



|              |                                                                                 |
|--------------|---------------------------------------------------------------------------------|
| Title        | デジタル磁気記録装置の記録機構解析に基づく高密度化に関する研究                                                 |
| Author(s)    | 釘屋, 文雄                                                                          |
| Citation     | 大阪大学, 1993, 博士論文                                                                |
| Version Type | VoR                                                                             |
| URL          | <a href="https://doi.org/10.11501/3065959">https://doi.org/10.11501/3065959</a> |
| rights       |                                                                                 |
| Note         |                                                                                 |

*The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA*

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

The University of Osaka

デジタル磁気記録装置の記録機構解析  
に基づく高密度化に関する研究

平成4年12月

釘屋 文雄



①

デジタル磁気記録装置の記録機構解析  
に基づく高密度化に関する研究

平成4年12月

釘屋 文雄



— 目次 —

|                                       |    |
|---------------------------------------|----|
| 第1章 序論                                | 1  |
| 第2章 磁気ヘッドの記録磁界の解析                     |    |
| 2-1 はじめに                              | 3  |
| 2-2 記録磁界の解析手法                         | 6  |
| 2-3 記録磁界の解析結果                         | 10 |
| 2-3-1 リング型磁気ヘッドの記録磁界                  | 12 |
| 2-3-1-1 ヘッド飽和の影響                      |    |
| 2-3-1-2 ヘッドからの距離依存性                   |    |
| 2-3-1-3 ギャップ長依存性                      |    |
| 2-3-1-4 ヘッド磁気特性との関係                   |    |
| 2-3-1-5 記録再生実験によるリング型磁気ヘッドの高密度記録条件の検討 |    |
| 2-3-2 主磁極励磁型単磁極ヘッドの記録磁界               | 32 |
| 2-3-2-1 ヘッド・媒体間の磁氣的相互作用の効果            |    |
| 2-3-2-2 ヘッド飽和の影響                      |    |
| 2-3-2-3 ヘッド・媒体磁気特性との関係                |    |
| 2-3-2-4 ヘッドからの距離依存性                   |    |
| 2-4 まとめ                               | 46 |
| 2-5 参考文献                              | 47 |
| 第3章 リング型磁気ヘッドによる記録再生系のスペーシング損失の解析     |    |
| 3-1 はじめに                              | 49 |
| 3-2 記録再生実験によるスペーシング損失の解析              | 52 |
| 3-2-1 垂直記録方式の記録再生スペーシング損失             |    |
| 3-2-2 記録と再生スペーシング損失の分離解析              |    |
| 3-3 数値シミュレーションによる再生スペーシング損失の解析        | 67 |
| 3-3-1 解析方法                            |    |
| 3-3-2 解析結果                            |    |
| 3-4 まとめ                               | 77 |



|                                     |                                |     |
|-------------------------------------|--------------------------------|-----|
| 3-5                                 | 参考文献                           | 78  |
| 第4章 リングヘッドと塗布媒体からなる長手記録系による高密度記録    |                                |     |
| 4-1                                 | はじめに                           | 79  |
| 4-2                                 | 塗布媒体磁化モデルの構築                   | 81  |
| 4-2-1                               | 走査型電子顕微鏡による塗布媒体の観察             |     |
| 4-2-2                               | 磁性粒子の磁化反転機構                    |     |
| 4-2-3                               | 塗布媒体の磁化モデルの構築                  |     |
| 4-3                                 | 記録再生シミュレータの開発                  | 89  |
| 4-3-1                               | 記録再生機構の概要                      |     |
| 4-3-2                               | 解析手法                           |     |
| 4-3-3                               | 記録再生特性の実測との比較                  |     |
| 4-4                                 | 媒体磁気特性と記録再生特性の関係               | 101 |
| 4-4-1                               | 記録再生特性の実測と計算との比較               |     |
| 4-4-2                               | 角形比依存性                         |     |
| 4-4-3                               | 保磁力角形比依存性                      |     |
| 4-4-4                               | 保磁力および膜厚依存性                    |     |
| 4-5                                 | 高密度塗布媒体の検討                     | 121 |
| 4-6                                 | まとめ                            | 126 |
| 4-7                                 | 参考文献                           | 127 |
| 第5章 リングヘッドとCo-Cr媒体からなる垂直記録系による高密度記録 |                                |     |
| 5-1                                 | はじめに                           | 128 |
| 5-2                                 | Co-Cr単層膜媒体の磁化反転機構              | 130 |
| 5-2-1                               | Co-Cr単層膜媒体の膜構造と磁気特性            |     |
| 5-2-2                               | Co-Cr単層膜媒体の記録磁化状態の観察による磁化機構の検討 |     |
| 5-2-3                               | Co-Cr単層膜媒体の垂直配向度と磁化反転機構        |     |
| 5-3                                 | 高配向Co-Cr単層膜媒体の記録再生特性           | 149 |
| 5-3-1                               | 高密度特性                          |     |
| 5-3-2                               | 媒体パラメータと記録再生特性との関係             |     |
| 5-3-3                               | オーバーライト特性                      |     |



|             |                            |     |
|-------------|----------------------------|-----|
| 5-4         | 5. 25インチ大容量フロッピ装置の記録再生系の検討 | 156 |
| 5-4-1       | 記録再生系の概要                   |     |
| 5-4-2       | 記録再生特性                     |     |
| 5-5         | まとめ                        | 167 |
| 5-6         | 参考文献                       | 168 |
| 第6章         | 結論                         | 170 |
| 謝辞          |                            |     |
| 本研究に関する発表論文 |                            |     |



## 第1章 序論

計算機の高速化と情報処理量の増大に伴い、計算機用ファイルの中心的な役割を担っているデジタル磁気記録装置は、年々大容量化が図られてきた。例えば、計算機用オンラインファイルの主力装置である大型磁気ディスク装置では、5年で4倍のペースで記憶容量が向上しており、現在、記憶容量35GB（ギガバイト＝ $10^9$ バイト）の装置が製品化されている。この大型磁気ディスク装置の面記録密度は約 $100\text{ kbit/mm}^2$ （ビット間隔約 $1.0\text{ }\mu\text{m}$ 、トラック間隔約 $10\text{ }\mu\text{m}$ ）である。個人ファイルとして用いられるフロッピディスク装置や、データ保存用のバックアップファイルとして用いられる磁気テープ装置等、他のデジタル磁気記録装置も、ビット間隔に関しては、大型磁気ディスク装置とほぼ同程度の記録密度が実現されている。従って、デジタル磁気記録装置の研究では、今後、ビット間隔がサブミクロンの領域における磁気記録現象が研究対象となる。

ところで、磁気記録装置の高密度特性は、主要構成部品である磁気ヘッド及び記録媒体材料の磁気的性能と構造に大きく依存する。現在の磁気記録装置では、リング型磁気ヘッドが採用されているが、磁気ヘッド材料としては、フェライト系バルク材料が長年用いられてきた。しかし、記録密度の向上とともに、フェライト系バルク材料の飽和磁束密度が低いことに起因する磁気ヘッドの記録能力の不足が顕著となってきた。そこで、現在は、高飽和磁束密度のパーマロイやCo合金薄膜材料を用いた磁気ヘッド、あるいはフェライト系バルク材料と高飽和磁束密度の薄膜材料を組合せた磁気ヘッドに換わりつつある。一方、記録媒体としては、 $\gamma$ 酸化鉄系の針状粒子を熱硬化樹脂に混練して基板に塗布する $\gamma$ 酸化鉄系塗布媒体が主流であった。しかし、この磁性材料を用いた記録媒体の高密度特性は限界に達してきており、媒体材料は高密度記録に適した新しい材料へと移行しつつある。例えば、フロッピディスク装置では、鉄粉やBaフェライト粉を磁性粉とした塗布媒体が、小型磁気ディスク装置では、Co系合金を用いた薄膜媒体が製品の主流になっている。このように、磁気ヘッドと記録媒体材料の選択枝が広がってきている現在、磁気ヘッドおよび記録媒体の磁気的性質および構造が、高密度領域における記録再生機構に及ぼす影響を定量的に把握し、高密度化の指針を得ることが磁気記録装置の研究における重要な研究課題となる。



また、高密度記録に適した新しい記録方式として、垂直磁気記録方式の研究が注目されている。従来の記録方式である長手記録方式が、記録媒体の走行方向に記録膜を磁化して記録する方式であるのに対し、この垂直記録方式は、記録膜面の垂直方向に記録膜を磁化して記録する方式である。長手記録方式では、逆磁性の隣り合う磁化が相反発するように作用するため、高密度領域での安定な記録が困難となる。一方、垂直磁気記録方式では、逆磁性の隣り合う磁化が相吸引するように作用するため、原理的には安定な高密度記録が可能である。ただし、この垂直記録方式の長手記録方式に対する原理的優位性を実際の記録再生特性に反映するには、垂直記録方式に適した磁気ヘッドおよび記録媒体の研究開発が必要となる。

