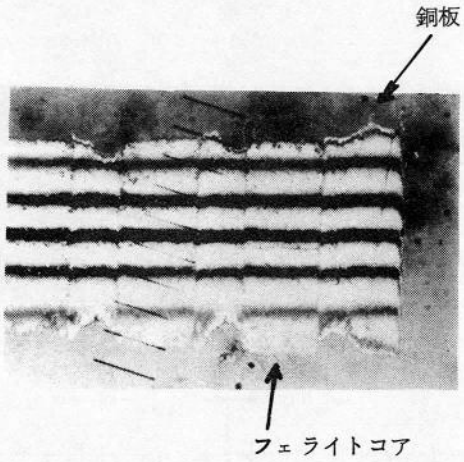


図 7.16　フェライトコアと銅板積層体の鉛ラップで加工した面の段差

（加工圧力300gf／cm²　60分加工）

次に近年開発研究が活発な薄膜ヘッドの浮上面加工の検討結果を述べる。薄膜ヘッドの形態は各種あるが代表的な構成を図 7.17[710]に示す。実際のヘッドでは図の磁極面上に保護被覆膜（SiO_2又は$A\ell_2O_3$）が形成されている。近年のヘッドにおいては浮上すきまの減少化にともない耐摩耗性に対する配慮が強く，スライダ材料としてHv2200前後の$A\ell_2O_3$／TiC（混合セラミックス）が使用されている。このように高硬度材料とパーマ

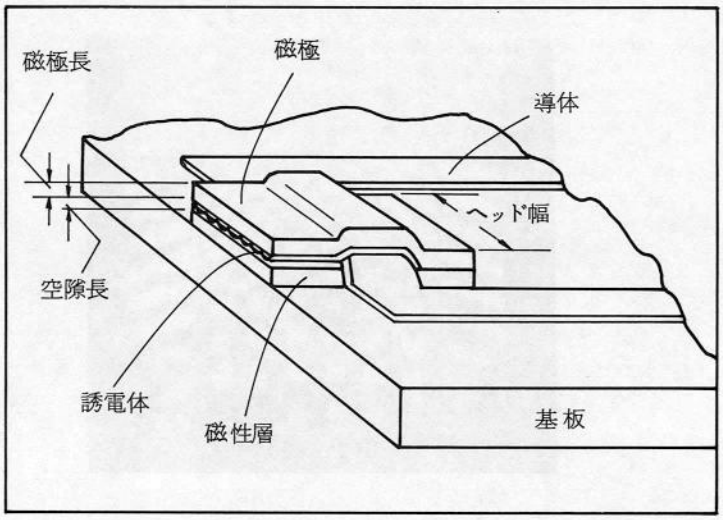
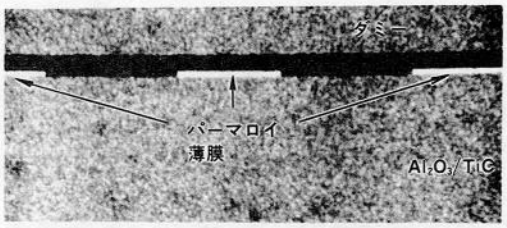
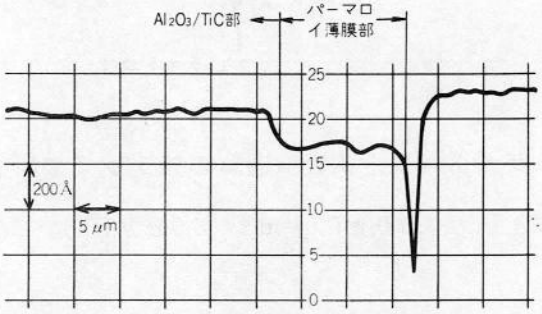


図 7.17　薄膜磁気ヘッドの代表的構成



スライダの端面



端面の平面度

図 7.18　薄膜ヘッドモデルの加工例

（加工時間４０分）

ロイ薄膜金属を同一平面に加工するには，ポリシャ剛性と使用粒子径の検討に加え，粒子の加工性能も考慮する必要がある。すなわち被加工材の加工能率差を加工性能の高い粒子を使うことによって小さくすることである。その方法は高硬度材料に対してのみケミカルな作用を複合させる方法とダイヤモンドのような切れ味のよい粒子を使う方法である。図7.18は塩化ビニール樹脂をポリシャとしてダイヤモンド（0～1 μm）粒子を使って加工したモデル薄膜ヘッドの段差と加工面の写真である。段差は200Å以下になっている。

3.4 本節のまとめ

磁気ディスクヘッドの円筒形浮上面を高精度に加工するための加工機を設計，試作して検討した結果，次の点が明らかになった。

円筒面レンズ研摩方式の運動において，ラップと加工物の相対回転を拘束するため滑動案内を付加して実現できた。これにより，曲率半径の大きい円筒面においても母線方向に凹，凸の少ない（80 mmあたり1 μm以内）円筒面を加工できる。曲率半径の誤差も，2200mmに対して±5％以内であり，ディスクヘッド浮上面加工機として使用できる。なお，ラップの形状維持および修正は両者の密着性を保障した上で相互の摺動における軌跡密度と圧力分布を考慮した加工条件を選定することによって達成できる。一方，高硬度セラミックス材料と金属薄膜の同時平面加工において，粒子の加工性とポリシャの剛性を考慮して，200Å以下の低段差を達成した。

4. Mn－Znフェライトのメカニカル・ケミカルポリシング

磁気ヘッド用フェライトの研摩において，磁気コアのガラスギャップ形成面は加工変質層がなく，かつ，平面精度も高く研摩する必要がある。被研摩面が比較的広い場合は第5章において述べた動圧を利用した浮上加工法が適用できる。しかし，磁気ヘッド構成用フェライトロッドでは断面が2mm□前後で，長手方向に溝入れした試料の側面を研摩する場合もあるので，通常の手法による，高精度で加工変質層の生じにくい研摩法も必要である。ここではMn－Znフェライトに対して化学的溶去作用をもつ研摩液と砥粒の機械的加工作用を複合させたメカニカル・ケミカルポリシング法について述べる。この手法の原理はSiはじめ多くの半導体の研摩に使われており，[711), 712)] フェライトに対する検討結果の報告もある。[713), 714)] 高精度化のために，工具材質に重点をおいて，最適な研摩条件を選定した。

4.1　実験方法と加工条件

試料はMn−Znフェライト単結晶（100）面を使用した。まず単結晶フェライトの基本的化学特性を把握するため，研摩液に用いる塩酸によるエッチング特性を明らかにした。それらは各塩酸濃度に対するエッチ時間とエッチ量の関係およびエッチ液温度の変化によるエッチ時間とエッチ量の関係である。研摩皿は塩酸に対して耐薬品性があり，かつ粘弾性を有するピッチ皿および樹脂硬度の高い塩化ビニール樹脂皿である。砥粒はアルミナ1μmおよび酸化鉄微粒子を用いた。研摩液の塩酸濃度を変化させて，加工時間に対する加工量を測るとともに研摩面の電子回折像から表面の結晶性に対する参考的な評価を行い，また，トロイダルコアの両面を研摩して，コアの透磁率を測定し，他の研摩法で加工したコアのものと比較した。加工条件を表7.3にまとめて示す。

表7.3　フェライト単結晶のメカニカル・ケミカルポリシング条件

項　　目	条　　件
研　摩　皿	タールピッチ，塩化ビニール樹脂
砥　　粒	アルミナ（平均粒径1μm），酸化鉄
研　摩　液	水＋塩酸，濃度0.1〜20 wt%
研摩圧力	0.1〜0.5 kgf／cm^2

4.2　実験結果と考察

(1)　エッチング特性

図7.19に塩酸濃度に対するエッチング深さの関係を示す。各エッチ時間に対して，エッチング量は濃度の指数関数となっている。図7.20は酸濃度一定の場合のエッチング温度とエッチ速度の関係を示している。本図はArrehenius plot と称されるものであり，この直線の勾配は材料の活性化エネルギに相当する。この直線を表わす関係式はArrehenius の反応速度式 $K = A \exp\left[-\frac{Q}{RT}\right]$ として表わせる。ここにKは反応速度，Aは定数，Qは活性化エネルギ，Rはガス定数，Tは絶対温度である。図7.20に反応速度式を適用して本エッチング条件におけるフェライトの活性化エネルギを

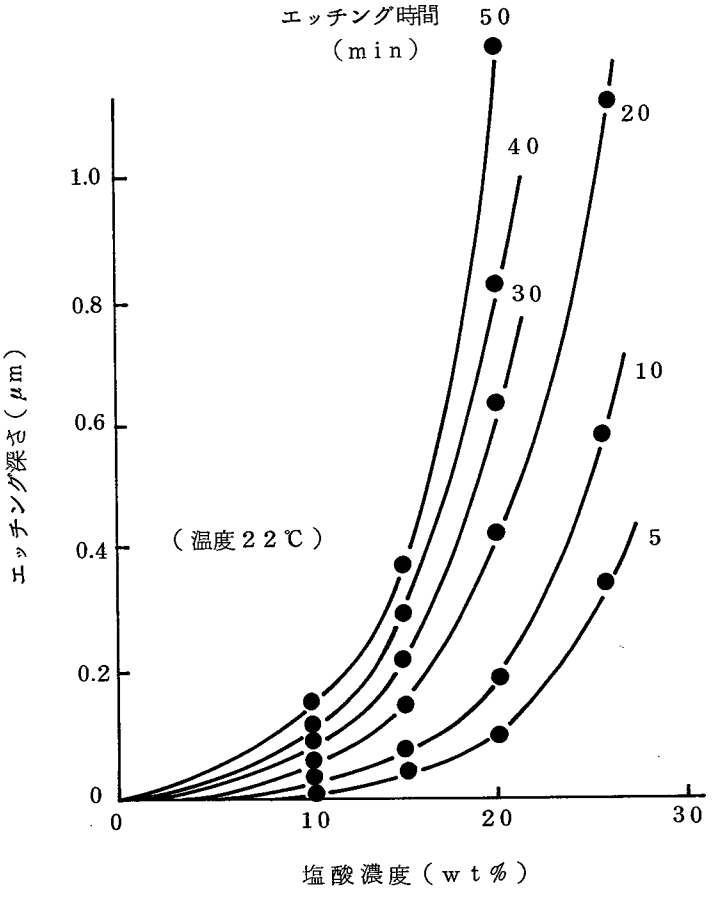


図 7.19　フェライト単結晶(100)の塩酸濃度に対するエッチング深さ

計算すると 11.8 kcal/mol (Mn−Zn単結晶(100))となる。

(2)　メカニカル・ケミカルポリシング特性

図 7.21 に単結晶(100)面の加工時間に対するポリシング量の関係を示す。能率は通常のメカニカルなポリシングに比べて20倍，ケミカルなエッチングに比べて10倍以上になっている。図 7.22 はポリシング剤中の塩酸濃度に対する加工面の加工変質層深さを示したものでこの場合，加工変質層の深さは電子回折像の明瞭な菊池パターンが現れるまでのエッチング深さとした。通常のメカニカルなポリシングにおいて，約 0.3 μm の加工変質層を有するものが塩酸濃度 20 %でほぼ零になっている。これらの加工特性からメカニカル・ケミカルなポリシングの加工機構として考えるケースは次のようである。

①　ポリシング剤中の微粒子によるメカニカルな作用により表面に加工ひずみが生じ，ひずみエネルギが蓄積され材料表面の活性化エネルギが見掛け上低下することによっ

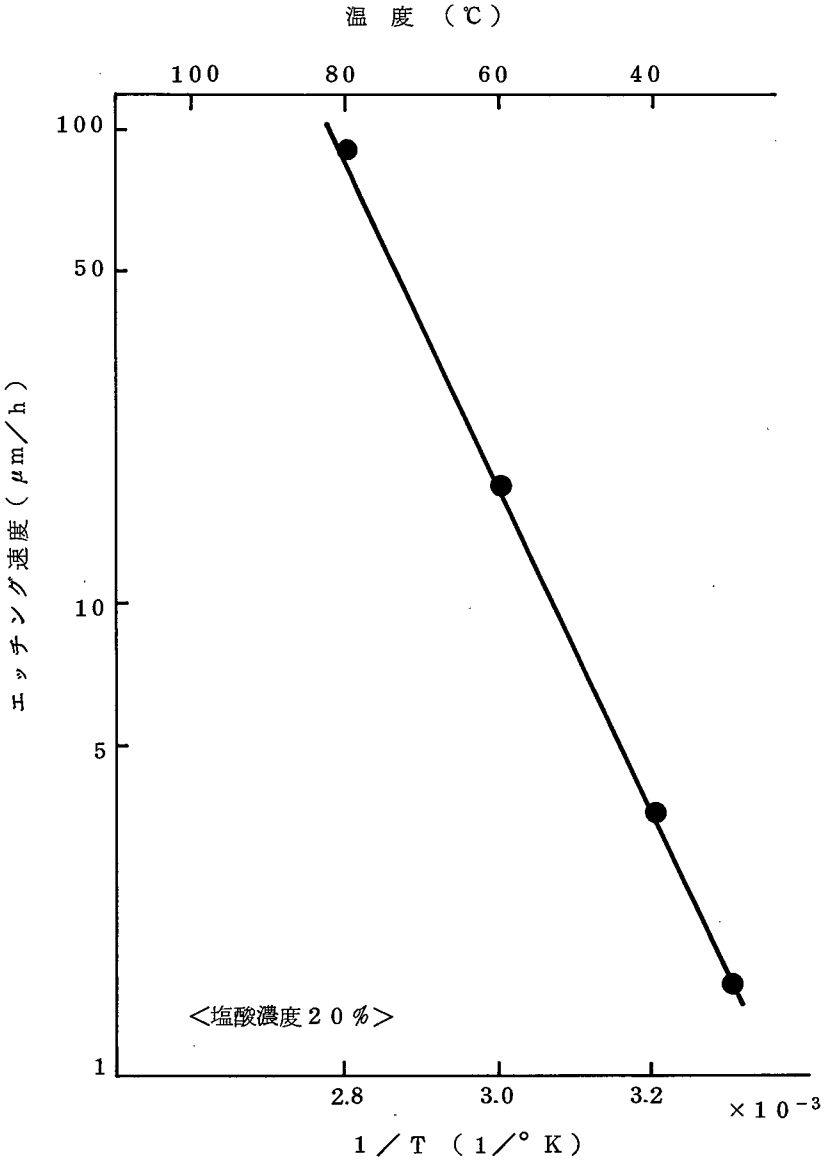


図 7.20　フェライト単結晶（１００）面の
エッチング温度と速度の関係

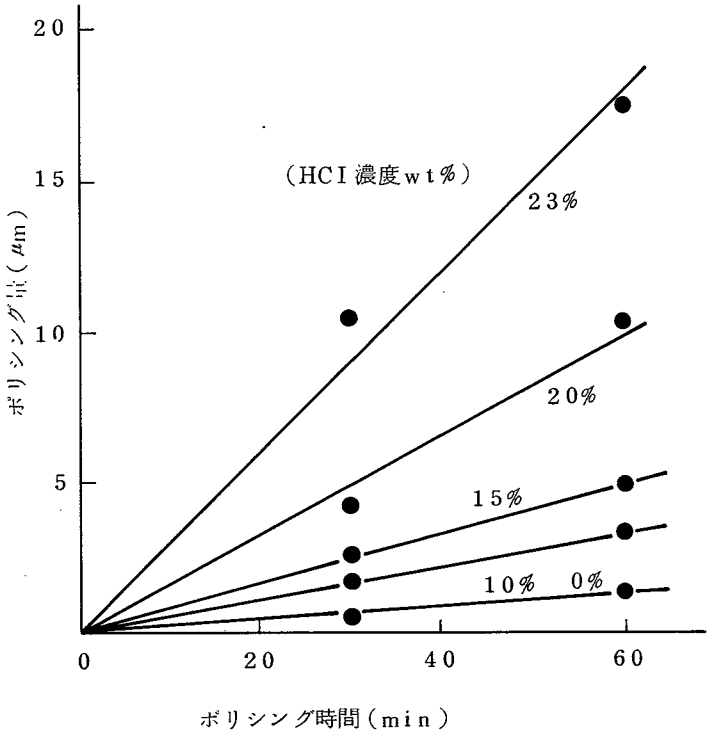


図 7.21　フェライト単結晶（100）のメカニカル・ケミカルポリシングにおけるポリシング時間とポリシング量の関係
（砥粒：アルミナ 1 μm）

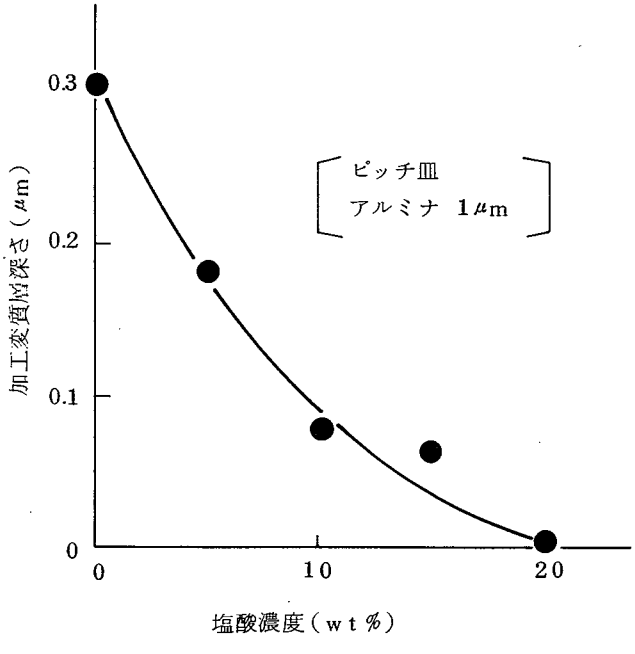


図 7.22　電子回折像から判定した塩酸濃度に対する加工変質層深さ

てケミカルな作用が活発になる。

② 材料表面とケミカル溶液との反応により固体反応生成物ができ，これが元の材料より機械的に脆弱のため，微粒子のメカニカルな作用で容易に除去される。したがって加工能率が高くなる。

③ 材料表面に対する微粒子のメカニカルな作用により表面が微小量除去されると共に接触面の摩擦による温度上昇により，ケミカル液との反応が活発になり，加工能率が高くなる。この場合は①の要因も含むことになる。