本論文は、このような背景のもと、デジタル磁気記録装置のより一層の高密度化を目的として行なった研究に関するものである。以下に研究内容の概要を示す。

- (1) 長手記録用ヘッドとしてリング型磁気ヘッドを、垂直記録用ヘッドとしてリング型磁気ヘッドおよび単磁極型磁気ヘッドを取り上げ、有限要素法による記録磁界解析シミュレータを用いて各々の磁気ヘッドの磁気パラメータと記録磁界の関係を解析することにより、対象とした磁気ヘッドの高密度記録条件を検討した。
- (2) 高密度記録を実現するためのキーパラメータであるヘッド・媒体間のスペーシングの記録再生特性に及ぼす影響について、特にスペーシングの影響が懸念されるリング型磁気ヘッドによる垂直磁気記録方式を中心に検討した。
- (3) 長手記録方式として、リング型磁気ヘッドと塗布媒体を組み合わせた系を取り上げ、この系の記録再生過程を解析するためのシミュレータを開発した。さらに、このシミュレータによる解析と記録再生実験から、媒体磁気特性が記録再生特性に及ぼす影響を明らかにするとともに、塗布媒体の高密度化の条件について考察した。
- (4) 垂直磁気記録方式として、リング型磁気ヘッドとC o - C r 単層膜媒体を組み合わせた系を取り上げ、記録再生実験、記録磁界解析シミュレーション、磁化状態の観察から、この系の記録機構と媒体磁気特性の関係について検討した。これらの知見に基づき、リング型磁気ヘッドとC o - C r 単層膜媒体からなる系の高密度化の条件について考察した。



## 第2章 磁気ヘッドの記録磁界の解析

### 2-1 はじめに

ディジタル磁気記録装置の記録原理を図2. 1に示す。まず、“1”と“0”で表される2進情報のデータビット列は磁気記録再生系の特性に整合するような記録符号列に変換される。次に、これらの記録符号列に対応した記録電流を磁気ヘッドに印加すると、磁気ヘッドから記録磁界が発生し、強磁性体からなる媒体の記録膜を磁化する。このようにして、2進情報は、媒体の記録膜の磁化反転列として記録される。

従来の記録方式である長手記録方式は、図2. 2に示すように、記録媒体を記録媒体走行方向に磁化して記録を行う方式である。磁気ヘッドは、リング型磁気ヘッドを用いる。記録は、このヘッドの巻線に印加される記録電流により軟磁性材料から成るリング状のコアを励磁することにより、ギャップ部近傍に発生するもれ磁界を記録磁界として利用して行われる。従って、このヘッドの記録磁界は、磁束の流れから明らかなように、長手成分の強い磁界であり、長手記録に適している。

一方、垂直記録方式は、図2. 3に示すように、記録媒体表面に対し垂直方向に磁化して記録を行う方式である<sup>(2-1) (2-2)</sup>。垂直記録は、2通りの磁気ヘッドを用いた系で、研究が行われている。図2. 3 (a)は、リング型磁気ヘッドを用いた系である<sup>(2-3) (2-4)</sup>。リング型磁気ヘッドは、長手成分の強い記録磁界を発生するが、ギャップ部の両端付近では垂直成分の強い領域が存在するので、この磁界を利用して垂直記録を行う。実績のある従来の磁気ヘッドが利用できること、記録媒体の構造が簡単なことがこの系の特徴である。図2. 3 (b)は、単磁極型磁気ヘッドを用いた系である。この図では、本研究で検討した主磁極励磁型の単磁極型磁気ヘッドを示した<sup>(2-5) - (2-9)</sup>。単磁極型磁気ヘッドは、巻線に印加される記録電流で軟磁性材料から成る主磁極を励磁することにより、主磁極先端近傍に発生する磁界を記録磁界として利用する。この系では、磁束は主磁極から媒体の記録膜の下に配置された軟磁性膜を通り、再び磁気ヘッドの補助磁極へ戻る閉磁路構造となっている。従って磁束の流れから、主磁極先端から媒体方向へ、つまり垂直方向へ強い記録磁界が発生することが分かる。この系の特徴は、記録磁界の磁路の一部を媒体が担っていることであり、磁気ヘッドと媒体の軟磁性膜との磁氣的結合が記録磁界に大きく影響す



る「2-10」。

本章では、図2.2と図2.3に示した3種類の記録再生系の記録磁界の基本的性質とともに、ヘッド磁気パラメータが記録磁界に及ぼす影響を調べ、各々の系で高密度化にとって重要なヘッド磁気パラメータを明らかにすることを試みた。なお、記録磁界の解析には、2次元静磁場のマックスウェルの方程式を基本方程式に、有限要素法により数値解析する記録磁界解析シミュレータを用いた。