①はいわゆる応力腐食の問題であり粉体冶金などにおけるメカノケミカルな反応でもある。[715] 今応力の腐食速度に及ぼす影響について検討してみる。腐食速度式を

$$v = v_0 \exp\left[-\frac{\Delta H_0 - v\sigma}{RT}\right] \qquad (7.3)$$

の形で表わせるとする。

ここに　v：応力σの下での腐食速度

v_0：無応力下における腐食速度

ΔH_0：材料の活性化エネルギ

V：応力によって活性化される体積

σ：引張応力

R：ガス定数　　T：絶対温度

である。ΔH_0は前述のエッチング特性のArrehenius' plotのQより11.8kcal/molである。一方，活性化体積については単一砥粒通過後の痕周辺の変形部として図7.22における加工変質層厚さ0.3 μmを参考に概算する。フェライトの比重を5とし，$MnO \cdot ZnO \cdot Fe_2O_3$の分子量118（MnO・25%，ZnO・25%，$Fe_2O_3$ 50%）を考慮して概算した1モル当りの活性化体積は，$V \fallingdotseq 24\,cm^3/mol$である。また引掻き痕周辺の引張り応力は，第3章で表面の残留応力を求めたときの最大値を用いると約10kgf/cm²である。したがって，$V\sigma = 24 \times 10 = 240\,kgf \cdot cm/mol = 2.4\,kgf \cdot m/mol$となる。1kcal＝426.8kg・mより$V\sigma$を熱量単位で表わすと$V\sigma = 0.0056\,kcal/mol$となり，$\Delta H_0$（11.8kcal/mol）に対して無視できるオーダとなる。

次に③の場合の温度上昇について検討してみる。Arrehenius の反応速度式を使

って，20℃における反応速度は

$$K_{20} = A\exp\left[-\frac{\Delta H_0}{R\times 293}\right] \qquad (7.4)$$

である。仮に材料表面で20°程度の温度上昇があったとすると，40℃における反応速度は

$$K_{40} = A\exp\left[-\frac{\Delta H_0}{R\times 313}\right] \qquad (7.5)$$

である。

$$\frac{K_{40}}{K_{20}} = e^{\frac{\Delta H_0}{R}\left(\frac{1}{293}-\frac{1}{313}\right)}$$

$$= e^{\frac{11800}{1.986}(0.00022)} = e^{1.307}$$

$$= 3.7 \qquad (7.6)$$

となり，約4倍の反応速度の上昇となる。したがってメカニカルな微小除去作用と化学反応の活発化により，加工能率の約1桁の上昇と，加工変質層の減少化は説明できると考えられる。②の機構についてはケミカル液への浸漬後，微小引掻きを行った場合にもとりわけ引っかき痕が深くなる傾向は把握されていないが，詳細な点は今後の課題である。加工機構に関しては前述①～③の他，微粒子と材料表面の固体間反応[716)]により，生成物がケミカル液に溶解されやすい場合，①と同類ではあるが，微粒子により表面が常に摩擦され材料の活性面がでて反応がおこりやすくなるなど各種現象の組合せによるものが考えられる。

ここでメカニカル・ケミカルポリシングにおける微粒子の種類，ポリシュ定盤，研摩液などの条件の違いによるポリシング特性に関して述べる。前出の図7.21，図7.22はアルミナ1μm粒子にピッチ定盤，塩酸液を使用した場合の特性である。塩酸濃度の増大により加工変質層を減少させることはできるが，引っかき条痕が多く残留して表面あらさもRmax 0.005～0.01μmである。また端部のダレも0.3μm程度発生する。これに対して塩化ビニル樹脂定盤を使用し，微粒子に酸化鉄粉末，研摩液

を稀塩酸で加工した場合の表面あらさはR_{max} 40Å 以下（図 7.23 ）で，端部ダレもほとんどないポリシング面を得る。研摩能率も 3 ～ 4 μm／hr とコロイダルシリカと錫皿によるポリシングに比べて数倍高くなる。

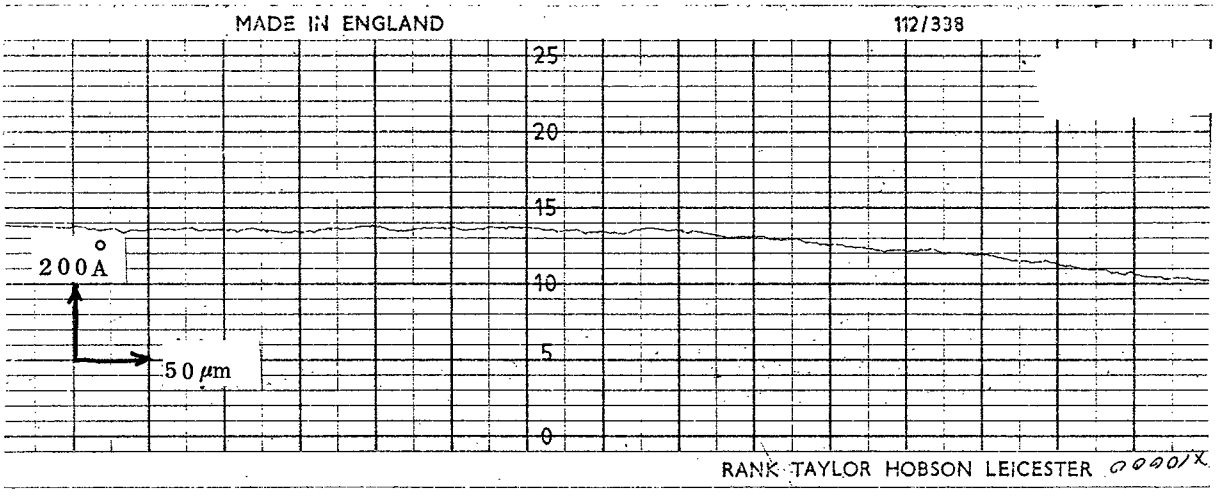


図 7.23　フェライト単結晶（100）ポリシング面の表面あらさ
（砥粒：酸化鉄，研摩皿：塩化ビニール樹脂，塩酸濃度：0.2％）

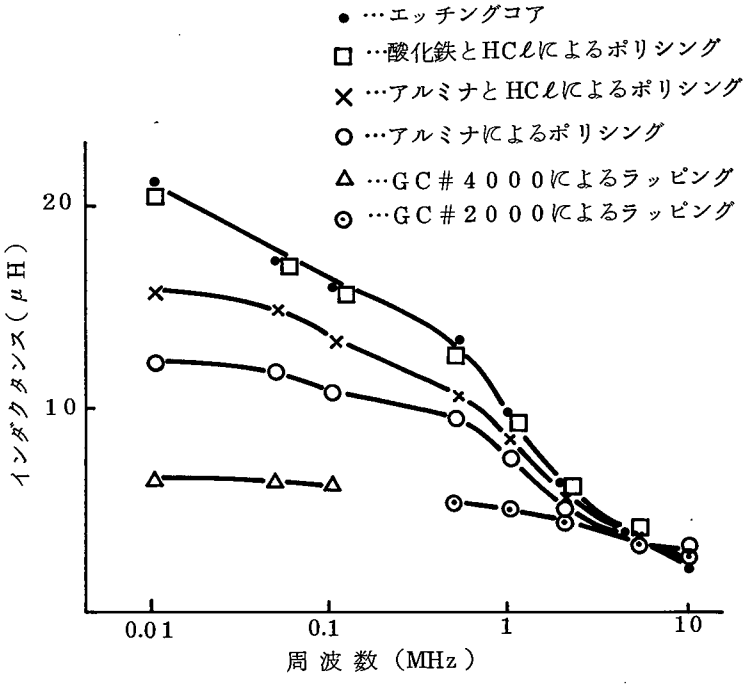


図 7.24　各種加工法で作製したコアのインダクタンスの周波数依存性

メカニカル・ケミカルポリシングはシリコンの研摩に多く実用されており，シリコンに対して微粒子はSiO_2，ZrO_2が研摩能率，精度，品質の点から良好とされている。被加工材料に対する微粒子材料の最適な組合せも考えられ，その研摩機構は界面現象の問題ともいえる。

図7.24は各種研摩法で表裏面を加工したトロイダルコアによるインダクタンスの周波数依存性である。アルミナおよび塩酸でメカニカルケミカルポリシングしたコアはケミカルエッチしたコアに近い値を示しており，また酸化鉄と塩酸で研摩したコアのインダクタンスはケミカルエッチしたコアとほとんど一致しており，小片の無ひずみ加工技術として有効である。

4.3 本節のまとめ

磁気ヘッド用フェライトの研摩では小片を高品質に加工することが必要な場合が多い。微粒子の機械的作用と研摩液の化学作用を複合させたメカニカルケミカルポリシングが有効である。メカニカルな作用によって平面精度が高く，ケミカルな作用によって加工ひずみが除去されて高品質な加工面を得る。またそれぞれの単独作用に比べて約1桁高い加工能率も得ることができる。この加工機構に関しては，ひずみエネルギによる活性化状態の形成や反応生成物に対する機械的除去作用の増大など種々考えうるが，微粒子と加工物表面の摩擦による温度上昇が化学反応を活発化する点が大きな要因となっている。

なお，Mn−Zn単結晶フェライトに対して酸化鉄微粒子，塩化ビニル定盤，稀塩酸研摩液の組合せが実用上有効なメカニカル・ケミカルポリシング条件である。

5. 薄片コア加工用高精度接着技術

高密度記録を達成するためには，記録のトラック幅を狭くする必要があり，フェライトコアも50μm±1μm前後に加工される。コア厚さの精度を±1μm以下にするためには，加工時基準とする定盤への接着層を均一な厚さにしなければならない。フェライトコアに限らず，基板の厚さ，平行度などの精度を高く加工するには均一な接着法が重要な技術となる。ここでは，接着剤の粘性流動の特性を基礎とする接着技術の検討結果を示す。

5.1 接着剤の特性

基準定盤への接着方式を用いた加工法において，使用される接着剤の必要条件は，定性

的に(1)加工中の接線加工抵抗に耐える接着力を有する，(2)均一薄層の接着層を形成できる(3)加工後の剝離が容易である，(4)剝離後の洗浄が容易である，等になる。ここで加工精度に関連した要因は(2)であり，ある粘度を有する接着剤の層を均一化するために，被加工材と基準定盤間に接着剤を挿入したときの加圧力，加圧時間と層厚さの関係を明らかにする。

図7.25に被加工材，基準定盤，接着剤の相互関係をモデル的に示す。Navier－Stokesの運動方程式を基礎にして接着剤融液を非圧縮性ニュートン液体とし，固液界面間

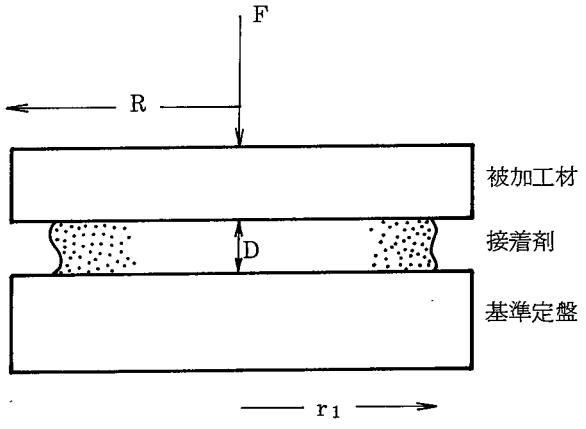


図7.25　接着剤の押圧による薄層化モデル

の相対運動がないこと，垂直方向の速度成分を無視することなどの仮定のもとに

$$\left.\begin{aligned} \eta \nabla^2 v_r &= \frac{\partial \varphi}{\partial r} \\ \eta \nabla^2 v_z &= \frac{\partial p}{\partial z} \end{aligned}\right\} \qquad (7.7)$$

の方程式を解く。

ここにηは接着剤の粘度，v_r，v_zは液体の半径，および垂直方向の速度，pは圧力である。

(7.7)式の解は

$$p = -\frac{3\eta}{h^3}\frac{dh}{dt}(R^2 - r^2) + p_0 \qquad (7.8)$$

と与えられ，外力Fと板面に働く液の圧力$\pi r_1{}^2 p_0$がつりあっているので

$$F=\frac{3\pi}{2}\ \frac{r_1{}^4\eta}{h^3}\ \frac{dh}{dt} \qquad (7.9)$$

となり，液の体積をVとするとV＝$\pi r_1{}^2 h$ であるから

$$F=\frac{3}{2\pi}\ \frac{V^2\eta}{h}\ \frac{dh}{dt} \qquad (7.10)$$

となる。これをhについて，h（初期厚さ）からD（変動後の厚さ）まで積分すると

$$t=\frac{3\eta V^2}{8\pi F}\left(\frac{1}{D^4}-\frac{1}{h^4}\right) \qquad (7.11)$$

を得る。[717] ここにh≫Dとし，液体がはじめに平行板間の全部分を占めていたとするとV＝$\pi R^2 D$ なので（7.11）式は

$$t=\frac{3\pi\eta R^4}{8FD^2} \qquad (7.12)$$

となる。これは平行板間に粘性率ηなるニュートン液体をはさんで一定の力Fを加え，距離hからDまで圧縮するに要する時間である。この式により加える圧力，接着剤の粘度が与えられれば，接着層厚さhになる時間が明らかになる。熱可塑性で洗浄性にもすぐれたグリコールフタレート*および松脂とみつろうの混合ワックスについて検討した。まず両者の各温度における粘度を測定した。測定器はビスコテスター（リオンK．K製）である。これは粘液中で円筒を一定速度で回転させたときのトルクから測定するものである。液の加熱はオイルバスを使い，オイルを可変抵抗器で温度制御した。図7.26に温度と粘度の関係を示す。グリコールフタレートは180℃で140cp，ワックスは150℃で16cpと約1桁の差がある。

次に，より実際的な流動性を把握するため，一定量の接着剤を一定温度に保持したときの広がり速度を測定した。接着剤は格子溝付（溝幅0.5mm，深さ0.5mm，ピッチ2mm）のϕ110mm×t20mmのステンレス円板上に載置した。図7.27に温度とϕ110mm

---

＊　フタル酸とグリコールの混合体

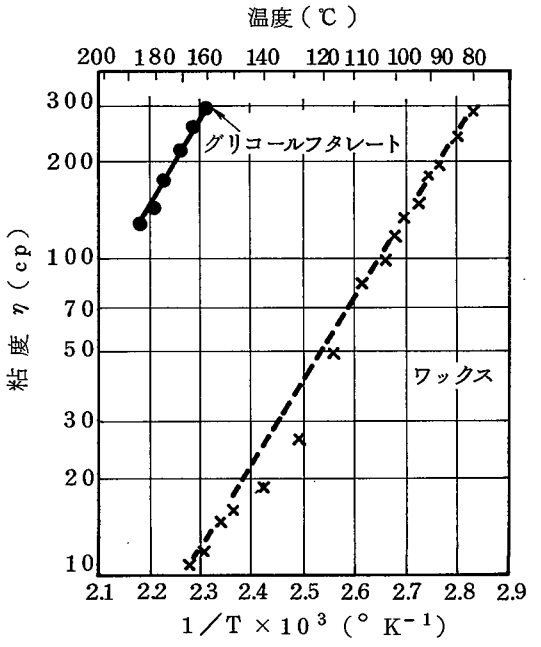


図 7.26　接着剤の温度と粘度との関係

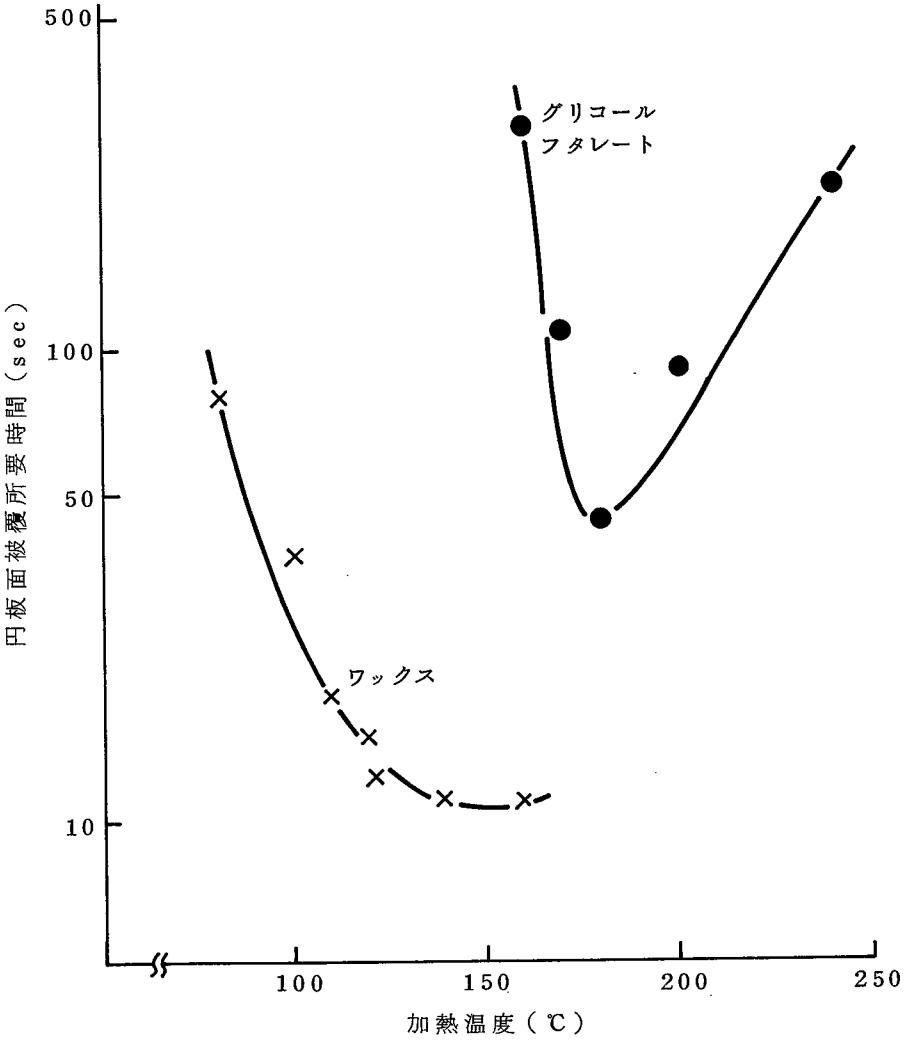


図 7.27　接着剤の温度に対する流動性

全体に広がるのに要する時間の関係を示す。グリコールフタレートでは180℃で最高の流動性を有し，これ以上の温度では接着剤の変質により低下してくる。またワックスは，150℃が最も流動性がよい。したがって以下の実験では，グリコールフタレート180℃ワックス150℃をおもな温度条件とした。