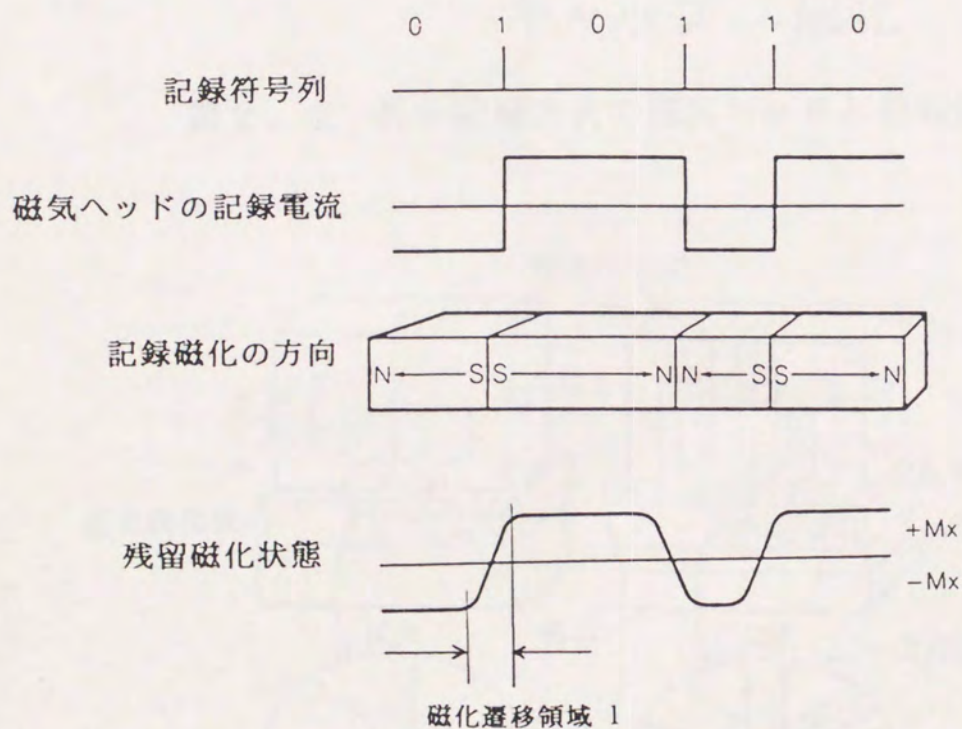


図2.1 デジタル磁気記録の記録原理



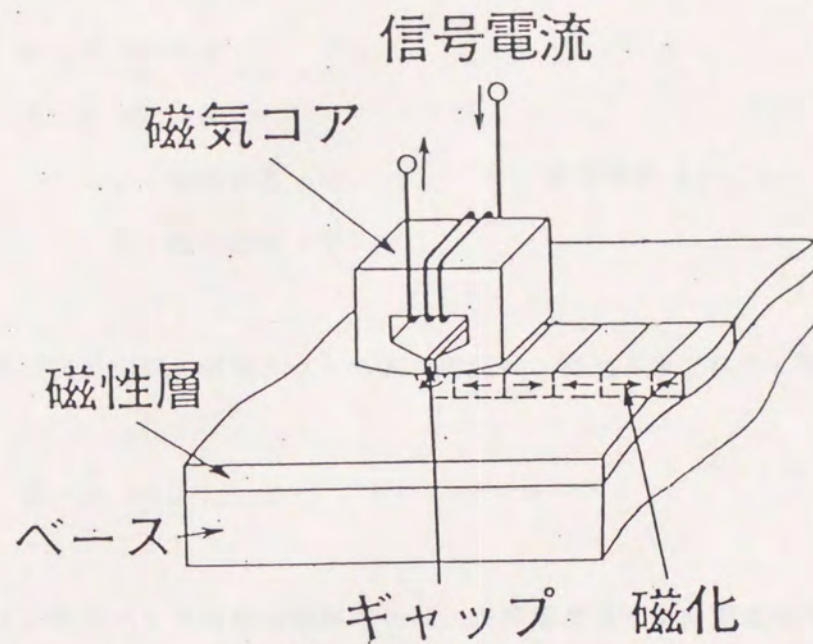


図 2. 2 長手記録方式の磁気ヘッドと記録媒体

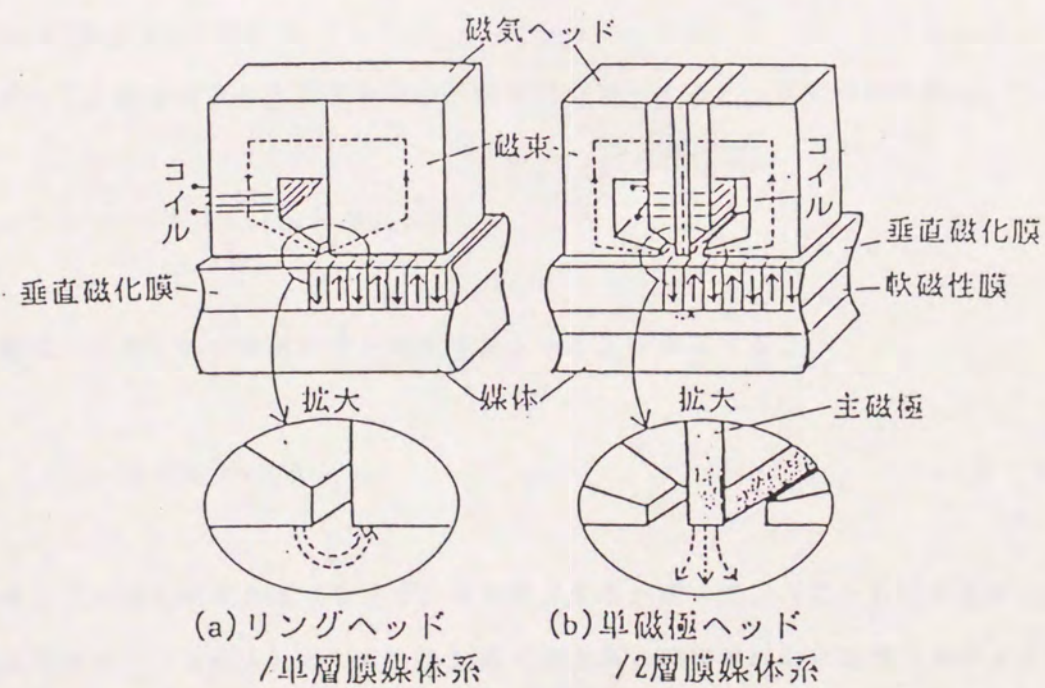


図 2. 3 垂直記録方式の磁気ヘッドと記録媒体



## 2-2 記録磁界の解析手法

静磁場におけるマックスウェルの方程式は、次式で表される<sup>(2-11)</sup>。

$$\text{rot } H = J \quad (2-1)$$

$$\text{div } B = 0 \quad (2-2)$$

$J$  : 電流密度 ( $A/m^2$ )     $H$  : 磁界強度 ( $A/m$ )

$B$  : 磁束密度 (T)

さらに、軟磁性材料から成る磁気ヘッドの磁気特性は、次式で表されると仮定した。

$$B = \mu(H, \omega) H \quad (2-3)$$

この式において、磁気ヘッド材料の透磁率 $\mu$ は、磁界強度 $H$ と記録電流の周波数 $\omega$ の関数として定義した。これは磁気ヘッドの磁気特性が、飽和効果により磁気ヘッドに印加される磁界 $H$ に依存すること、さらに、うず電流損失等の周波数損失により記録電流の周波数 $\omega$ に依存することを意味している。なお、軟磁性材料以外の領域では、透磁率 $\mu$ は真空の透磁率 $\mu_0$ に等しいとした。

この(2-3)式と(2-1)式より磁界強度 $H$ を消去すると、次式が導かれる。

$$\text{rot } (1/\mu \cdot B) = J \quad (2-4)$$

次に、次式で定義される磁気ベクトルポテンシャル $A$ を導入する。

$$B = \text{rot } A \quad (2-5)$$

(2-5)式の磁束密度 $B$ は(2-2)式を満足する。従って、(2-5)式を(2-4)式に代入すると、(2-1)と(2-2)式で表された静磁場におけるマックスウェルの方程式は、次式で表される。



$$\text{rot} (1/\mu \cdot \text{rot} A) = J \quad (2-6)$$

ところで、磁気記録装置では、円周方向への記録範囲を規定する磁気ヘッドのギャップ長に比較して、半径方向への記録範囲を規定する磁気ヘッドのトラック幅は、2桁程度広い。従って、記録磁界解析シミュレータは、半径方向が無限に長い2次元問題として取り扱うことにした。その場合、(2-6)式は、次式で表される。

$$\begin{aligned} \partial/\partial x (1/\mu_y \cdot \partial A_z/\partial x) + \\ \partial/\partial y (1/\mu_x \cdot \partial A_z/\partial y) = -J_z \end{aligned} \quad (2-7)$$

$A_z$ : 磁気ベクトルポテンシャルの半径方向成分

$\mu_x$ : 透磁率の長手方向成分 (H/m)

$\mu_y$ : 透磁率の垂直方向成分 (H/m)

$J_z$ : 電流密度の半径方向成分 (A/m<sup>2</sup>)

この式と(2-3)式を連立させて計算を行えば、記録磁界の解析を行うことができる。ただし、(2-3)式に示したように、磁気ヘッド材料の磁気特性は非線形性(飽和効果)を有するため、記録磁界を求めるには収束計算を行う必要がある。計算手順としては、磁気ヘッドを含む解析領域を三角形要素に分割し、(2-7)式を有限要素法により離散化して数値解析的に解いて、解析領域の各節点の $A_z$ を求める<sup>(2-11)</sup>。各節点の $A_z$ から、次式により各要素の磁束密度 $B$ が求まる。

$$\begin{aligned} B_x &= \partial A_z / \partial y \\ B_y &= -\partial A_z / \partial x \end{aligned} \quad (2-8)$$

$B_x$ : 磁束密度の長手方向成分 (T)

$B_y$ : 磁束密度の垂直方向成分 (T)

次に、各要素の磁束密度 $B$ から、(2-3)式により、各要素の透磁率を再計算する。以上の手順を解が収束するまで反復計算することにより、磁気ヘッドの磁気特性の非線形性を考慮した記録磁界計算が可能となる。



なお、本研究では、軟磁性材料の物質方程式である(2-3)式として、バルクの等方的な軟磁性材料に関する以下の実験式を用いた<sup>(2-12)</sup>。

$$B = \mu_0 H + (2 B_s / \pi) \tan^{-1} \{ (\pi / 2 B_s) \cdot \mu_0 (\mu_{\max} - 1) H \} \quad (2-9)$$

$\mu_0$  : 真空の透磁率 (H/m)       $\mu_{\max}$  : 最大比透磁率

$B_s$  : 飽和磁束密度 (T)

従って、本解析では軟磁性材料のヒステリシス特性は無視している。ところで、図2.4は、次節で詳しく述べるMnZnフェライトから成るリング型磁気ヘッドに関して、磁気ヘッドとほぼ同一寸法の環状試料を作製し、ベクトルインピーダンスメータによりそのインダクタンスと実効抵抗を測定し、次式から複素透磁率の周波数依存性を求めた結果である。

$$\begin{aligned} \mu &= \sqrt{(\mu')^2 + (\mu'')^2} \\ &= (L \cdot l \cdot 10^9) / (4 \pi N^2 \cdot S) \end{aligned} \quad (2-10)$$

$$\begin{aligned} \tan \delta &= \mu'' / \mu' \\ &= (R - R_0) / (L \cdot 2 \pi f) \end{aligned} \quad (2-11)$$

$\mu'$  : 複素透磁率の実部     $\mu''$  : 複素透磁率の虚部

$L$  : インダクタンス (H)     $l$  : 平均磁路長 (cm)

$N$  : 巻数     $S$  : 断面積 (cm<sup>2</sup>)     $R$  : 実効抵抗 ( $\Omega$ )

$R_0$  : 巻線の抵抗 ( $\Omega$ )     $f$  : 測定周波数 (Hz)

(2-9)式の最大比透磁率 $\mu_{\max}$ として、上記実測より得られた各周波数の複素透磁率の実部 $\mu'$ を用いると、測定周波数50kHzでの最大比透磁率 $\mu_{\max}$ は4800となる。また、飽和磁束密度 $B_s$ は、同一の試料をB-Hカーブトレースで測定した結果、0.55Tであった。図2.5は、これらの値を(2-9)式に代入してMnZnフェライトリング型磁気ヘッドのB-H特性を計算した結果である。