5.2　薄い接着層の形成

基準定盤と試片の間に接着剤を挾み押圧したときの保持時間と接着層厚さの関係を測定し（7.12）式の結果と比較した。基準定盤はϕ60×t16mmのガラス，試片は9□×t16mmのガラスで，ともに表面あらさR_{max} 0.01μm以下，平面度も0.1μm以下である。測定の方法は図7.28に示す。基準定盤上に一定量の接着剤を載置し，これを溶融させて試片を接着し，これを初期接着層厚さとして測定する。次に炉中に入れて，一定荷重を与えて一定時間保持し，冷却・固化させて再度接着層厚さを測定する方法とした。まず試片と同時に加工した別のガラス片を基準定盤に押しつけ干渉縞の状態から両者の密着性を確かめて，このときのダイアルゲージの読みを接着層厚さ零の基準値とする。

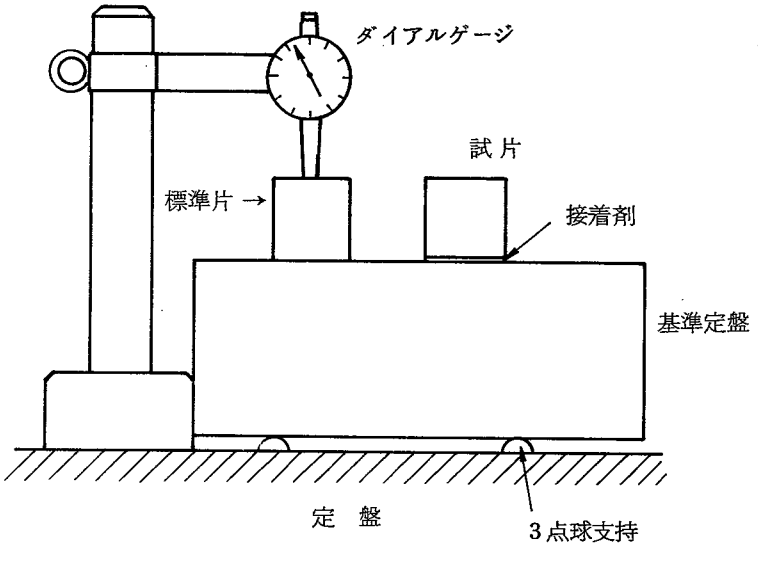


図7.28　接着層厚さの測定方法

次に接着した試片に移動したダイアルゲージの読みと基準値の比較から接着層の厚さを測定した。図7.29にグリコールフタレート，ワックスそれぞれの保持時間に対する接着

層厚さの関係を示す。接着層の厚さが0.2 μmになるまでの時間はグリコールフタレートにおいて最小100分，ワックスでは20分である。これは（7.12）式の計算値より6～9倍大きいが，傾向はよく一致している。したがって（7.12）式により，得るべき接着層厚さに対する加圧力，加圧時間などの接着条件を推定できる。いずれの場合も加熱・加圧保持を行うことにより0.2 μmという極薄の接着層を形成できることが明らかになった。時間については式（7.12）より，Rすなわち被接着面積が大きな要因になっていることがわかり，基準定盤側に3 mm ピッチ程度の溝を形成することにより，1桁以上短縮が可能である。

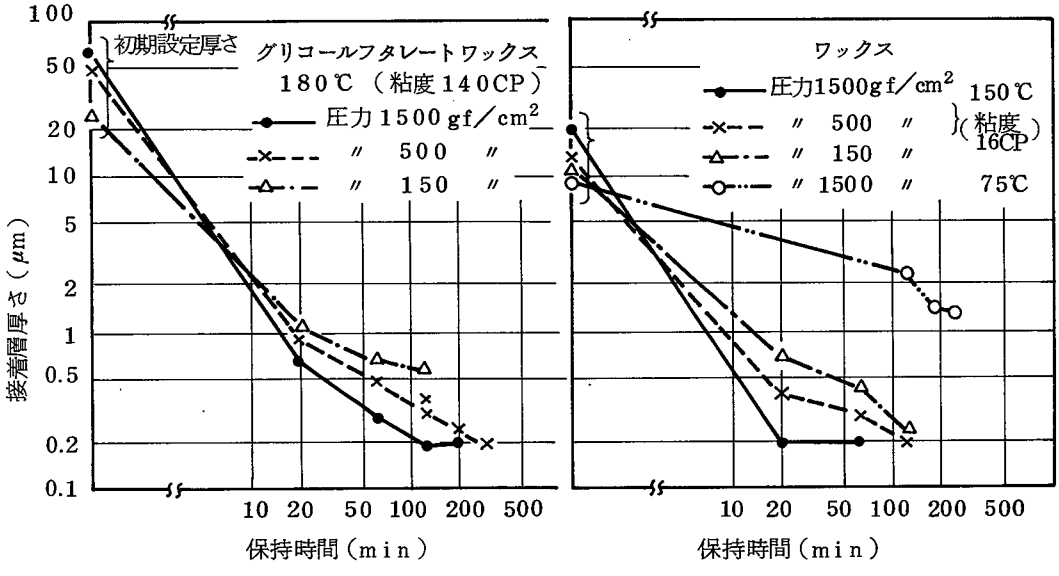


図7.29　保持時間と接着層厚さとの関係

薄い接着層を形成する別の方法として，あらかじめ層厚さに相当するスペーサを挿んでおき，そのすきまに接着剤を流入させる方法も考えられる。図7.30は接着面上の4ケ所に直径 φ0.5mm 厚さ0.15 μmのAℓ蒸着膜を形成し，接着剤を流入させたときの時間と流入距離の関係を示したものである。この関係は第5章におけるガラス接着の流入と同様の式を適用することができる。この場合も押圧・薄膜化の手法と同程度の時間を要することがわかる。

5.3　接着強度の測定

図7.29で各種接着層厚さを設定した場合，ガラス片に剪断力をかけて接着強度を測

定した。図7.31に接着層厚さに対する強度を示す。通常ラッピング抵抗は1kg／cm²以下なので両接着剤で充分であるが，ポリシングでは2～3kg／cm²に達する場合があり，ワックスでは接着層厚さが5μm以上になると不安定である。接着強度は接着層厚さが薄くなるほど分子間力に近くなり，増大する。

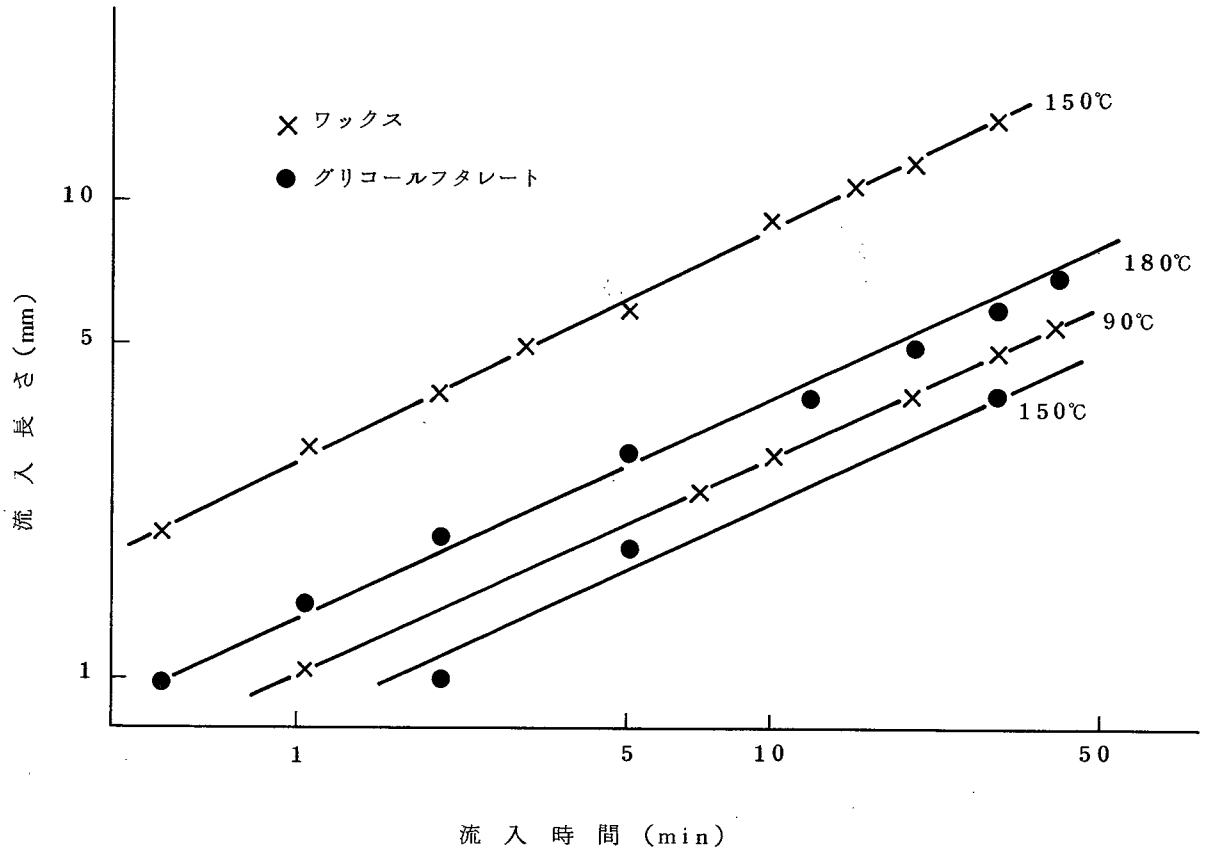


図7.30　接着剤の一定すきまへの流入長さ
（すきま0.15μm　スペーサ：Aℓ蒸着膜）

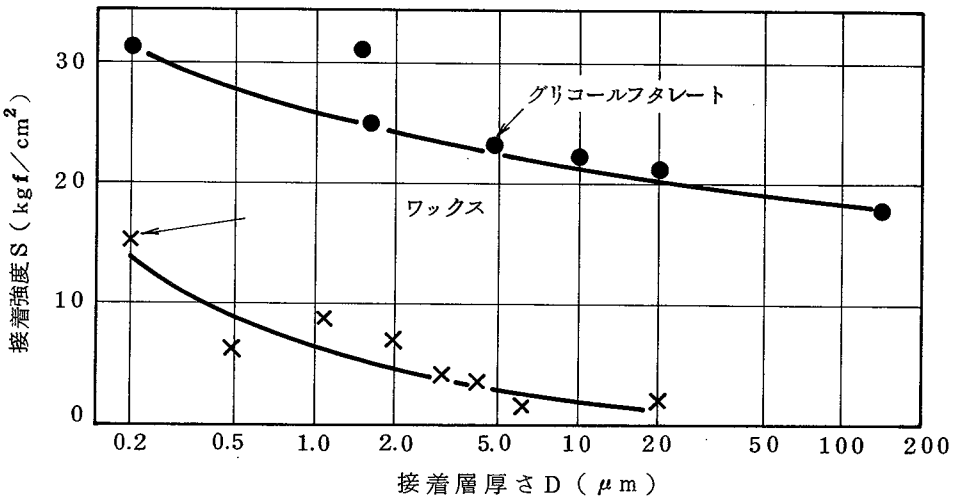


図7.31　接着層厚さと接着強度との関係

5.4　基板の高精度加工への適用

被接着面全面にわたって薄層・均一な接着層を形成することによって寸法・平行度などの精度が確保され，加工抵抗に耐える接着強度を得ることができる。しかしながら1 μm以下の接着層を形成するには長時間の押圧による粘性流体の押し出しによらねばならない。塗布する接着剤層を最初から1 μm以下に制御すれば，短時間に薄い層を得ることができる。そこで，接着剤を溶剤で稀釈しこれを噴霧塗布する方法を検討した。グリコールフタレートはアセトンに溶解し，またアセトンを蒸発させると元の材質に戻るという可逆性がある。これを利用して，重量比で1％以下のグリコールフタレート入りアセトン液を被接着面に噴霧塗布し，50～60℃の予備加熱で0.5 μm前後の接着剤膜を形成した。この上に加工片を載置し180℃に加熱しつつ押圧することにより，短時間に0.2 μm程度の接着層を得ることができた。本方法によって，3 mm□のフェライトコアを250枚同時にポリシングした結果，45 μm±0.2 μmの精度に90％以上加工することができた。さらに，本方法をφ4″のSi基板の加工に適用した結果，φ4″の基板の真空吸着時の平面度を0.6 μm以下に加工することができた。[718)]

5.5　本節のまとめ

薄片を加工する場合に多数の個片間相互の厚さ精度を保証し，単一個片内の平行度を高くするには，接着層の均一化が必要である。加工に使用される熱可塑性接着剤は加熱状態で非圧縮性のニュートン流体と考えられるので，二平板間にこの流体を挟んで，一定力で押した場合のすきまの減少傾向はNavier-Stokesの運動方程式を解くことにより推定できる。これをもとに加工作業に適した接着剤を選定し，加圧力およびその保持時間と接着層厚さの関係を明らかにした。実際には，初期接着剤塗布厚さを1 μm以下にする噴霧塗布法を考案して使用した。これによって短時間で接着層厚さを0.2 μm程度にできることを示し，3 mm□のフェライト個片を45 μm±0.2 μmに加工した。本技術はφ4″の大形Si基板の高精度加工にも適用できる。

6.　本章の総括

フェライト結晶を加工してコアを製作した後，磁気ドラムやディスクの媒体面に対して浮上し，記録・再生できる実際のヘッドを製作する工程では，形状加工，浮上面加工，組立てなど各種の加工技術が必要である。本章でそれらの技術の研究の結果を述べた。まとめると以

下のとおりである。

(1) 芳香族ポリエステル系樹脂を結合剤とした微粒ダイヤモンド砥石では，二硫化タングステンなどの固体潤滑剤の添加によって，耐摩耗性が向上し，フェライト結晶に対して研削比3000以上を得る。本砥石で研削したフェライト結晶面は表面あらさR_{max} 0.05 μmの準鏡面となり，4～10 μmの幅残し屋根型加工では両エッジに欠けが発生しない。

(2) 磁気ディスクヘッドの円筒形浮上面の加工装置を開発した。その機構は円筒面ラップの母線と円周方向に滑動案内を設け，ラップと加工物の相対回転を抑制した上で，ラップを回転し，加工物にレンズ研摩方式の揺動を与えるものである。本方法により，曲率半径2m以上の円筒面のラッピングポリシングが可能となった。曲率半径の誤差は±5％以内である。

(3) 銅・セラミックス・フェライト，パーマロイ・SiO_2膜　セラミックスなど加工性に大きな差のある磁気ヘッド構成面を同時に加工して材料間の段差を300Å以下にする条件を明らかにした。

(4) フェライト結晶小片を高能率に加工変質層なく加工するために，機械・化学研摩条件を明らかにした。機械・化学の複合効果により，それぞれ単独の場合に比べて1桁高い加工能率が得られている。この加工機構に関しては，微粒子と加工物表面の摩擦による温度上昇が化学反応を活発にする点が大きな要因となっている。Mn－Zn単結晶フェライトに対して酸化鉄微粒子，塩化ビニル定盤，稀塩酸研摩液の組合せが有効である。

(5) 加工片を基準定盤に接着・保持する加工法において，平面度・平行度の高い精度を保証するための均一薄層接着技術を開発した。その基礎として可塑状態の接着剤を非圧縮性のニュートン流体と考えNavier-Stokesの運動方程式をもとに薄膜化条件を明らかにした。初期接着剤塗布厚さを1 μm以下にする噴霧法を考案した。これによって0.2 μm前後の接着層を形成し，3 mm□のフェライト個片を45 μm±0.2 μmに加工した。

参　考　文　献

701）　Y.Ueno, S.Miyake et al ： CIRP Ann, 28／1（1979）219

702）　小宮　昇・水谷　武：日本機械学会第42期全国大会論文集（1964）179

703）　渡辺純二・上野嘉之：精密機械，38, 11（1972）953

704）　三宅正二郎ほか：精密機械，44, 9（1978）1050

705）　三宅正二郎ほか：精密機械，48, 9（1982）1206

706）　渡辺純二・上野嘉之ほか：昭和47年精機学会春季大会前刷（1973）333

707）　中野智允，橋本　洋：精密機械，38, 2（1972）220

708）　河西敏雄，宇根篤暢：精密機械，43, 5（1977）562

709）　河西敏雄，鈴木淳平：精密機械，45, 3（1979）279

710）　D.A.Tompson et al： IBM Disk Storage Technology, Feb (1980)3

711）　E.Mendel and V.Sodagopan： IBM Tech.Disclosure.Bull., 15, 8 (1973)2638

712）　T.Karaki and J.Watanabe ： Proc. I.C.P.E., Tokyo (1980)850

713）　J.Watanabe：Bull.J.S.P.E., 8, 4（1974）428

714）　落合雄二，荒川紀義：昭和58年精機学会春季大会前刷（1983）87

715）　久保輝一郎：メカノケミストリー概論，東京化学同人（1971）5

716）　N.Yasunaga：Proc.I.C.P.E., Tokyo（1974）32

717）　Healey：Trans.Inst. Rubber Ind., 1（1926）334

718）　飯山重幸ほか：昭和51年精機学会秋季大会前刷（1976）7

第 8 章　磁気ヘッドの試作

1. 緒　言

前章までにフェライト結晶の精密加工と磁気ヘッドの製作技術に関連した加工技術の研究について述べた。ここでは，これらの技術を総合し，適用して記録再生可能な磁気ヘッドを試作して特性測定を行った結果を述べる。ヘッド形状および支持バネ機構についても，すべて設計した[801]。

現状では，計算機用ヘッドは薄膜ヘッド化の傾向が強く，浮上すきまも0.2 μm前後になっているが，フェライト加工の基本特性を把握することを目的としてフェライト結晶ヘッドに対して実行した。