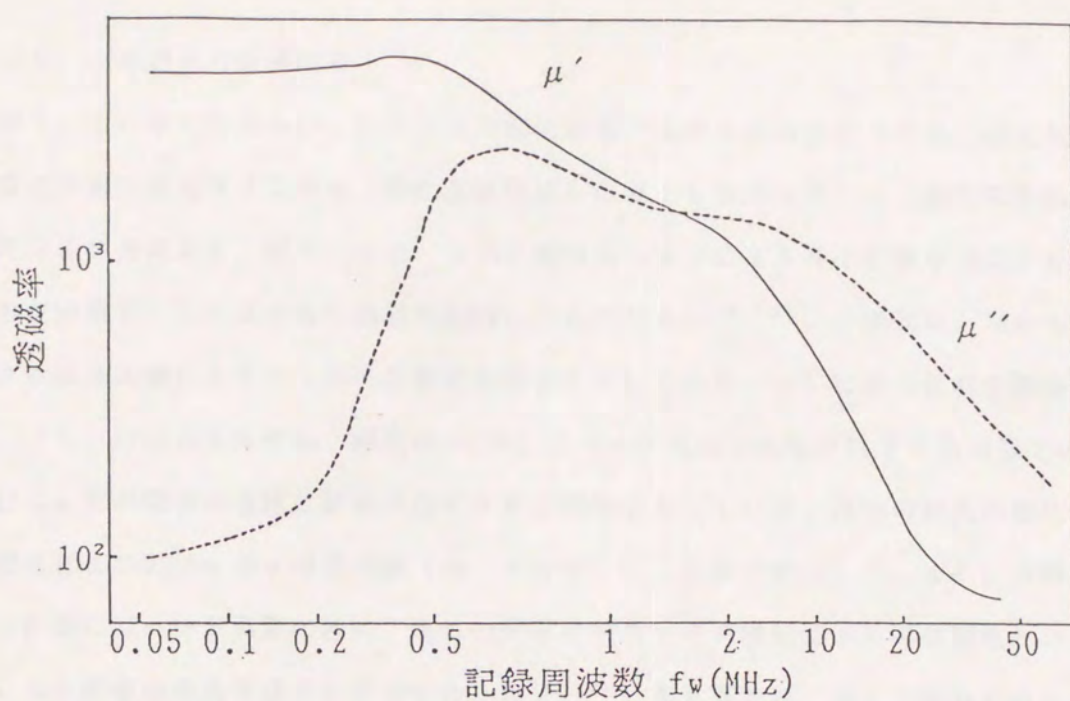


図2. 4 MnZnフェライトの複素透磁率の周波数依存性

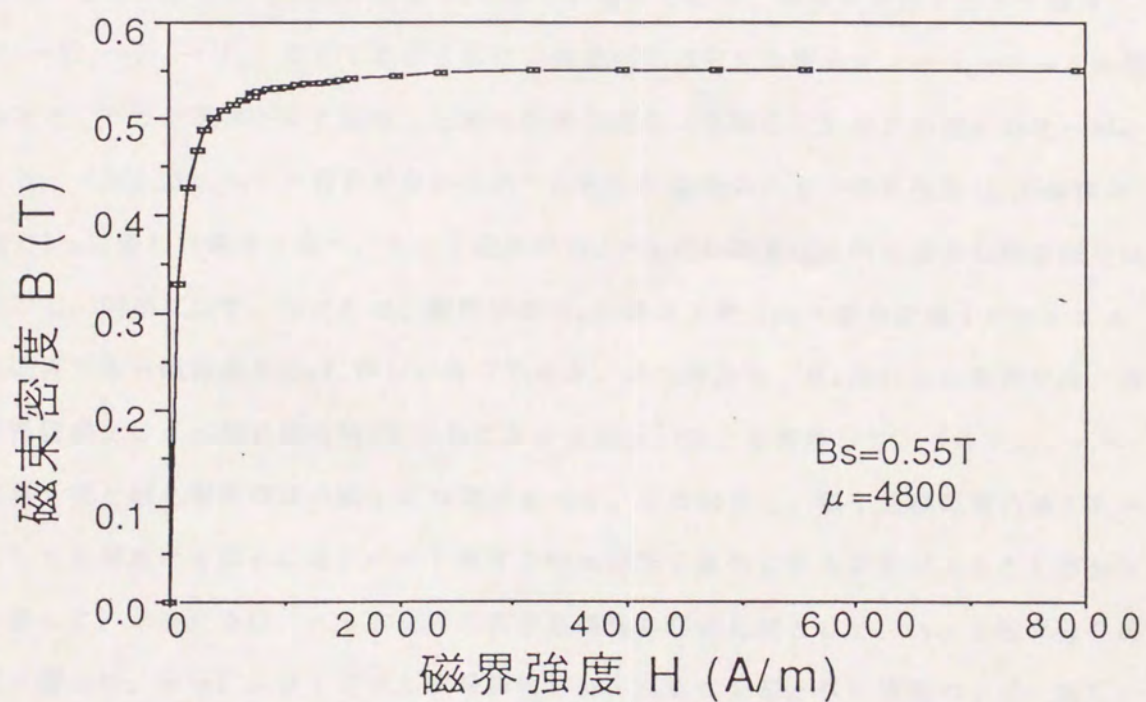


図2. 5 磁気ヘッド材料のB-H特性の計算例 (MnZnフェライト)



### 2-3 記録磁界の解析結果

図2. 1に示したように、デジタル磁気記録で高密度記録を行うには、磁化反転により磁化の極性が遷移する領域（磁化遷移領域）の幅 $l$ を極力小さくして隣接磁化間の干渉を抑える必要がある。図2. 6は、リング型磁気ヘッドによる長手記録を例にとり、ヘッドの記録磁界による媒体磁化過程を説明したものである<sup>〔2-13〕</sup>。この図は、左から右へ走行する媒体の磁化を負から正へ反転する場合を示しており、a)は磁化反転を開始する位置、(b)は磁化反転中心（磁化 $M_x=0$ ）、(c)は磁化反転が終了する位置でのヘッドによる記録磁界の履歴と媒体磁化の履歴の関係を示している。図中の媒体の磁化 $M$ と外部磁界 $H$ との関係を示す磁化曲線（ $M-H$ 曲線）は、直線で近似した。また、外部磁界 $H$ は、正確にはヘッド磁界の他に、媒体の反磁界やヘッドの軟磁性体と媒体磁化との相互作用による鏡像磁界を考慮する必要があるが<sup>〔2-14〕</sup>、本考察では、ヘッド磁界のみを考慮した。リング型磁気ヘッドでは、ヘッド磁界の長手成分の磁界分布は、ギャップ中心位置で最大となり、ギャップ両端に向かって減衰する分布となる。(a)は、ヘッド磁界が負から正へ反転した直後のヘッド磁界強度 $H_3$ が、媒体の磁化曲線が負の飽和磁化 $-M_s$ から正の方向へ立ち上がる点での磁界強度 $H_0$ に等しい場合である。媒体が受けるヘッド磁界が $H_1 \rightarrow H_2 \rightarrow H_3 \rightarrow H_4$ と変化するとともに、媒体磁化は磁化曲線上を $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 4$ の履歴を辿り、ヘッド磁界が0に減衰した時の媒体の磁化（残留磁化）は負の飽和磁化 $-M_s$ となる。(b)は、ヘッド磁界が負から正へ反転した直後のヘッド磁界強度 $H_3$ が媒体の保磁力 $H_c$ に等しい場合であり、ヘッド磁界が $H_3$ から0に減衰した時の媒体の残留磁化は0となる。同様にして、(c)は、磁界強度 $H_3$ が媒体を逆方向へ飽和記録するために必要な磁界である飽和磁界 $H_s$ に等しい場合である。この図から、 $H_3 \geq H_s$ の条件では、媒体の残留磁化は正の飽和磁化 $M_s$ となることが分かる。以上を整理して、(d)に、ヘッド磁界分布と磁化遷移領域の幅 $l$ との関係を示す。この図から、磁化遷移領域の幅 $l$ を小さくして高密度化を図るには、ヘッド磁界分布の勾配を急峻にする必要があることが分かる。従って、本研究では、ヘッド磁界の高密度特性の評価尺度として、ヘッド磁界分布の勾配を選んだ。さらに、デジタル記録装置では、以前に記録された情報の上に、新しい情報を直接重ね書き（オーバーライト）することを前提としている。従って、以前に記録された情報の消え残りによるノイズ増加を防ぐには、媒体記録層の記録再生に有効な領域において、媒体の飽和磁界 $H_s$ 以上のヘッド磁界強度で飽和記録することが必要とされる。