浮動ヘッドにおける静的な浮上特性の計算に基づく設計，加工精度の維持しやすい構造設計，磁気特性の良好な形状設計，をもとに試作し，最も基本的な記録・再生の特性を測定した。

試作ヘッドの目標浮上量は0.5 μm前後，記録密度は１０００bit／mm以上である。その特徴は双胴形スライダ，曲率半径の大きい円筒形浮上面，コア先端のみ狭幅化加工した高効率形巻線ヘッドで，支持ばねとして二段片持平行ばねを使っていることである。

2. 構造設計

2.1　ヘッドコアとスライダ形状

高記録密度化のためにはディスク媒体の円周方向密度を増大させるとともに直径方向のトラックピッチを小さくする必要がある。フェライトコアのトラック幅は２５μm以下に向かうと予想されるが，コア全体を薄片化した場合次の問題点が生ずる。

(1)　第３章で検討したように，コアの研摩によって表面層に生成した0.1 μm前後の加工変質層はコア内部に残留応力を生ぜしめ，材料の逆磁歪効果によって透磁率を1／2～1／5に低下させる。

(2)　５０μm以下の薄片加工ではガラス接着部等での加工中破損や巻線，組立工程での破断が多い。

これらの点を解決するため記録に関連したコア先端のみを狭くした形状を用いることにした。図8.1にコアおよびスライダ部形状の概略を示す。線記録密度を１０００bit／mm以上にするためにコア先端のギャップは1 μm以下でかつ精度±0.1 μmが必要である。従来

のコアロット製作法ではギャップを設定する基準面が明確でないため，ガラス接着時の誤差が±0.5 μmにおよぶことがあった。本ヘッドではガラス接着時治具内の設定が安定していて，かつ寸法精度が向上するよう図8.2に示す構造を考案している。セラミックに狭まれたフェライト部のみギャップ寸法に相当する厚さだけ化学液でエッチングする。その後両分割部のセラミック面間を密着させることにより所定のギャップ寸法が形成される。

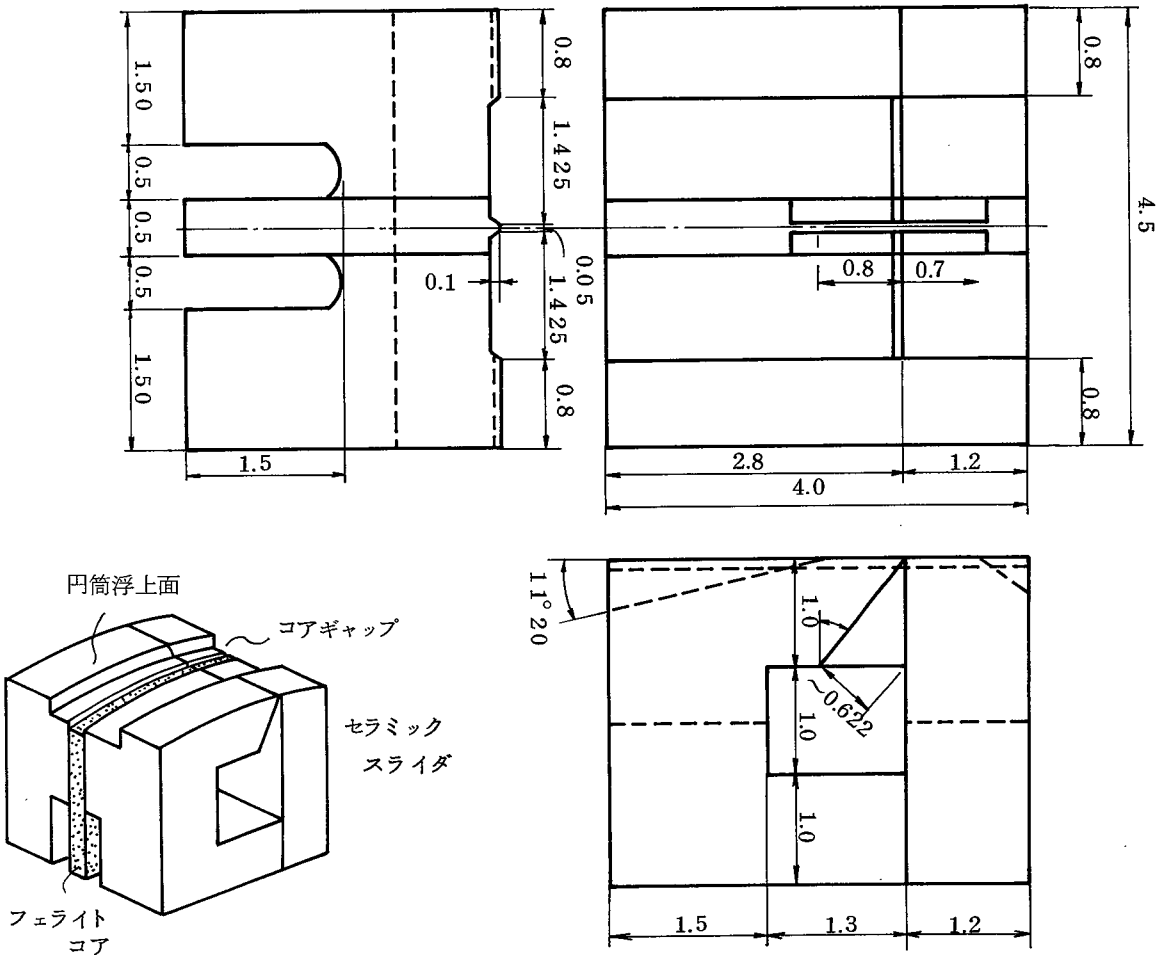


図8.1　設計した磁気ディスク用ヘッド

2.2　浮上力の計算

ディスク平面上に浮上する円筒面スライダの状態モデルを図8.3に示す。この場合，静的浮上力の計算は第5章における定盤と被加工平面の時と同様にReynoldsの方程式（8.1）を基本とする。

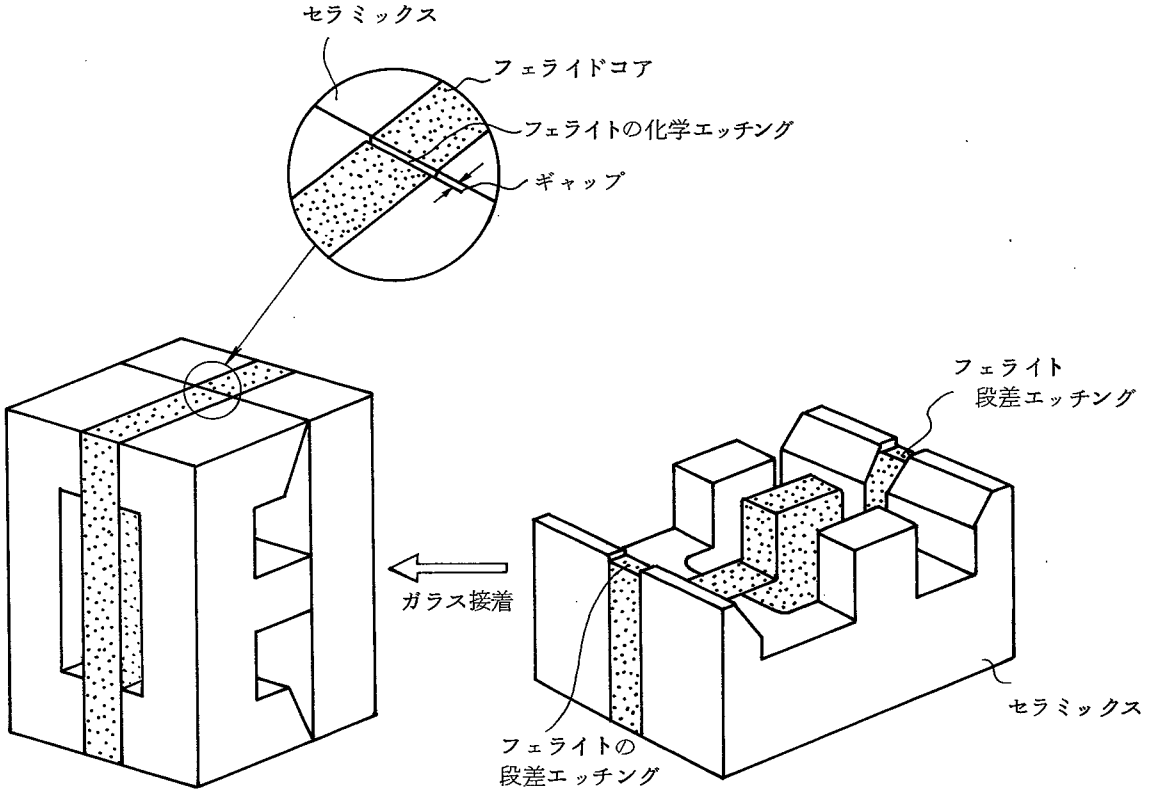


図 8.2　ギャップ寸法設定方法

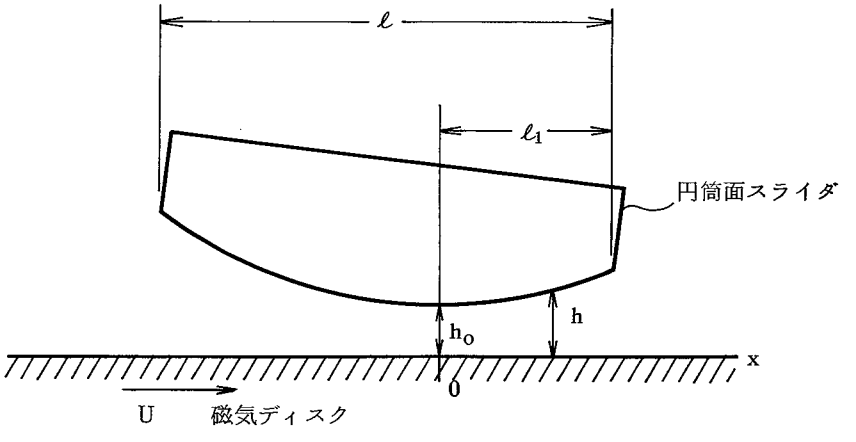


図 8.3　円筒面スライダの浮上モデル

$$\frac{d}{dx}\left(h^3\frac{dp}{dx}\right) = 6\eta U\left(\frac{dh}{dx}\right) \qquad (8.1)$$

ここにhは浮上すきま，pは流体圧力，ηは流体粘度，Uは相対速度である。（8.1）は数値解法で解かれるが，その場合，次のパラメータを用いて無次元化される[802)]。

$$\begin{cases} X = x/\ell,\ Y = y/\ell,\ H = h/ho,\ P = p/Pa \\ \Lambda = \dfrac{6\eta U\ell}{Pa\,ho^2},\ B = b/\ell,\ C = \ell_1/\ell,\ D = \delta/ho \\ W_d = w_d/p_a b\ell \end{cases} \qquad (8.2)$$

ここに　ℓ：スライダ長さ，ho：最小浮上すきま，p_a：周囲圧力（地上で$pa = 10grf/mm^2$），Λ：ベアリングナンバ

b：スライダ幅，ℓ_1：最小浮上すきまの位置

δ：スライダクラウンハイト（円筒面突き出し高さ）

W_d：無次元浮上力，w_d：浮上力

である。

（8.1）式を無次元化したレイノルズ方程式は，Y方向も加えて，

$$\frac{\partial}{\partial X}\left(PH^3\frac{\partial P}{\partial X}\right) + \frac{\partial}{\partial Y}\left(PH^3\frac{\partial P}{\partial Y}\right) = \Lambda\frac{\partial(PH)}{\partial X} \qquad (8.3)$$

となり，無次元の浮上力W_dは

$$W_d = \frac{1}{B}\iint(P-1)\,dX\,dY \qquad (8.4)$$

と表わせて，（8.4）式よりPを求めれば浮上力が計算できる。（8.4）式の数値解は，各パラメータに対して求められた設計図表[803)]を使った。

使用するディスク径と回転数，最小浮上すきまに対するベアリングナンバΛの関係は図8.4のように表わせる。浮上すきま0.5μmでϕ100mm径ディスクを10000rpmにするとΛ＝960である。これにスライダ長さℓ＝4mm，幅b＝0.8mm，円筒面の突き

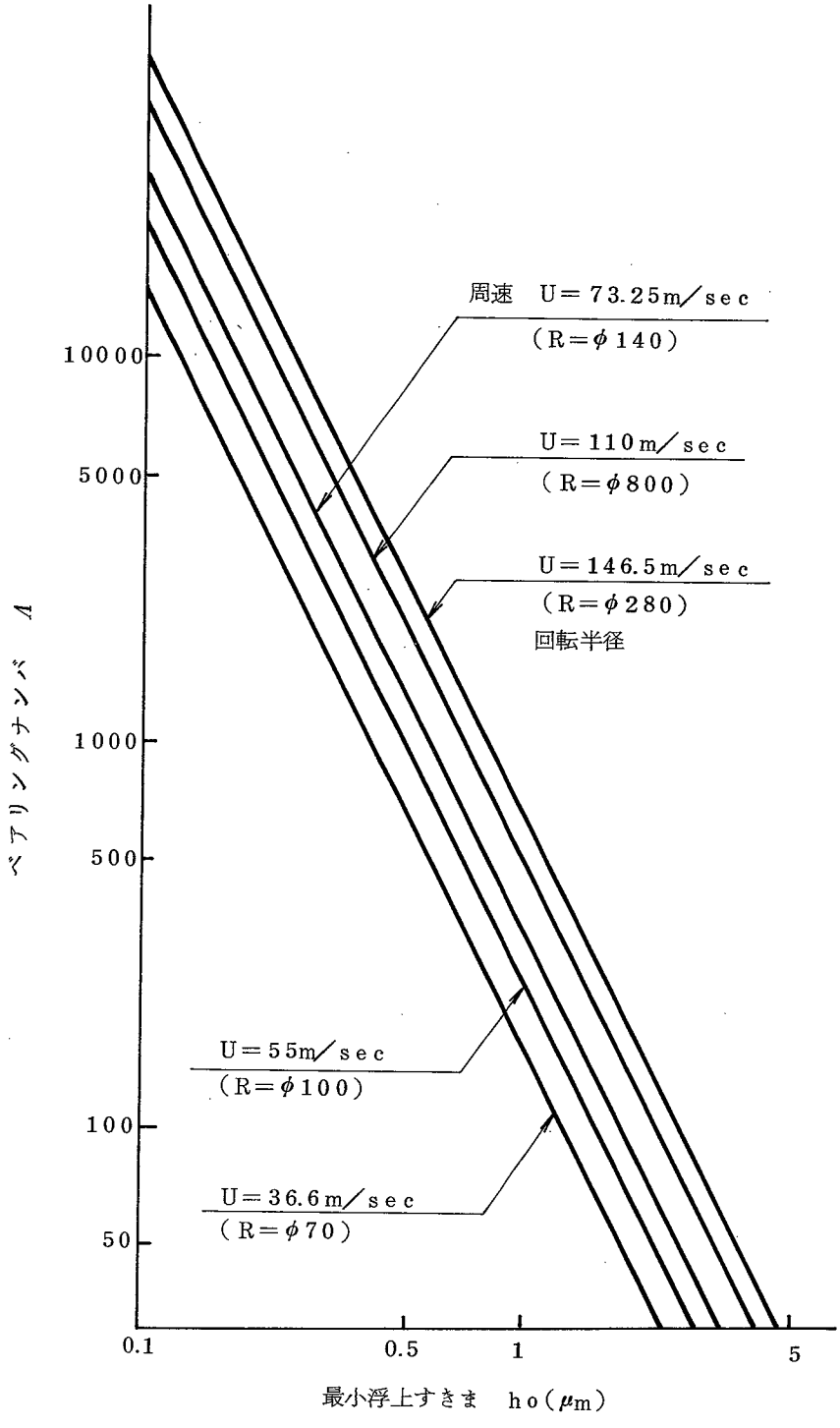


図 8.4　ディスクヘッド相対速度に対する浮上すきまとベアリングナンバの関係

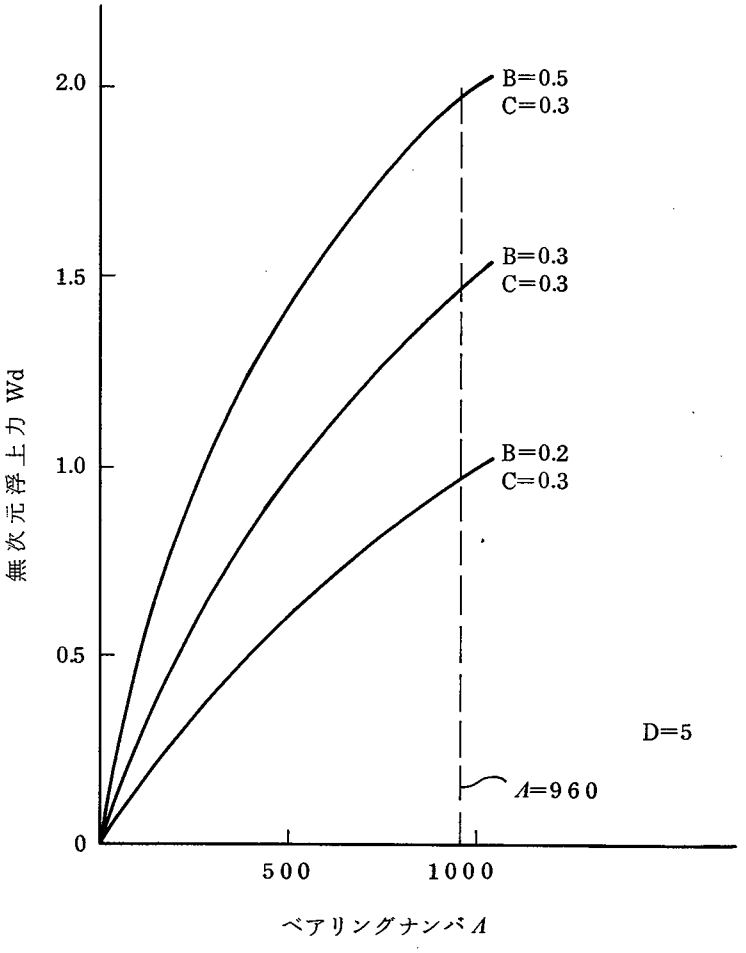


図 8.5　ベアリングナンバと無次元浮上力の関係

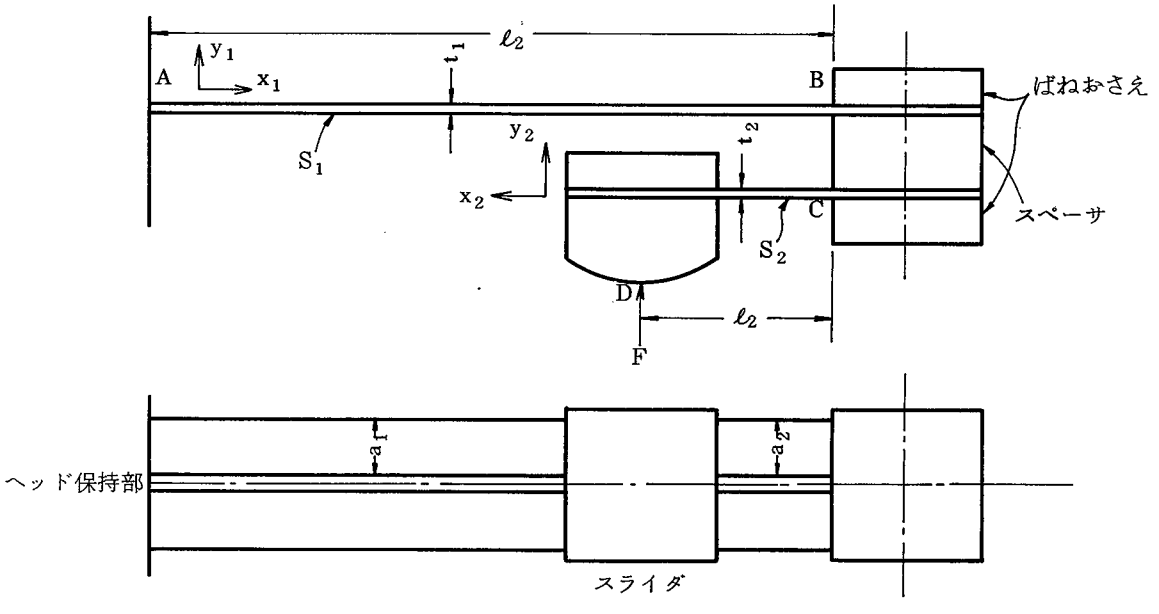


図 8.6　磁気ディスク用ヘッド支持機構

出し高さ $\delta = 2.5\,\mu m$ を考慮して Λ と W_d の関係を設計図表より求めると図8.5のようになる。図8.5における $B = 0.2$，$\Lambda = 960$ の W_d は0.97であり，（8.4）式の浮上力の式から，$w_d = 31\,gf$ となる。これはスライダ片側の浮上力なので両側では62gfである。

2.3 支持ばねの変形特性

(1) ばねの各部たわみとスライダ部変位

ヘッド浮上力Fをうけたとき，図8.6のような支持機構をもつばね系のたわみ形状を求める。

ばね S_1 と S_2 の変形量を算出し，重ねあわせる。浮上面中央にFをうけたとき，S_1 に作用するモーメントはB点で上向きに加わる力 F_1 によるもの　$M_1 = -F(-x+\ell_1)$ と S_2 を介してB点に働く回転モーメント　$M_2 = F\ell_2$ の和となる。この関係をモーメント図8.7に示した。全モーメントは $M = M_1 + M_2 = F(x - \ell_1 + \ell_2)$ となり，

$EI_Z \dfrac{d^2y}{dx^2} = -M$ の関係から S_1 の形状は

$$y_1 = -\frac{F}{6E_1 I_{Z_1}}\{x_1^3 - 3(\ell_1 - \ell_2)x_1^2\} \qquad (8.5)$$

となる。但し，

E_1：ばね材料（銅－ニッケル合金圧延板）のヤング率
$1.5 \times 10^4\,kgf/mm^2$

I_{Z_1}：断面二次モーメント　$\dfrac{a_1 t_1^3}{12}$

（境界条件　$x_1 = 0$ において $\dfrac{dy_1}{dx_1} = 0$，$y_1 = 0$　）

である。また各点のたわみ角は

$$\frac{dy_1}{dx_1} = -\frac{F}{2E_1 I_{Z1}}\{x_1^2 - 2(\ell_1 - \ell_2)x_1\} \qquad (8.6)$$

より計算する。

S_2のたわみは，一端固定梁の先端に力Fを受けたときの変形として求め，

$$y_2 = -\frac{F}{6E_2 I_{Z_2}} \{ x_2^3 - 3x_2^2 \ell_2 \} \qquad (8.7)$$

となり，たわみ角は

$$\frac{dy_2}{dx_2} = -\frac{F}{2E_2 I_{Z_2}} (x_2^2 - 2\ell_2 x_2) \qquad (8.8)$$

である。但し，境界条件 $x_2 = 0$ において $\frac{dy_2}{dx_2} = 0$ ，$y_2 = 0$ を入れている。また

また y_1 と y_2 の座標軸は同一ではない。

式（8.6）と（8.8）の重ねあわせを同一座標上で行なえば，S_2の先端の変位が算出できる。式の変形によっても可能であるが，複雑になるので図上で近似的に行なう。

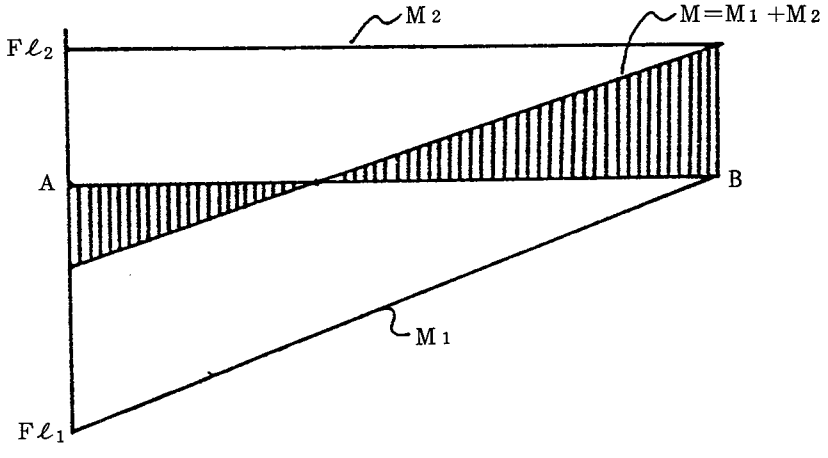


図8.7　ばねS_1に作用するモーメント

図8.8において，A－B－C－Dは変形前のばね系，A－B_0－C_0－D_0は変形後のものである。今D－D_0間の上下移動量を算出する。まずB－B_0間は（8.6）式でx_1＝＝ℓ_1として

$$y_{1(\ell_1)} = K\ell_1^2 (2\ell_1 - 3\ell_2) \qquad (8.9)$$

$$（但し\quad K = \frac{F}{6E_1 I_{Z_1}}）$$

$B_0 - C_0$ 間は上下ばねの間隔で2mm，S_1 が変形し S_2 が変形前のD点の位置をD′としてこの位置を求める。$C_0 - D'$ は水平に対して θ の傾きをもつ。この角度は B_0 点におけるばね S_1 への接線の傾きで，これは（8.6）式より

$$\tan\theta = 3K\ell_1(\ell_1 - 2\ell_2) \qquad (8.10)$$

となる。したがってD′のY座標は

$$y_{1(\ell_1)} - 2 - \ell_2 \tan\theta = K(2\ell_1^3 - 6\ell_1^2\ell_2 + 6\ell_1\ell_2^2) - 2 \qquad (8.11)$$

と表わせる。ここでばね S_2 のたわみを加えると D_0 の位置がでる。式（8.8）より $x_2 = \ell_2$ における変位は

$$y_{2(\ell_2)} = \frac{F}{6E_2 I_{Z_2}} \cdot 2\ell_2^3 \qquad (8.12)$$

となるが，ばね S_1 と S_2 を同一材料とし（$E_1 = E_2$）厚みを $t_1 = t_2 = 2:1$ とすると

$$y_{2(\ell_2)} = 16K\ell_2^3 \qquad (8.13)$$

となる。これより D_0 の位置は

$$2K(\ell_1^3 - 3\ell_1^2\ell_2 + 3\ell_1\ell_2^2 + 8\ell_2^3) - 2 \qquad (8.14)$$

となり，もとの位置との差は（8.11）式の第1項が S_2 先端の変位をあらわす。すなわち変位dは

$$d = \frac{2F}{6E_1 I_{Z_1}}(\ell_1^3 - 3\ell_1^2\ell_2 + 3\ell_1\ell_2^2 + 8\ell_2^3) \qquad (8.15)$$

であり，ばね系のたわみこわさは

$$\frac{F}{d} = \frac{6 E_1 I_{Z_1}}{2 (\ell_1^3 - 3 \ell_1^2 \ell_2 + 3 \ell_1 \ell_2^2 + 8 \ell_2^3)} \qquad (8.16)$$

となる。

一方，変形状態でヘッドの姿勢がディスク面に対して平行であり，したがって最小浮上すきまの位置がコアギャップ部となるためには図8.8のD_0点におけるS_2への接線は水平でなければならない。これがばねS_1とS_2の長さℓ_1とℓ_2の関係を決める。具体的には式（8.6）と（8.8）の$x_1 = \ell_1$，$x_2 = \ell_2$における接線の角度が等しくなるように決定すればよく，その関係は$\ell_1 : \ell_2 = 4.5 : 1$となる。こうして決めた実際の寸法例を表8.1に示す。（8.16）式よりたわみこわさは，26.47gf／mmで浮上すきま0.5 μmに対して2.34mmの変位となる。

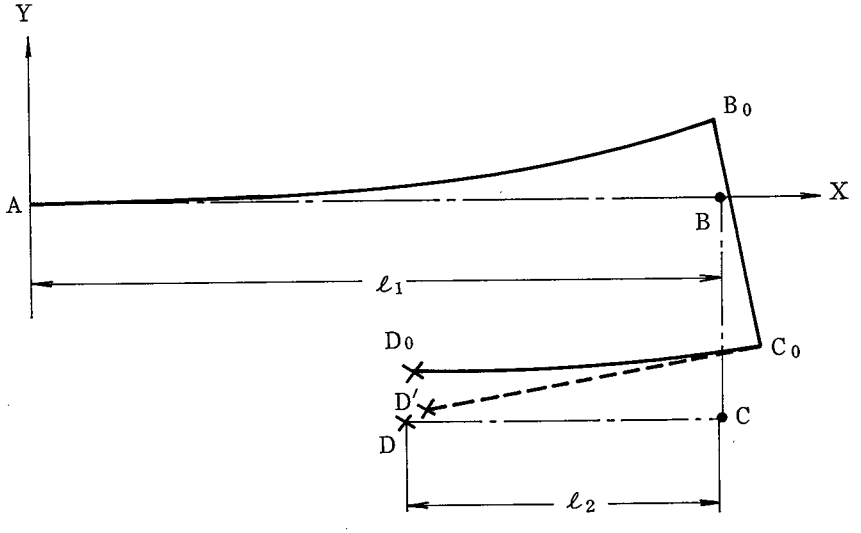


図8.8　支持ばねのたわみ

(2)　ねじりこわさ

ばね系のねじりこわさは，多対平行ばねの場合を参考にして算出できる。すなわちねじりこわさφは

$$\varphi = \frac{a_1 t_1 E_1}{\ell_1^3} a_1^2 v_1^2 + \frac{a_1 t_1 E_1}{\ell_1^3} t_1^2 u_1^2 + \frac{K_4 a_1 t_1^3}{\ell_1} G \qquad (8.17)$$

であらわされる[804]。ただし，v_1 は平行ばねにおける上下ばね間隔に相当するため，本支持ばねでは零となる。また u_1 は，平面における2枚ばねの間隔の1／2に相当する値であり，K_4 はばねの幅と厚さの比によって決まる係数である，表8.1のばねでは約0.74，Gは横弾性係数である。なお，系全体のねじりこわさはばね S_1 と S_2 の各々のこわさ φ_1 と φ_2 の調和平均として求められる

$$\varphi = \frac{\varphi_1 \cdot \varphi_2}{\varphi_1 + \varphi_2} \times 2 \qquad (8.18)$$

表8.1における各寸法より算出すると

$$\varphi_1 = 4.6\,\mathrm{kgf \cdot mm/rad}$$

$$\varphi_2 = 3.4\,\mathrm{kgf \cdot mm/rad}$$

$$\varphi = 3.9\,\mathrm{kgf \cdot mm/rad} \quad ,$$

ヘッドの傾きに対する復元モーメントはスライダ片側のみの浮上力の変化率 $\partial w/\partial h_0$ によってきめられる。w_d と h_0 の関係図8.9より $-\partial w/\partial h_{0\,(h_0=0.5\mu m)}=80\,\mathrm{gf}/\mu\mathrm{m}$ を得る。これより浮上状態における復元モーメントは

$$80\,\mathrm{gf}/\mu\mathrm{m} \times 3 \times 10^3\,\mu\mathrm{m/rad} \times 3\,\mathrm{mm} = 720\,\mathrm{kgf \cdot mm/rad}$$

となり，支持ばねのねじりこわさは1／185で復元性がよい。

表8.1　試作ヘッド支持ばね寸法

幅 a_1 (mm)	幅 a_2 (mm)	厚み t_1 (mm)	厚み t_2 (mm)	長さ ℓ_1 (mm)	長さ ℓ_2 (mm)
1.5	1.5	0.2	0.1	13.5	3.0

(3)　表皮応力

ばね S_1，S_2 の変形時生ずる最大表皮応力は次式より算出する。

$$\sigma_{max} = \frac{E \cdot d \cdot t}{\ell^2} \qquad (8.19)$$

ここに　E：ばね材料のヤング率，d：たわみ

t：ばね厚さ，ℓ：長さ　である。

S_1，S_2 それぞれについて計算すると，

$$\sigma_{max(S_1)} = 24\ kgf/mm^2$$

$$\sigma_{max(S_2)} = 30\ kgf/mm^2$$

で材料の限界応力 45kgf/mm^2 より小さく実用可能である。

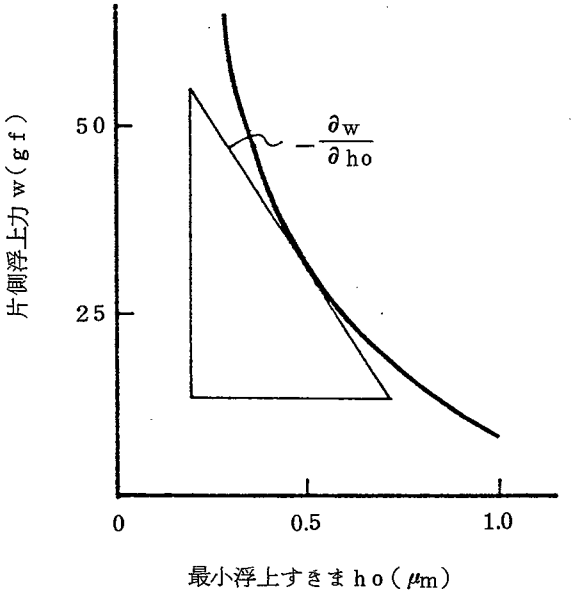


図 8.9　最小浮上すきまと浮上力の関係

2.4　振動特性

浮動ヘッドとして動作中，回転するディスク面の周期的振動のため，これと空気ばねで結合された浮上面も正弦関数的に変位する。この場合の系の振動状態を検討することにより，浮上面のディスク面に対する追随性の目安を得る。

ばね系のモデルは図 8.10 で表わせる。k_1，k_2，k_3 はばね S_1，S_2 および空気ばねのこわさで，m_1，m_2 は折り返し部，スライダ部の質量である。系の振動の基本式は

$$\begin{cases} m_1 \ddot{x}_1 = -k_1 x_1 + k_2 (x_2 - x_1) \\ m_2 \ddot{x}_2 = -k_2 (x_2 - x_1) + k_3 (h - x_2) \end{cases} \qquad (8.20)$$

（h：すきま変動）

である。系の共振点は自由振動における自然振動数に対応するので（ 8.20 ）式を定数整理して共振周波数を計算すると，

$$p_{1,2}^2 = \frac{a+d}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{a-d}{2}\right)^2 + bc} \qquad (8.21)$$

ここに

$$\begin{cases} a = \dfrac{k_1 + k_2}{m_1}, \quad b = \dfrac{k_2}{m_1}, \quad c = \dfrac{k_2}{m_2}, \quad d = \dfrac{k_2 + k_3}{m_2} \\[2ex] k_1 = \dfrac{-E_1 \times a_1 \times t_1^3}{\ell_1^2 (3\ell_2 - 2\ell_1)}, \quad k_2 = \dfrac{E_2 \times a_2 \times t_2^3}{2\ell_2^3} \\[2ex] k_3 = 150 \times 10^3 \ \mathrm{gf/mm} \qquad (\text{浮上力曲線の変化率} \quad \partial w / \partial h_0) \\[2ex] m_1 = \dfrac{0.26\ \mathrm{gf}}{9800\ \mathrm{mm/sec^2}} \qquad m_2 = \dfrac{0.2\ \mathrm{gf}}{9800\ \mathrm{mm/sec^2}} \end{cases}$$