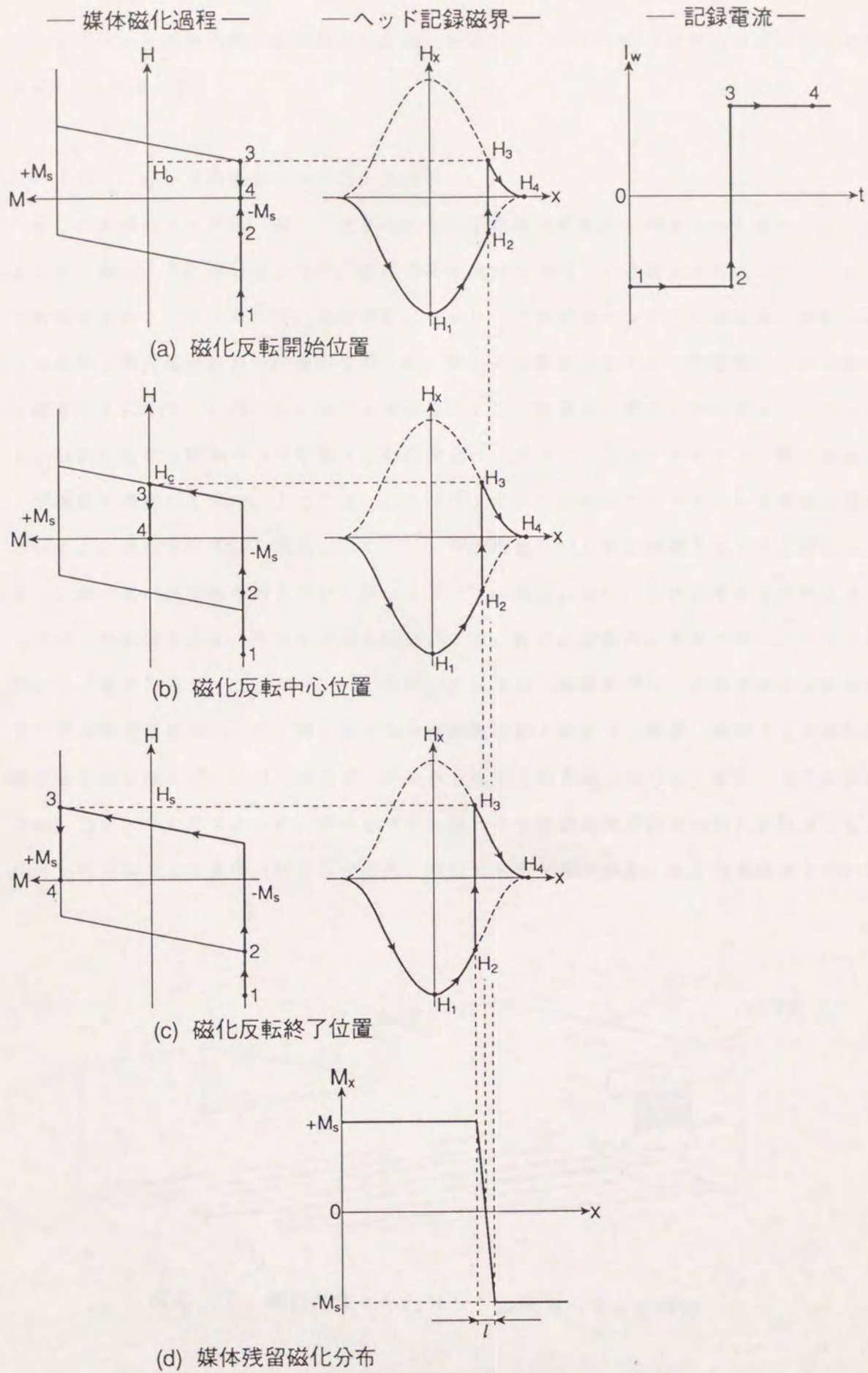


図 2.6 ヘッドの記録磁界による媒体磁化過程



そこで、ヘッド磁界の飽和記録特性の評価尺度として、ヘッド磁界分布における最大磁界強度  $H_{\max}$  を選んだ。

### 2-3-1 リング型磁気ヘッドの記録磁界

リング型磁気ヘッドは、図2.2に示した長手記録方式向けに開発された磁気ヘッドであるが、図2.3に示したように、磁界の垂直成分を利用して垂直記録方式のヘッドとしても研究されている。従って、本研究におけるリング型磁気ヘッドの記録磁界の解析では、長手成分と垂直成分の両方の検討を行った。解析の対象としたリング型磁気ヘッドの構造を図2.7に示す。このヘッドは、大型磁気ディスク装置用に開発されたMnZnフェライト材料から成る磁気ヘッドである。軟磁性部は、CコアとIコアをガラス材料で接合して閉磁路を構成しており、Iコアはヘッドが浮上するためのスライダとしての機能も兼ねている。このヘッド構造を基本として、リング型磁気ヘッドの記録磁界の2次元解析を2-2節で述べた解析手法を用いて行った<sup>〔2-15〕</sup>。図2.8に、2次元解析における本ヘッドの寸法形状を示す。ギャップ長  $g$  については、後述の記録再生実験で用いたヘッドのギャップ長である  $0.3\ \mu\text{m}$  を中心に検討した。なお、本解析では、有限要素法での要素として三角要素を用いたが、解析領域の全要素数は約12000要素、要素サイズは記録磁界として有効なギャップ長近傍で一辺の長さを  $0.05\ \mu\text{m}$  とした。また、以下の解析では、図2.9に示すように、ギャップ中心線とヘッドの媒体対向面の交点を原点とし、媒体走行方向つまり長手方向をX軸方向、垂直方向をY軸方向とした直交座標系を用いた。