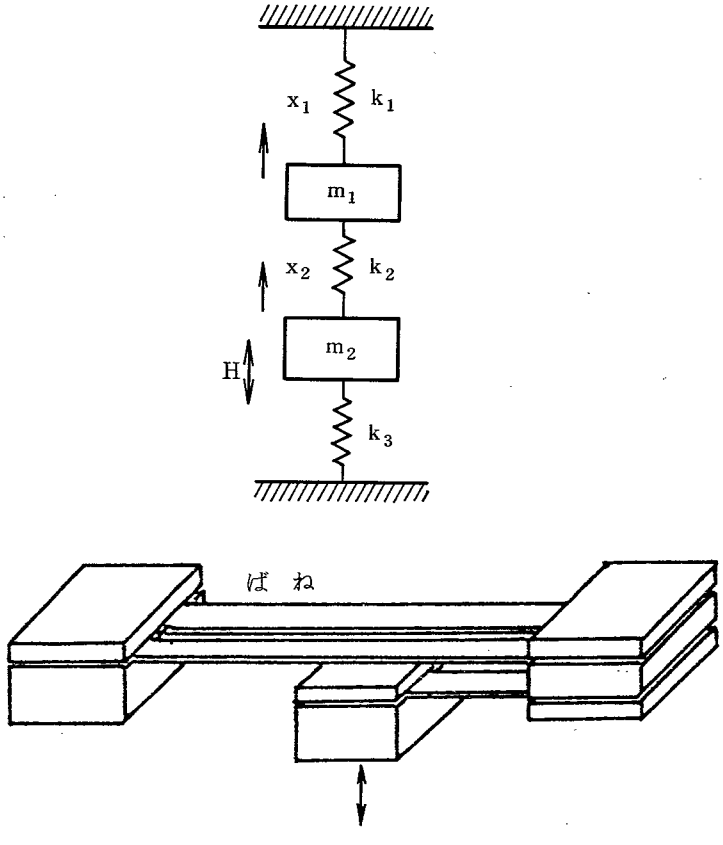


図 8.10　支持ばね系の振動モデル

となり，各数値を代入して各々

$$p_1 = 2.2\,\mathrm{kHz}, \quad p_2 = 86\,\mathrm{kHz}$$

が求められる。この値はディスクの回転周期約100Hzに比べて充分に高く，系の追随性性は良好であると推定できる。

3. 磁気ヘッドの製作

磁気ヘッドの製作工程を図8.11に示す。セラミックス小片2枚とフェライト片1枚を使う。(1)フェライト片の両面は非接触形の加工により，無ひずみの面とする。(2)フォルステライトセラミックスには巻線逃げ用の溝入れを行い，(3)フェライト片を中央にして上下部分をガラス接着する。このときのガラス接着は後の磁気ギャップ部ガラス接着に比べて高融点のガラスを使用する。(4)ガラス接着面に直角に切断する。(5)切断部に溝入れを行い，(6)切断面をポリシング加工する。(7)切断面のフェライト部のみ0.3～0.5μmエッチングする。(8)(4)で切断した片側の小片のつきあわせ面もポリシングして，溝入りの小片とつきあわせてガラス

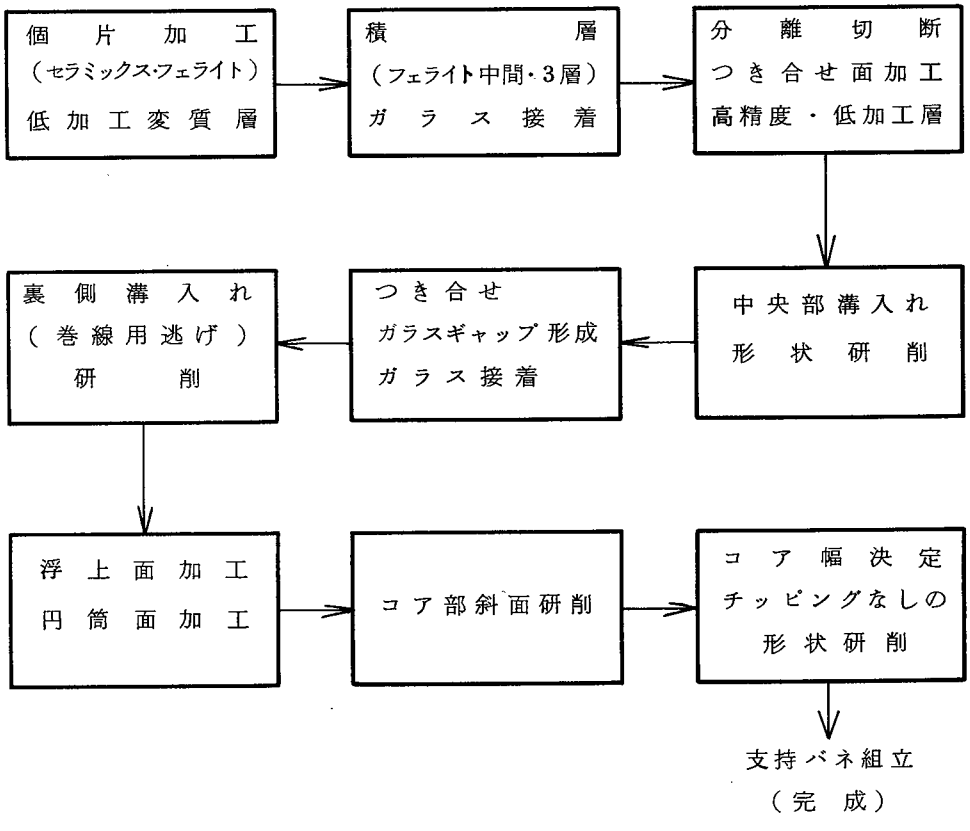


図8.11　磁気ヘッド製作工程

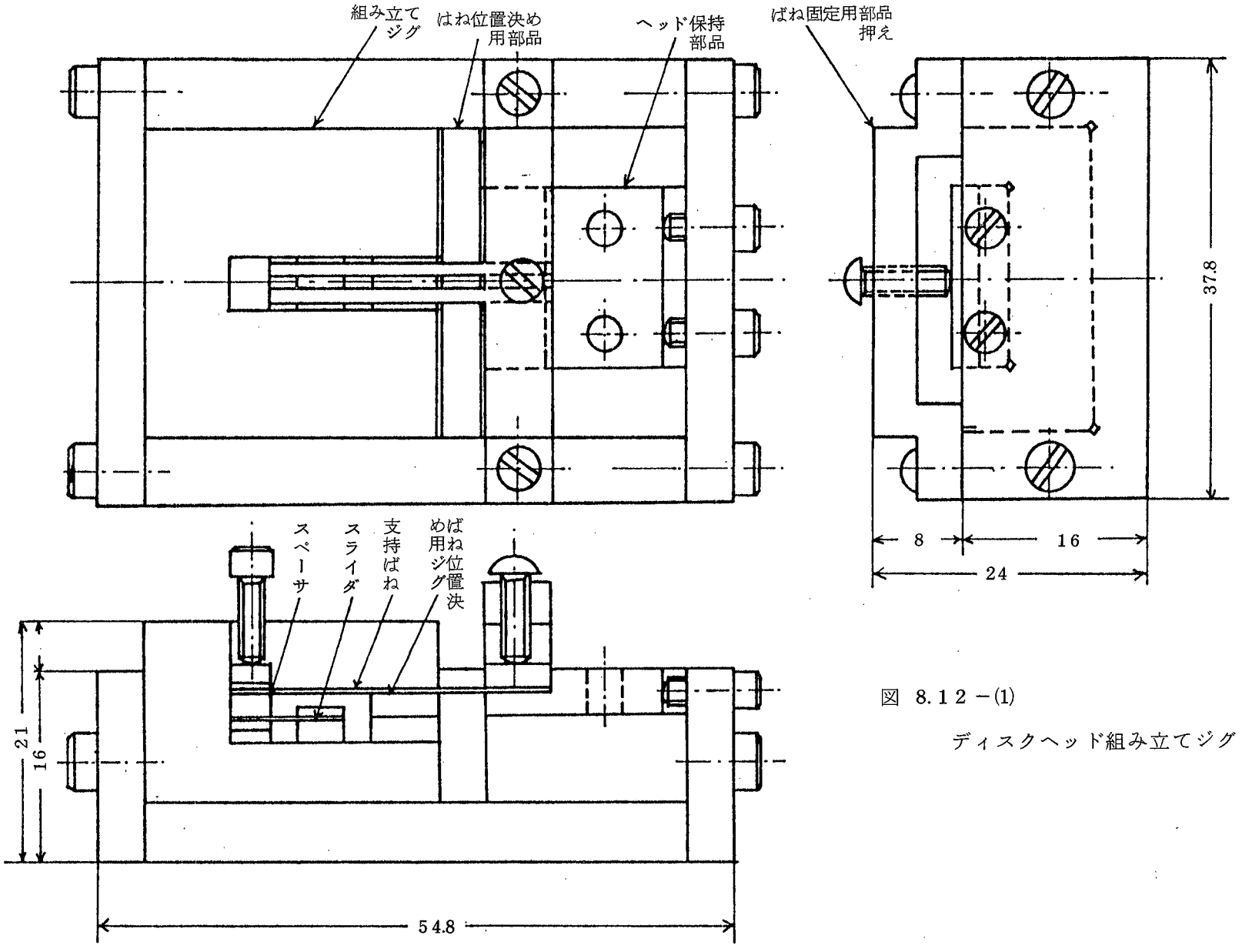


図 8.12－(1)

ディスクヘッド組み立てジグ

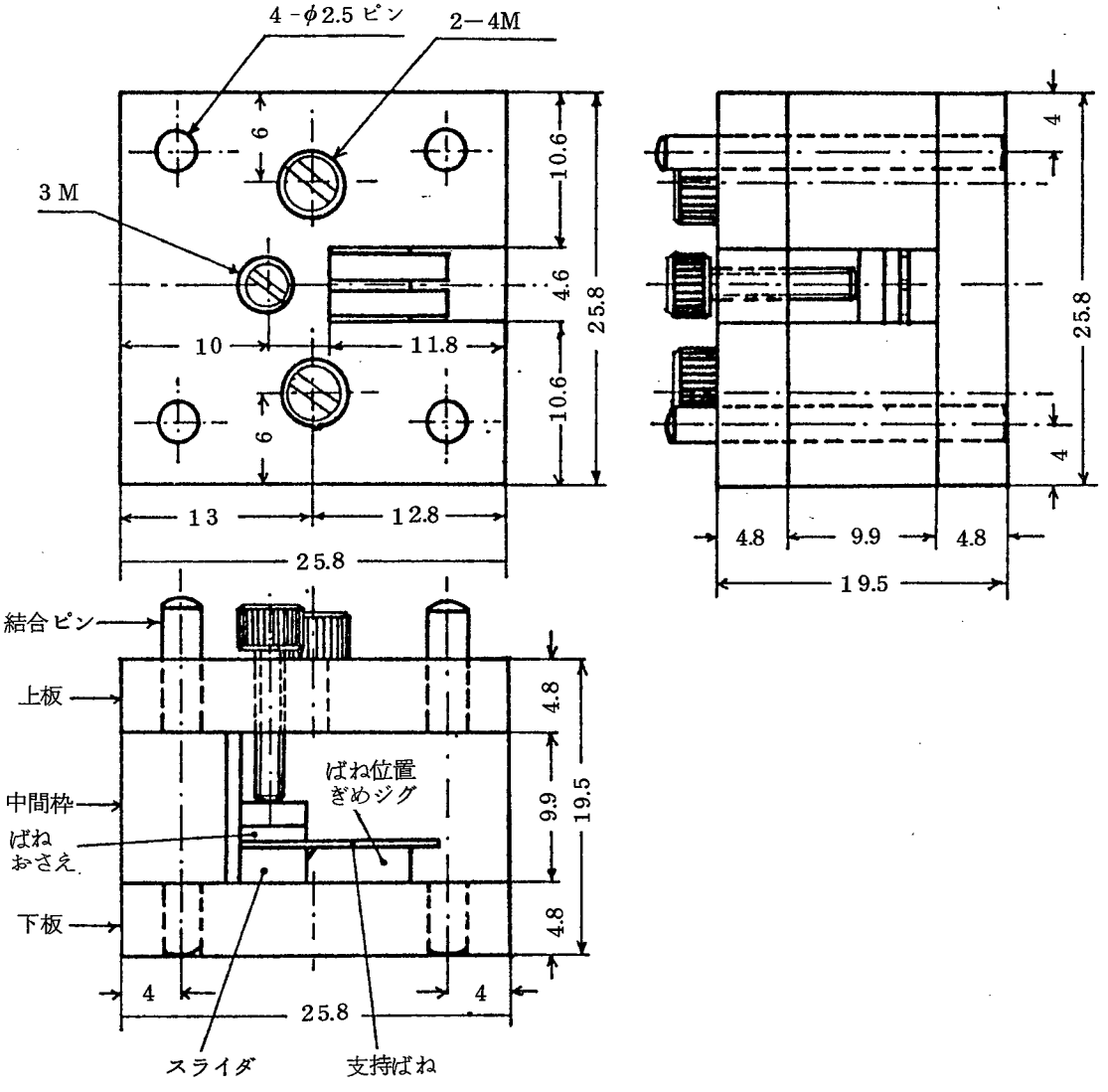
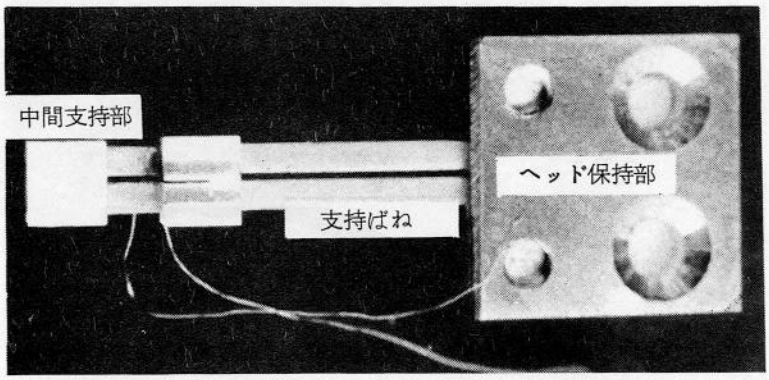


図 8.12－(2)　ディスクヘッド組み立てジグ

接着する。(9)形成されたブロックは上下で2ヘッド分となっており，これを切り離して個片とする。(10)浮上面の円筒面加工を行う。(11)スライダ幅決め，およびフェライトコア部トラック幅決め用の溝研削を行う。これによってスライダ個片は完成する。次に二段折り返し形の平行ばねとするため，ばね個片および，ばね押え用セラミック小片を製作し，治具（図8.12）を使ってこれらを組立てる。試作したヘッドの外観を図8.13に示す。中央部トラック幅は25～100μmの間で3種類製作した。浮上面の円筒面突き出し高さは約2.5μmである。



1mm
ヘッド正面

図8.13　試作した磁気ディスクヘッド外観

4. 試作ヘッドの特性

4.1　静的な変形特性

図8.14に実験の方法を示す。ヘッド保持部を固定し，万能投影機微動台上に載せる。浮上面中央に外部で固定した球（φ4mm）先端を接触させる。透過光で暗視野像（拡大率10倍）を映し，マイクロメータ移動量に対するヘッド各部の変位を読みとった。測定量は微動台移動量dmm（浮上面の変位に相当）に対する，ばねS_1の終端における変位$d_1$mm，スライダ部ばねおさえ板面の水平線からの傾き角θ，およびこれら諸量が球の接触位置を変えたことによって生ずる変化量である。

図8.15は，ばねS_1とS_2の終端におけるたわみ角が等しくなるように力の作用点を調整したときのばね部の変形過程である。浮上面における変位量0.5mmから2.0mmまでヘッドの姿勢は水平で安定している。一方，図8.16は球の位置をxの正方向に1mm移動したために系の曲げモーメントが小さくなった場合，図8.17は逆方向に移動したためにモーメントが大きくなったときの変形状態である。図8.16，8.17，各々の場合，最小浮

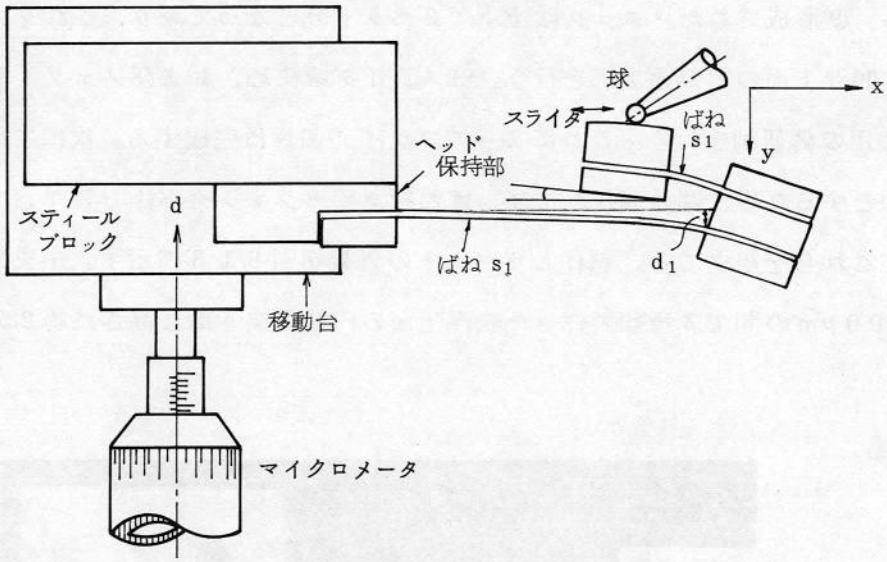


図 8.14　ディスクヘッドの静的たわみ実験

(1)たわみ 0 mm

(2) 0.5mm

(4) 1.5mm

(3) 1.0mm

(5) 2.0mm

図 8.15　静的な変形特性

図 8.16　中心位置からのずれ＋1mm
たわみ 2.0mm

図 8.17　中心位置からのずれ－1mm
たわみ 2.0mm

力の作用位置の違いによるヘッド姿勢
のちがい

上すきまの位置（浮上力最大の位置）は球の位置とは逆方向である。このため，各々ヘッドの姿勢が回復するようなモーメントの増減が行なわれ，設計通りの安定な姿勢で落着くことになる。このことから，本支持機構でも走行方向における姿勢の復元性をもつことが確かめられた。

図8.18は，ばねS_1 終端における変位量とヘッド浮上面の変位の関係を示している。ばねS_1 のたわみから（8.16）式を使って各変位量に相当する力Fを算出した。これを(8.15）式に代入して，ヘッド浮上面の変位に換算し，実測値と比較したものである。計算における近似とは逆に，たわみの小さい領域で差が大きいのは，ばねの残留応力が除ききれていないためと考えられる。浮上すきまと浮上力の関係の図8.9と併用して，浮上面の変位から浮上量の概略値が算出できる。

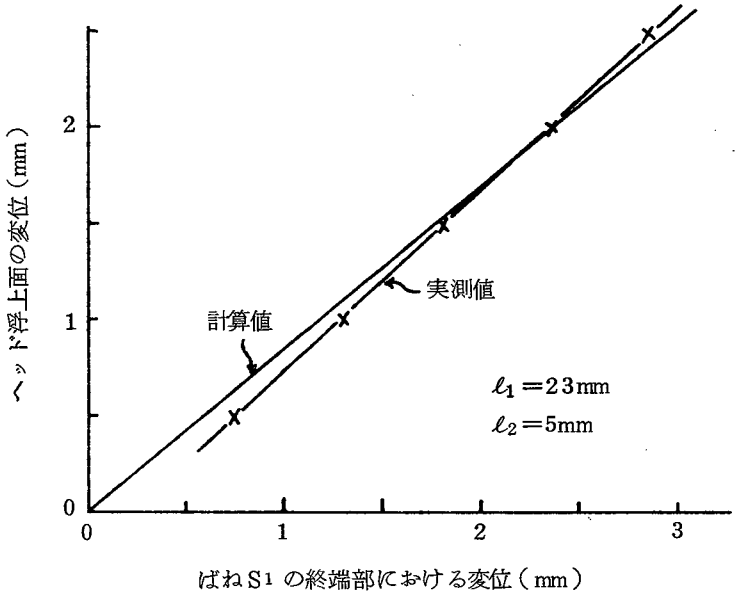


図8.18　支持ばねの静的たわみ特性

4.2　浮上試験と磁気特性の測定

浮上実験用の回転系を図8.19に示す。回転軸は静圧型空気軸受で高周波スピンドルにより，高速で安定な回転を保持する。ヘッドは設定時の姿勢が調節できるように三本の調節用ネジをもつジグ（図8.20）にとりつけた。浮上試験では回転ガラス円板の下面にヘッド浮上面を近接させ，斜め上方からナトリウムランプで照射して反対側から望遠鏡で干渉縞を観察した。静止状態で最近接位置を決めておき，円板回転後，ジグ全体を押しこみながら浮上すきまを小さくしていった。

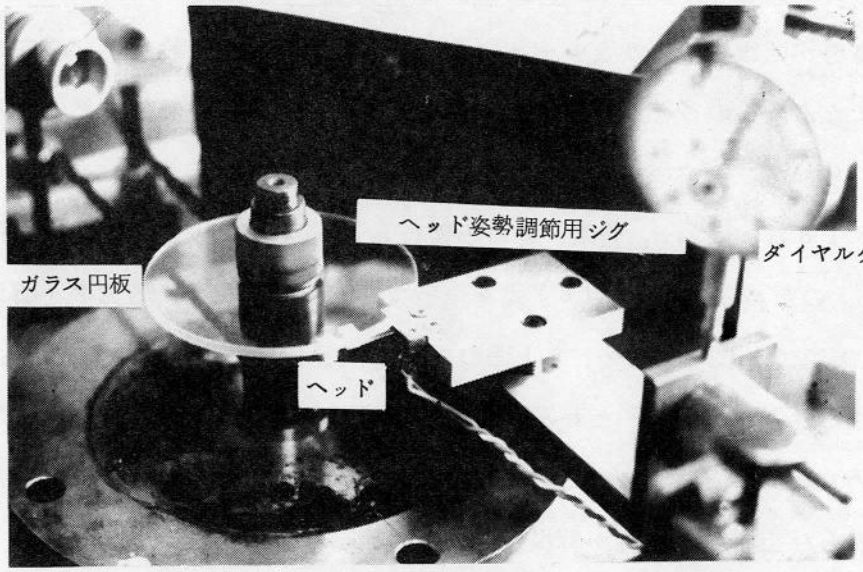


図 8.19　浮上試験，記録再生特性測定用ディスク装置

浮上試験では試作ヘッドが安定に浮上することを確かめた。ガラス円板の回転時における面振れは1回転を1周期と3周期とする2種類あり，振幅は各々15μmと1μmである。図8.21に示すように定常状態における干渉縞は静止しており，前記面振れにも充分追随し，安定に浮上している。

記録再生の特性は，ガラス円板に代えて磁気ディスク（アルミナセラミック上に磁性媒体形成）円板を用いて測定した。まず書き込み消去電流と再生出力電圧の関係を求め，出力電圧が最大となる書き込み電流で，再生出力の周波数特性を把握した。測定装置の構成は前記回転体のほか，磁気ヘッドの記録・再生器である。測定装置の簡単な回路系統を図8.22に示す。

図8.23は書き込み電流に対する飽和特性である。再生出力の最大となる書き込み電流により，周波数特性を測定する。図8.23における値は40mAであり，以後の特性の記録電流値とした。この時用いたディスク媒体高分子保護膜付き，Ni－Pメッキ媒体であり，Br約10,000，Hr 550，膜厚0.2μmである。用いたヘッドの仕様は表8.2に示す。図8.24は浮上すきまの推定値に対する再生出力の特性である。横軸は入・出力波形における1秒あたりの反転回数を示すもので周波数に依存する。図において最高出力の1／2にあたる周波数領域までが記録再生可能の領域とすると，浮上すきま0.3μm（推定値）においては，測定器使用限界の20M以上であり，これを1mmあたりの記録密度になおすと600bit／mm以上（$=20\times10^6/34\times10^3$ mm/sec）となる。また図8.25～26は

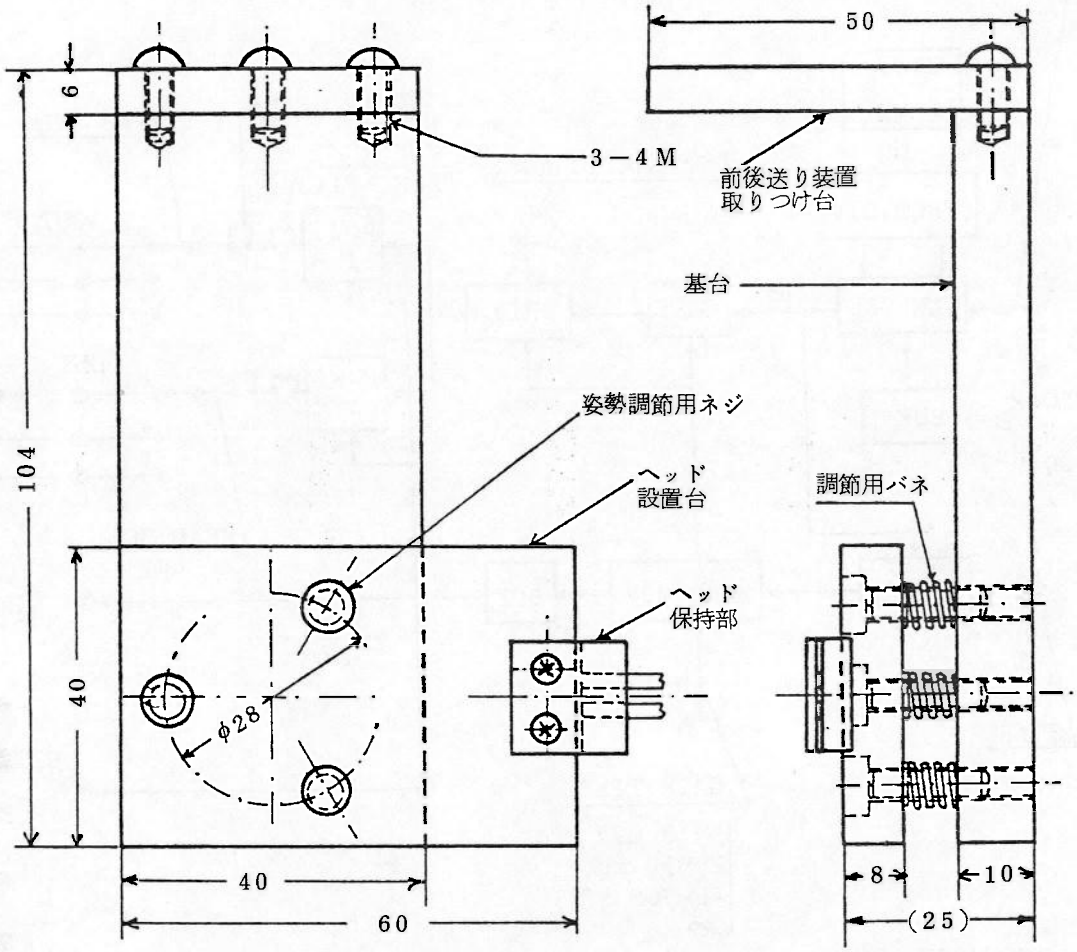


図 8.20　ディスクヘッド設定姿勢調節用ジグ

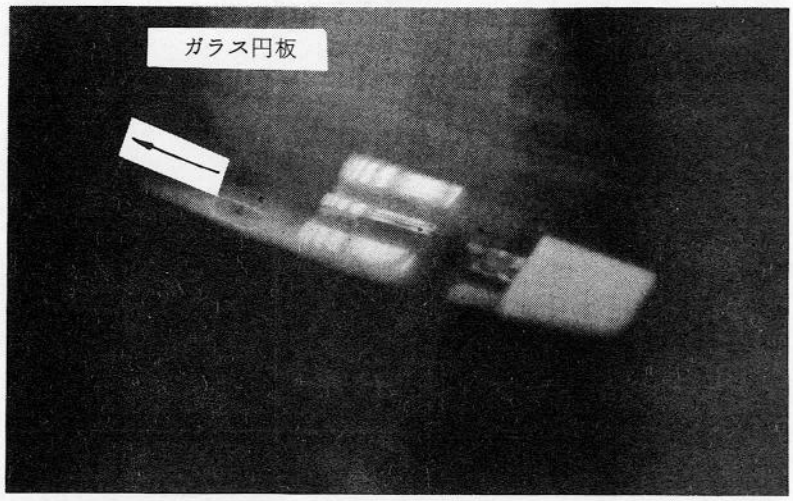
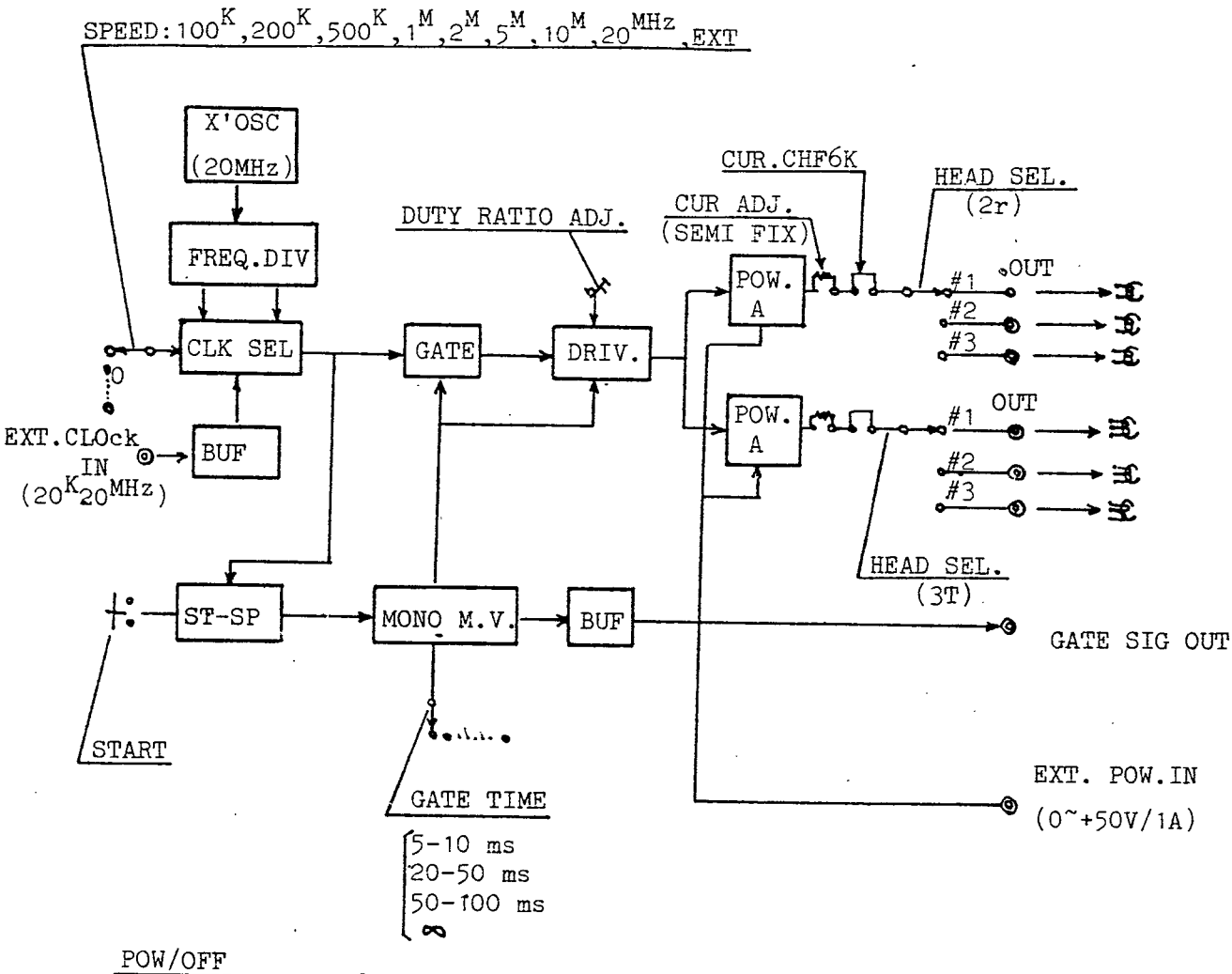
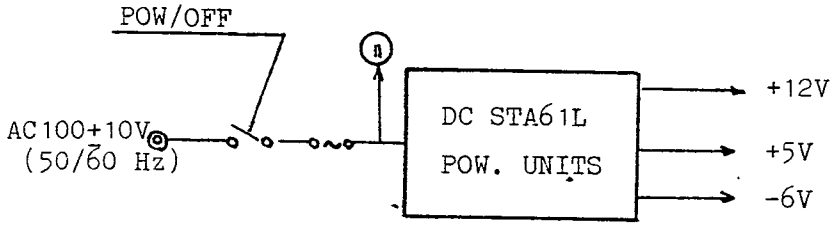
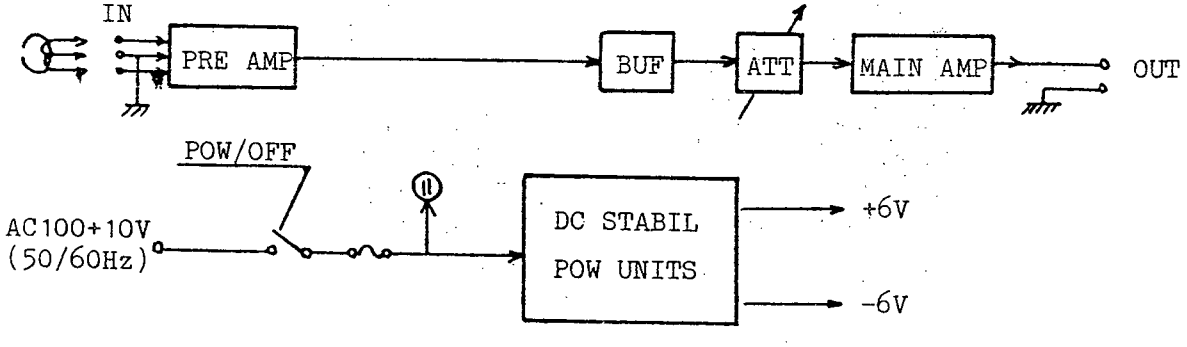


図 8.21　浮上状態の干渉縞





(a) 記録回路



(b) 再生回路

図 8.22 記録・再生における回路機能概要

表 8.2　磁気ヘッド仕様

トラック幅	巻　線　数	ギャップ長	つき合せ深さ
100μm	10－10	0.4～0.5 μm	10～20μm

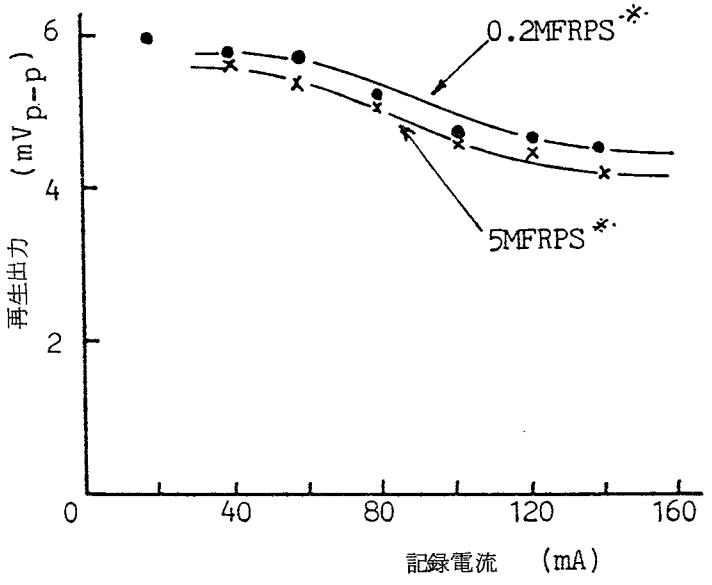


図 8.23　飽　和　特　性
(※ MFRPS : Mega Flux Reversal Per Second)