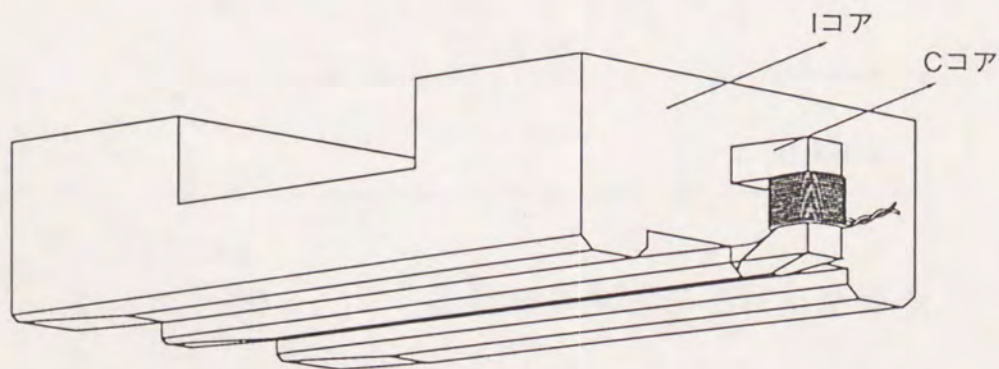


図2.7 解析対象としたリング型磁気ヘッドの構造



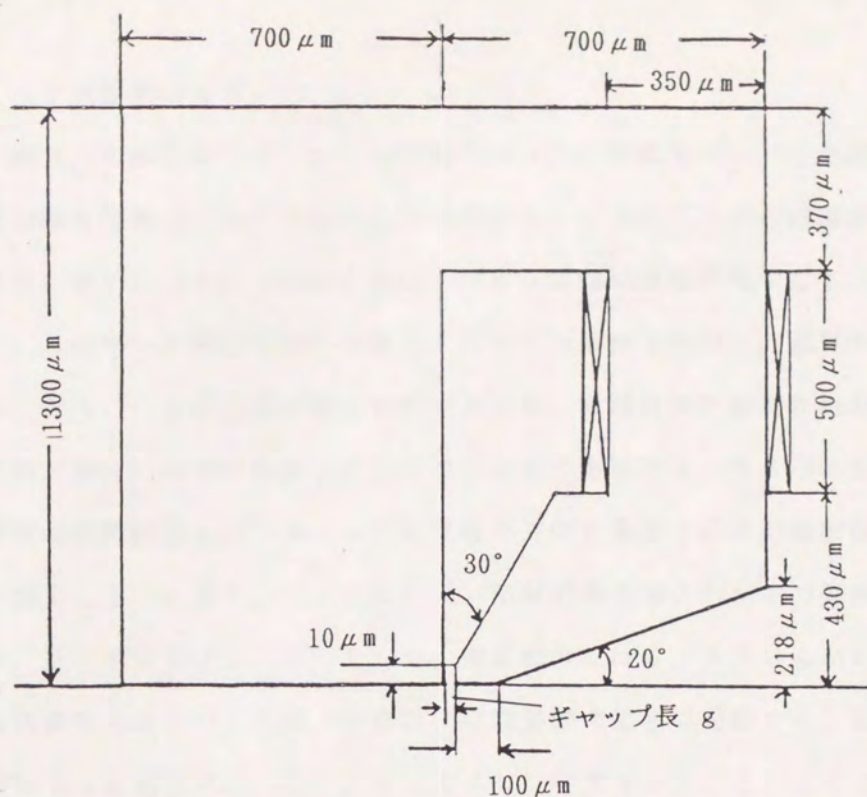


図2. 8 解析対象としたリング型磁気ヘッドの寸法形状

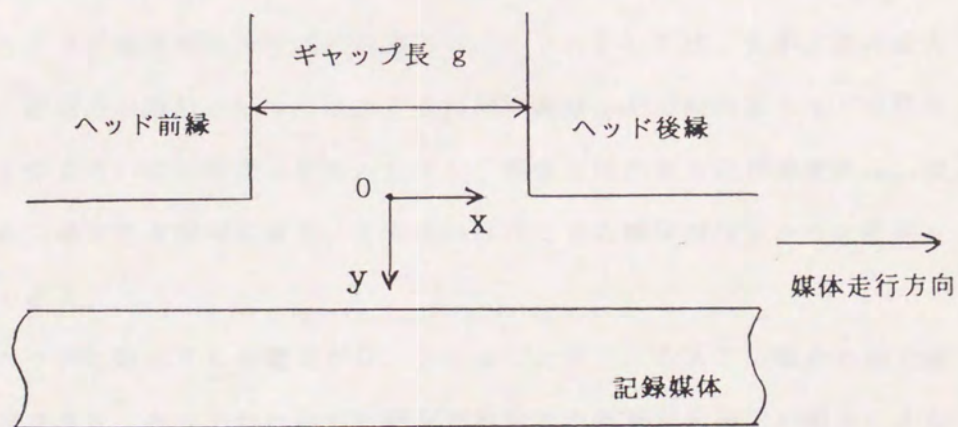


図2. 9 記録磁界解析における座標系



## 2-3-1-1 ヘッド飽和の影響

図2.10は、図2.8および表2.1に示す諸元のリング型磁気ヘッドの巻線に記録電流を印加して磁力線を計算したものである。この図からヘッドのCコアの磁路がギャップ部に向かって次第に狭くなっている効果により、ギャップ部に磁束が集中している様子が分かる。従って、このヘッド構造では、効率良くギャップ部から強いもれ磁界を発生させることができる。一方、ヘッドに過大電流を印加すると、軟磁性体で最初に飽和する領域はギャップ部近傍であり、ヘッド飽和は記録磁界に大きく影響すると考えられる。そこで、印加する記録電流の起磁力をパラメータとして長手方向と垂直方向の記録磁界分布を計算した。結果を図2.11に示す。この計算では、記録磁界分布のヘッドの媒体対向抗面からの距離 $y$ を、長手成分では $0.325\mu\text{m}$ 、垂直成分では $0.300\mu\text{m}$ とした。両成分のヘッドの媒体対向面からの距離 $y$ の差は、有限要素の粗さに起因する。起磁力は、ヘッドが飽和を開始する起磁力である $0.25\text{AT}$ （アンペアターン）と、その2倍および3倍の起磁力を選んだ。この図から、過飽和の状態では、起磁力の増加とともに長手方向と垂直方向のいずれも、磁界分布の裾が広がってゆくことが分かる。

図2.12は、記録電流の起磁力と最大磁界強度の関係を、ヘッドの媒体対向抗面からの距離 $y$ をパラメータとして計算したものである。ヘッドが未飽和の条件（起磁力 $\leq 0.25\text{AT}$ ）では、長手方向と垂直方向のいずれも、起磁力に比例して最大磁界強度は増加する。一方、ヘッドが過飽和の条件（起磁力 $\geq 0.25\text{AT}$ ）では、長手方向の最大磁界強度 $H_{x\text{max}}$ は、起磁力の増加とともに増加する傾向にあり、その傾向はヘッドの媒体対向面からの距離 $y$ が大きいほど顕著である。しかし、垂直方向の最大磁界強度 $H_{y\text{max}}$ は、起磁力の増加とともに減少する傾向にあり、その傾向はヘッドの媒体対向面からの距離 $y$ が小さいほど顕著である。

図2.13は、ヘッドに印加する起磁力が $0.20\text{AT}$ と $0.75\text{AT}$ の場合の磁力線分布を解析した結果である。ヘッドからのもれ磁束が発生する領域が起磁力の増加によるヘッド飽和の進行とともに、ギャップ部近傍からヘッドコア内部へ拡大している様子が分かる。拡大した領域から発生するもれ磁束は、長手方向と垂直方向の磁界分布の裾を拡げるとともに、ヘッドの媒体対向面からの距離 $y$ が大きい領域における長手方向の最大磁界強度の増加に寄与する。

図2.14は、起磁力 $0.25\text{AT}$ と起磁力 $0.5\text{AT}$ における長手方向と垂直方向の



等磁界曲線を計算したものである。図2. 14 (a) から、長手方向の等磁界曲線は、ヘッドが過飽和になると、長手と垂直の両方向に拡大することがわかる。従って、長手記録では、磁気ヘッドが過飽和の状態になっても磁界強度は増加する一方、磁界勾配の劣化が起こるため高密度記録が困難になると考えられる。また、図2. 14 (b) から、垂直方向の等磁界曲線は長手方向の等磁界曲線に比べ、ヘッド飽和の影響は少ないことが分かる。従って、リング型磁気ヘッドによる垂直記録の場合、長手記録に比較して記録特性に及ぼすヘッド飽和の影響は少ないと考えられる。ただし、磁界強度の低い領域の等磁界曲線は、ヘッドが過飽和になると、長手方向に拡大している。従って、垂直記録でも低保磁力の媒体を用いた場合は、ヘッド飽和による磁界勾配の劣化の影響を受けると推定される。



表 2. 1 解析ヘッドの諸元

| ギャップ長<br>$g$ ( $\mu\text{m}$ ) | ギャップ深さ<br>$gd$ ( $\mu\text{m}$ ) | 飽和磁束密度<br>$B_s$ (T) | 比透磁率<br>$\mu$ |
|--------------------------------|----------------------------------|---------------------|---------------|
| 0.30                           | 10                               | 0.5                 | 500           |