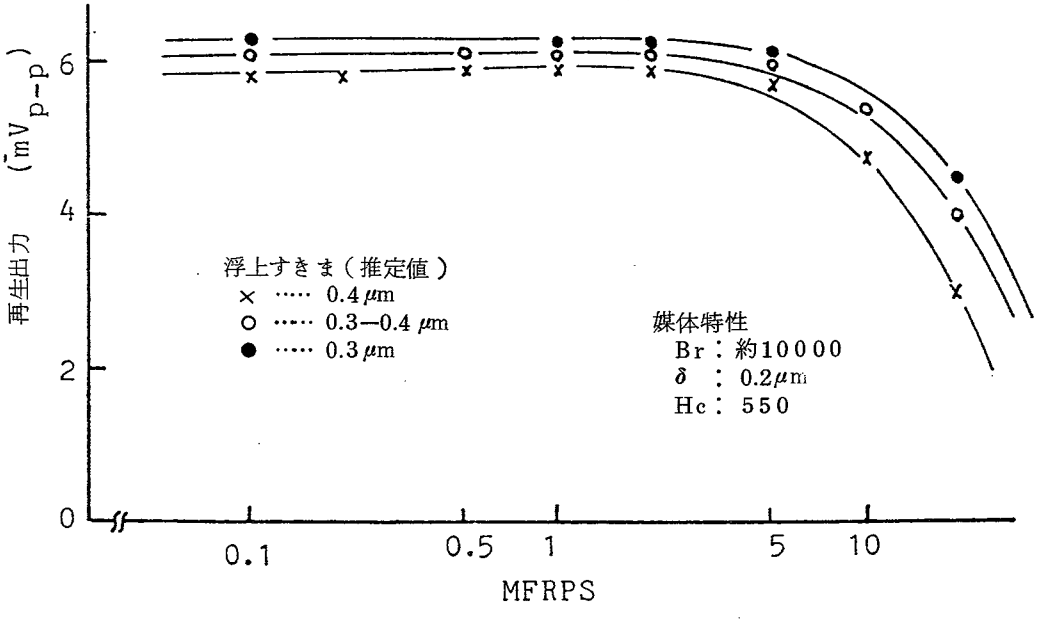


図 8.24　再生出力特性(書込み電流 40mA, 周速 34m/sec)

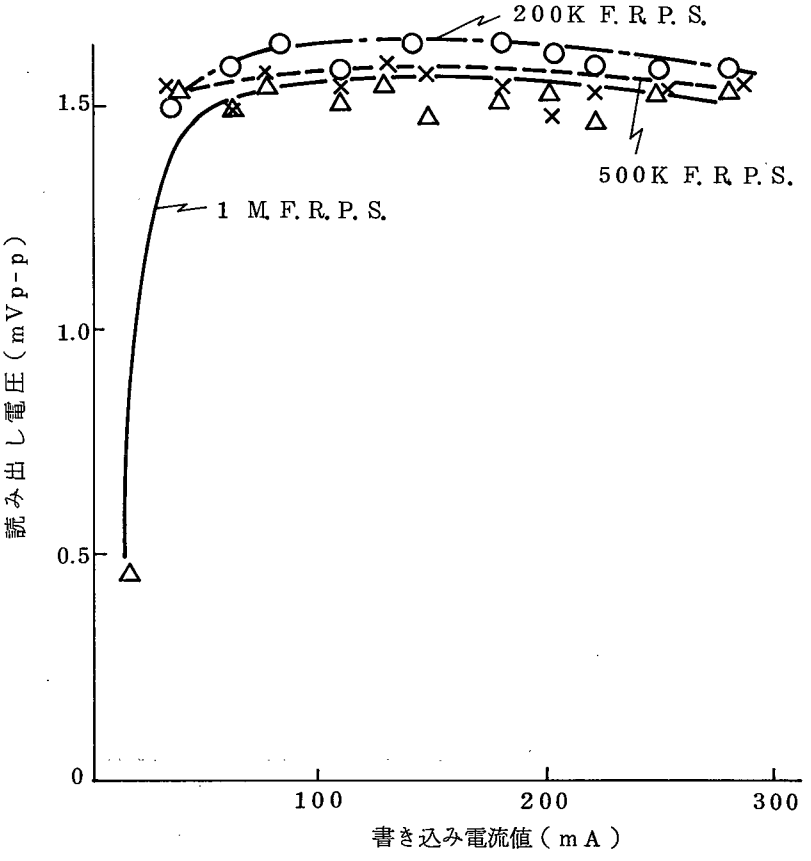


図 8.25　試作ヘッドの飽和特性

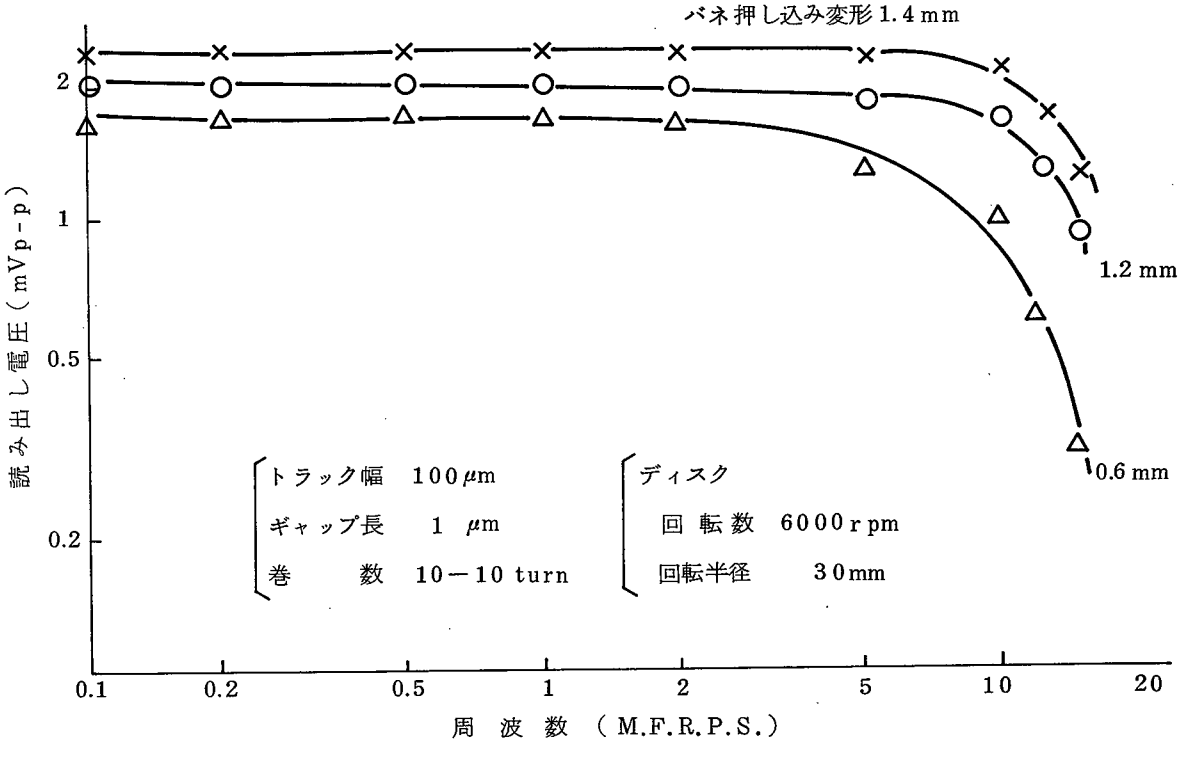


図 8.26　試作ヘッドの再生出力の周波数特性

同一ヘッドを焼結セラミックス上に酸化物磁性媒体をスパッタリングしたディスクを用いた場合の飽和特性と再生出力の特性である。この場合，ディスク媒体の記録トラック部における周速は18m／secであり，最大出力の1／2の出力となる値は外挿で18M付近まで延びており，最高記録密度約1000bit/minを実現していることがわかる。

このように本ヘッドにおいて，高記録密度を実現した理由としてフェライトコア加工の高精度化と加工変質層の低減化およびヘッド構造の適正化にあると考えられる。本ヘッドにおいてはコア側面の加工変質層の影響を少なくするため，コア先端の記録・再生に関連する部分のみを狭幅化研削し，その研削において第7章に述べた新形レジノイド結合砥石を用いて欠けや加工変質層を低減化したこと。またコア側面の加工では第5章に述べた非接触式の加工法を採用し加工変質層を極小化したこと。コアのガラスギャップ形成面の加工にはメカニカル・ケミカルポリシングを行ない，欠けをなくし，加工変質層も低減させたこと。ガラスギャップの形成は低融点ガラスの作業温度で行ない，フェライトとの相互拡散を防いだこと。等々が要因としてあげられる。

5. 本章の総括

第4章から第7章までのフェライトの加工，磁気ヘッドの製作に関する技術の研究を総括する意味で，新形の磁気ディスク用ヘッド構造を考案して，その製作と評価を行った。

スライダ・ヘッド構造では，記録，再生効率が高く，コア側面加工の変質層による透磁率低下がおこりにくい，先端狭幅化形のヘッドとしたこと，従来のコェライトコアを別途形成しておき，これをスライダにガラス接着で埋め込む方式に対して，ヘッドギャップ形成前にスライダ用セラミックスに固着しておき，最後にギャップ形成を行う構造としたこと，これによってガラスギャップ形成におけるガラス・フェライトの相互拡散が除き得ることなどの特徴をもつ。また支持ばね方式では，組立てが簡単で安定な浮上姿勢を保つ二段片持平行ばねを用いた。

本設計ヘッドに対して，フェライトの加工，ガラス接着技術を適用して磁気ディスクヘッドを試作し浮上の特性と磁気記録・再生特性とにより評価した。その結果，1000bit/mmという高記録密度を達成していることが明らかになり，提案した磁気ヘッド構造，支持ばね系の有効さと，フェライトの精密加工，磁気ヘッドの製作技術が証明された。

参　考　文　献

801）　渡辺純二・上野嘉之ほか：昭和４７年精機学会秋季大会（１９７２）１８１

802）　松田隆一，星谷邦夫：通研成報第７４４７号（１９７３）

803）　金子礼三：通研成報　第４６８３号（１９６９）

804）　松田隆一ほか：通研成報 第６００９号（１９７１）

第 9 章　結　　論

本研究では，フェライト結晶の加工特性，特に加工変質層の物性に及ぼす影響を系統的・定量的に明らかにし，これを基礎として，高精度の加工技術を開発して，高性能磁気ヘッドの製作技術を確立することを目的とした。磁気ヘッド性能を左右する物性としての透磁率は，構造敏感特性であり，わずかな結晶構造の乱れ，ひずみによって著しく低下する。したがって被加工結晶の透磁率を測定することにより，加工法の適否が評価できる。本研究では磁気回路に平行および垂直に挿入された加工変質層が透磁率の低下に及ぼす影響を定量的に測定し，これを基に透磁率低下の機構を考察した。またフェライトとガラスの相互拡散による透磁率変化も測定し，相互拡散がほとんどなく透磁率の低下しないガラス接着条件を検討した。結晶材料の物性変化に対して加工変質層が果す影響の大きさを確認し，加工変質層の生じない加工技術の開発を，EEMの原理に基づく大形平面非接触加工法として実現した。また，十数回にわたる磁気ヘッド製作工程における重要技術の検討を行ない，総合して独自に設計した磁気ディスク用ヘッドの製作に適用して評価した。

本研究の結論を総括すると次のとおりである。

I　フェライト結晶の加工特性について

(1)　砥粒加工特性

(a)　フェライト結晶は極く微小な変形においては，脆性破壊のない塑性変形の領域が存在する。これが鏡面研削や通常のポリシングを実現する原理である。塑性変形の領域を越えると脆性クラックが発生しはじめる。

(b)　多結晶焼結フェライトでは加工痕近傍に粒子脱落現象がみられる。粒界結合力の弱い材料にその傾向が著しい。

(c)　大粒径による研削やラッピングでは，結晶の脆性破壊による加工が主体的である。したがって単結晶フェライトなどクラックの伝ぱしやすい材料で加工面は脆性破面より形成される。

(2)　加工変質層

(a)　角錐の引っかきと押し込みによって発生するクラックの深さは各々の荷重に依存し，その関係はべき関数で表示できる。

(b)　単結晶フェライトと焼結多結晶フェライトのクラック伝ぱの特性には差がある。砥粒引っかき痕下のクラックは前者で深いが本数は少ない。これに対して，後者では侵入深

さは小さいが多数の微細なクラックが発生する。

(c) ラッピング・ポリシングにおける加工変質層の深さは使用する定盤の硬さに依存する。硬質定盤では砥粒径分布の粒径差が緩和されないため大粒径砥粒に負荷が集中して加工変質層が深くなる。

Ⅱ 加工変質層による磁気特性の変化について

(1) ラッピング・ポリシングの加工変質層の影響

(a) 磁路に垂直に挿入された加工変質層はその結晶構造の乱れが透磁率の低下をもたらす。測定結果によれば電子回折像で結晶構造的に評価した0.6 μmの加工変質層は約0.2 μmの非磁性層厚さに相当する。

(b) 薄板をラップして作製したコアでは磁路に平行に加工変質層を有し，このときの透磁率は大幅に減少する。これは表面の加工変質層のため内部に生じた残留応力とフェライト結晶の逆磁歪効果に基づくものである。残留応力が圧縮の場合（001）面内の透磁率は磁歪の影響を受けず結晶磁気異方性から

$$\mu_{\varphi} = -\frac{Ms^2}{2K_1}\sin^2\beta$$

と表わされ，引張り応力のときは

$$\mu = \frac{Ms^2}{-\frac{4}{3}K_1 - 3\lambda_{100}\sigma}\sin^2\beta$$

と近似できる。

(c) 約0.4 μmの加工変質層による磁気ヘッドフェライトコアの再生効率の低下は約20％である。この値は磁気的等価回路から導いた再生効率の計算式に材料の透磁率変化を代入して求めた効率変化の値とほぼ一致する。したがってモデル的なトロイダルコアの透磁率の比較により実際のヘッドコアにおける再生効率の相対比較ができる。

(2) ガラスの拡散層の影響

(a) フェライトの接合にガラス接着法を用いた場合，フェライト・ガラス間に相互の拡散現象がみられる。Mn−Zn系への拡散がNi−Zn系の場合より大きく，特に粒界における選択的拡散が生ずる。拡散深さに対して最も影響の大きい要因は接着温度である。

Mn−Zn系フェライトで粒界拡散の大きい泡切れ温度に対して100℃低い作業温度で接着を行うと拡散はIMAでも検知できない程少なくなる。

(b) ガラス成分が拡散したフェライト結晶部の透磁率が低下する。拡散層の透磁率は磁路内に挿入して，薄層ずつ除去しながら磁気抵抗変化を測定することにより評価できる。Mn−Zn系フェライトにおける粒界拡散層は元の初透磁率の1/100程度に低下する。

Ⅲ 加工変質層を生成しない加工法の開発について

(a) 上面に放射状のテーパ面とフラット面を形成した弾性体円板を加工液中で回転させると対向して載置した平面の円板状試料が浮上する。加工液中に微粒子を混入することにより，試料面が極微少量ずつ加工される。したがって，定盤と試料面を接触させることなく，平面加工が可能である。

(b) 定盤と試料面が非接触状態で加工が進行するため，定盤面の摩耗がなく，平面形状の再現性が極めて高い。また粒子に直接，試料面への押付け力が作用しないので加工変質層はほとんど発生しない。

(c) フェライト単結晶のトロイダルコアを加工した場合，透磁率の低下はない。フェライト結晶より加工ひずみの影響を受けやすい半導体シリコン結晶を加工しても，積層欠陥はほとんど発生せず，加工面に形成したショトキトランジスタのリーク電流も生じない。

Ⅳ 磁気ヘッドの製作技術について

(a) 芳香族ポリエステル系樹脂を結合剤とするダイヤモンド微粒砥石は，固体潤滑剤等の配合によって耐摩耗性がさらに向上し，フェライト結晶の加工において研削比3,000 以上を得る。本砥石を使った研削で表面あらさRmax 0.05 μmを得，4 μmの幅残し加工においても両エッジに欠けは発生しない。

(b) 円筒面ラップの母線と円周方向に滑動案内を設け，ラップと加工物の相対回転を拘束し，ラップを回転し，加工物を揺動させる研摩方法により，曲率半径2 m以上の高精度の円筒面がラッピング・ポリシングできる。曲率半径の誤差も±5％以内であり，ディスク用ヘッドの高精度浮上面加工に適用できる。

(c) 微粒子の機械的除去作用と化学液のエッチング作用を併用したフェライト結晶の機械・化学研摩法により，能率が高く，加工変質層の少ない加工ができる。この加工機構では微粒子と加工物表面の摩擦による温度上昇が化学反応を活発化する点が大きな要因となって

いる。

(d) 基準定盤に加工基板を接着・保持して加工する場合，接着層の厚さを均一，薄層化するために，二平板間の流体の運動方程式により，接着条件の基礎が設定できる。噴霧塗布法により，塗布した接着層は1μm以下になり，これを加熱状態で押圧すると接着層は 0.2 μm前後になる。

V 磁気ヘッドの試作とその特性について

フェライト結晶を高精度で加工変質層のない加工を行い，ガラスとフェライトの相互拡散の少ない条件で組立て，追随性のよい支持機構を持たせた磁気ディスク用ヘッドは，高記録密度の特性を示す。

謝　　辞

本論文を草するにあたり，御指導を賜わった大阪大学工学部井川直哉教授に慎んで感謝の意を表します。また，大阪大学工学部山田朝治教授，川辺秀昭教授，長谷川嘉雄教授，森　勇蔵教授にも御教示をいただきました。ここに深謝申し上げます。

本研究は１９６９年４月から１９７８年３月までにわたって行なったものであり，懇切な御指導と終始変らぬ御激励を頂いた日本電信電話公社武蔵野電気通信研究所元工務部長井田一郎博士（現工学院大学工学部）に深甚の謝意を表します。

上野嘉之材料加工研究室長には本研究の頭初から直接御指導，御討論を頂きました。深く感謝いたします。

金親良一元工務部長（現日本電子技術株式会社）ならびに青柳恵三工務部長には本研究をまとめるに当り，御配慮と御激励を頂きました。木鉛馨元工務部統括調査役（現日電バリアン株式会社），河西敏雄元工務部研究専門調査役（現埼玉大学工学部）には本研究の各段階で適切な御指導を頂きました。深く感謝いたします。

篠山誠二研究専門調査役には，透磁率の計算と磁歪定数の測定で協力して頂きました。

中西卓二研究専門調査員，越本泰弘研究専門調査役には磁気ヘッド構造設計や特性測定において討論し，協力して頂きました。厚く御礼申し上げます。

本研究の経過において，三野満子元材料加工研究室研究主任（現エリオニクス株式会社）にはガラス接着の検討で，鈴木淳平研究主任には加工装置の設計と実験で，三宅正二郎研究専門調査役には研削技術の検討において，小俣富士夫社員には薄片コアの特性測定において，西島政雄社員には接着技術の検討で協力を頂きました。これらの方々に深く感謝いたします。

また，種々の御討論ならびに御協力をいただいた唐木俊郎研究専門調査員をはじめ材料加工研究室の方々に感謝します。