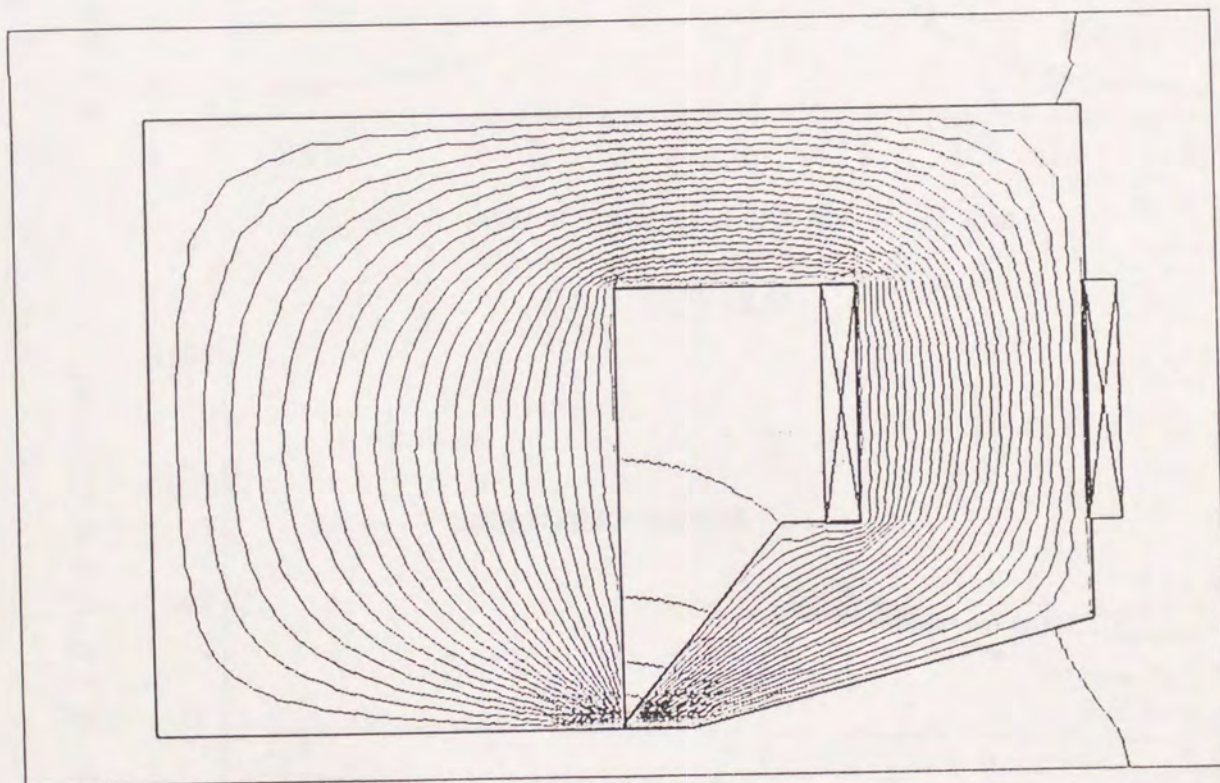
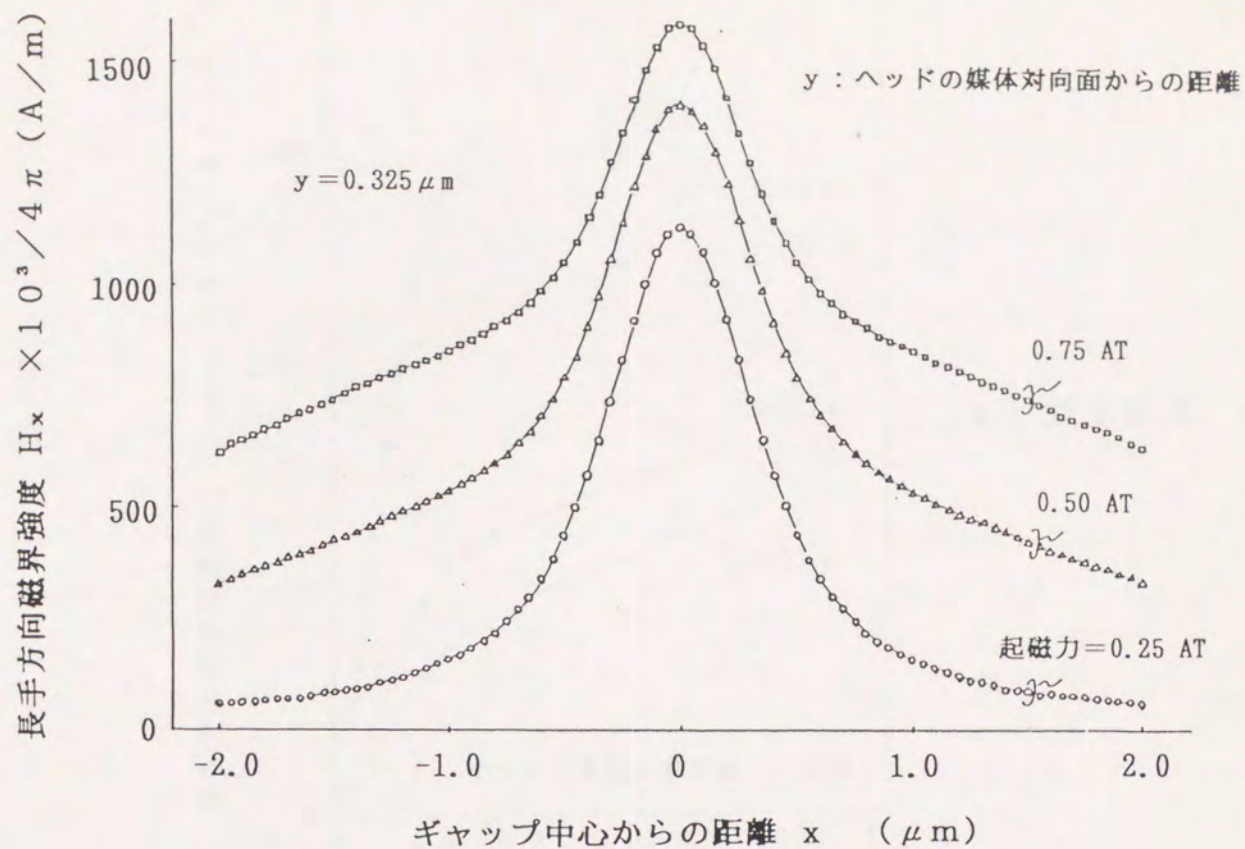
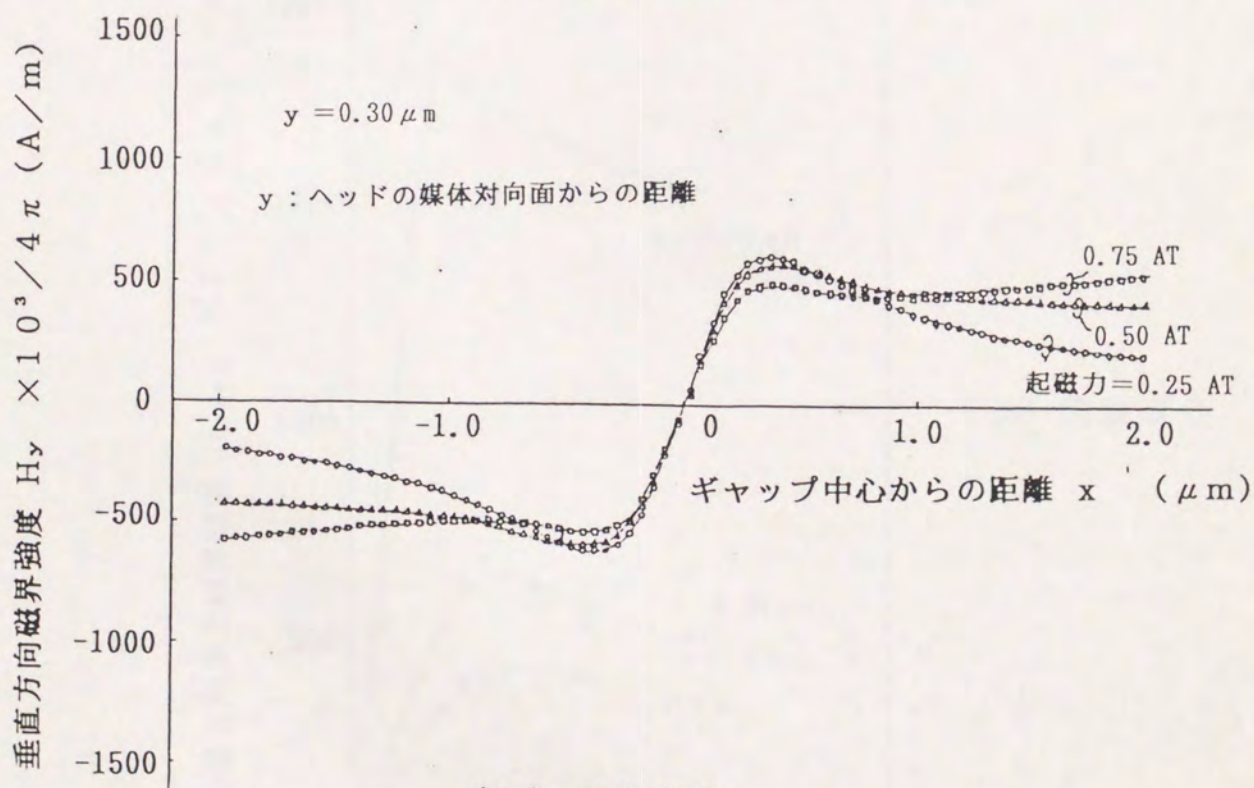


図 2. 10 リング型磁気ヘッドの磁力線分布





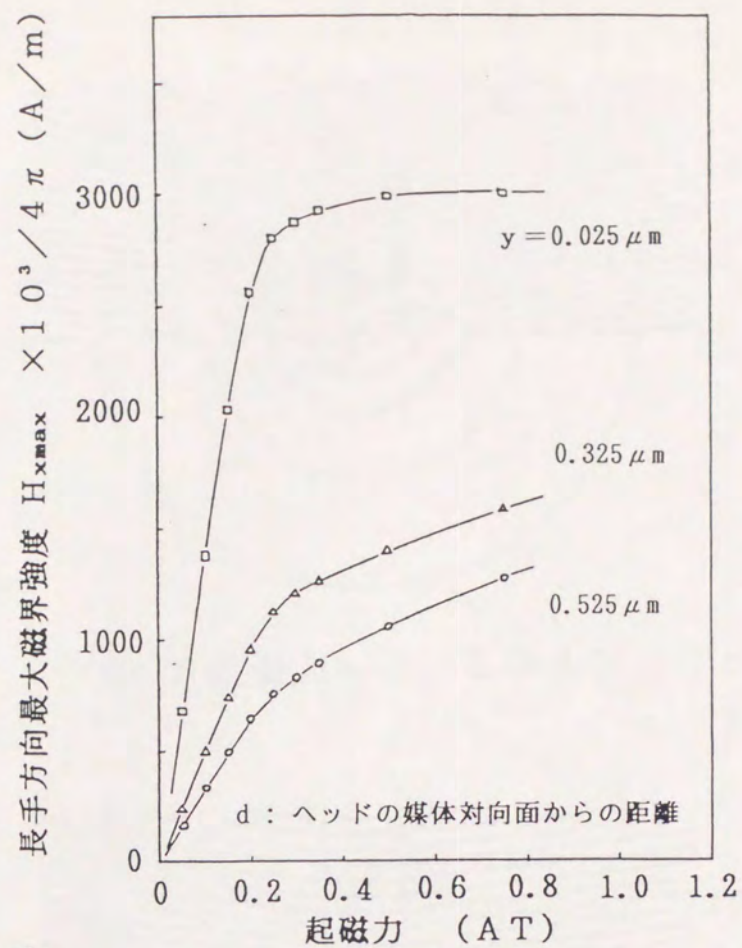
(a) 長手成分



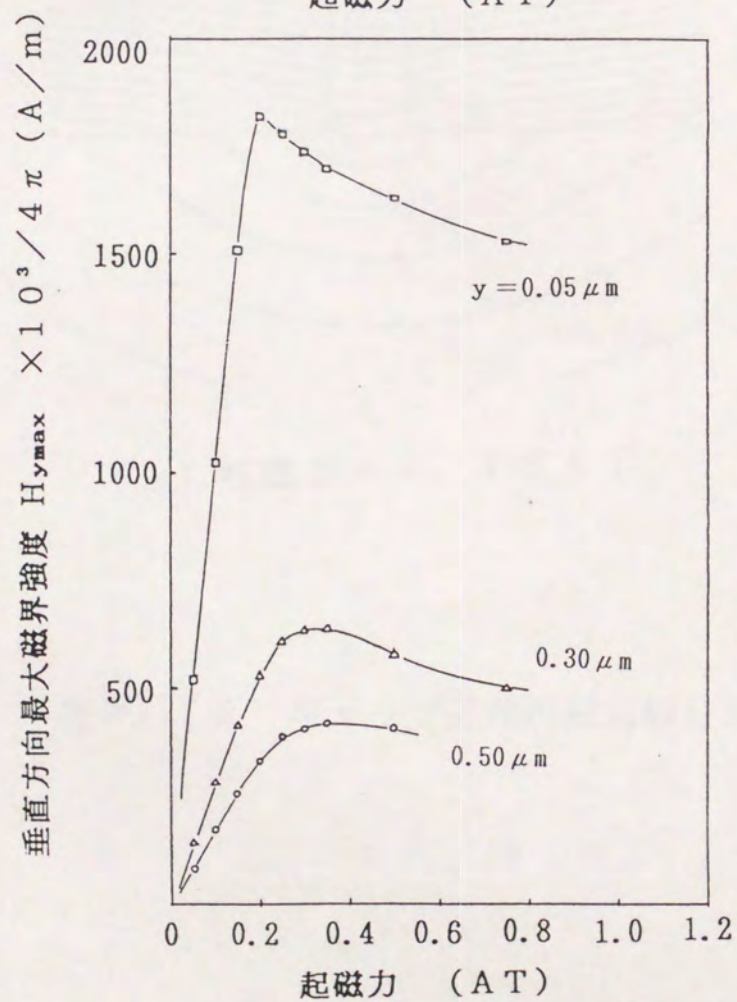
(b) 垂直成分

図 2. 1 1 記録磁界分布の起磁力依存性





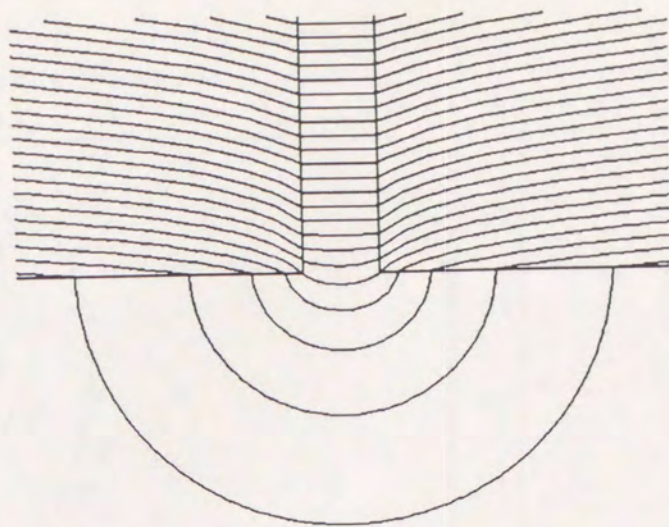
(a) 長手成分



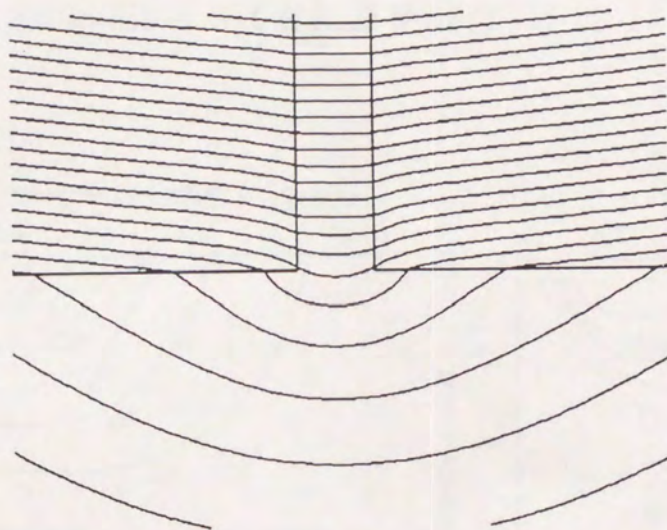
(b) 垂直成分

図 2. 1 2 最大磁界強度の起磁力依存性





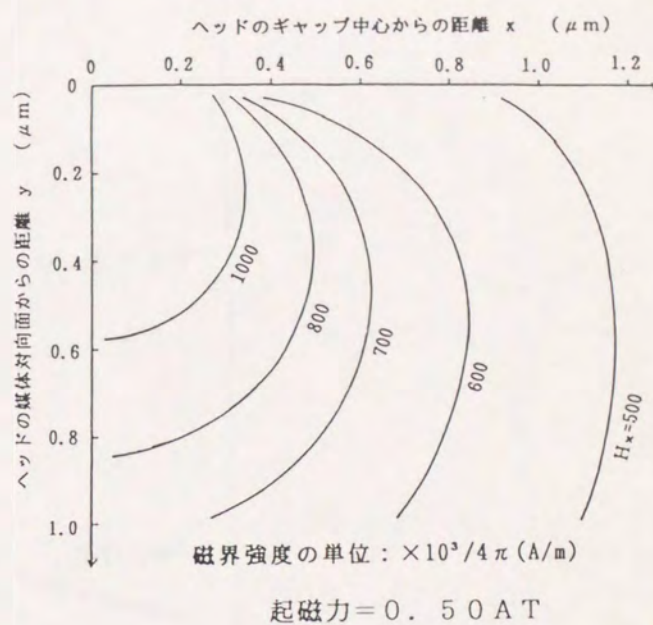
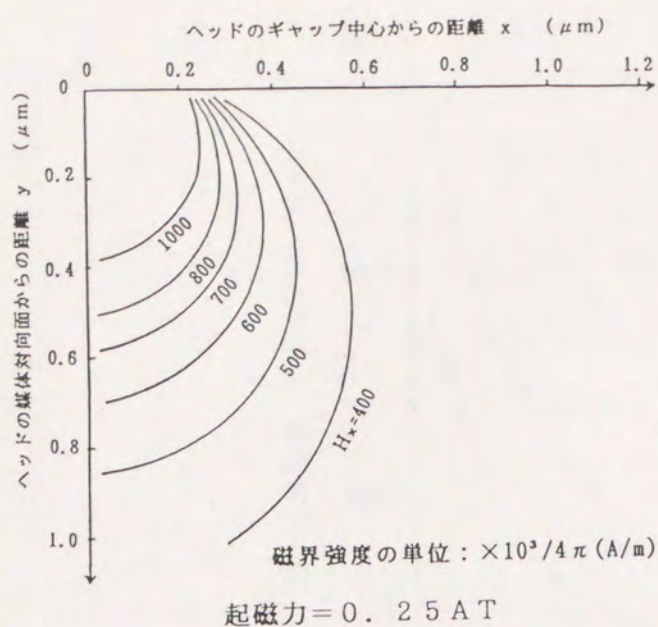
(a) 起磁力 = 0.20 AT



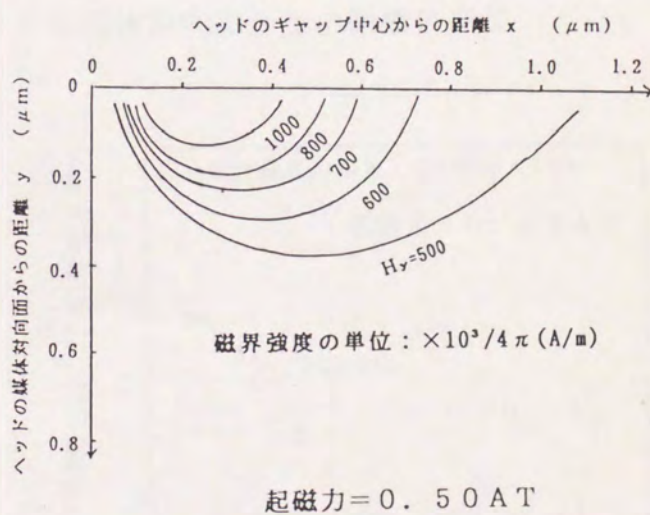
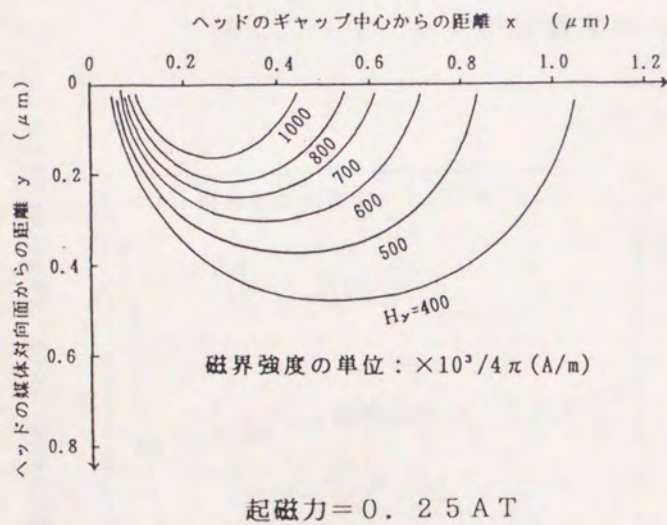
(b) 起磁力 = 0.75 AT

図 2. 1 3 ギャップ近傍の磁力線分布





(a) 長手成分



(b) 垂直成分

図 2. 1 4 記録磁界の等磁界曲線



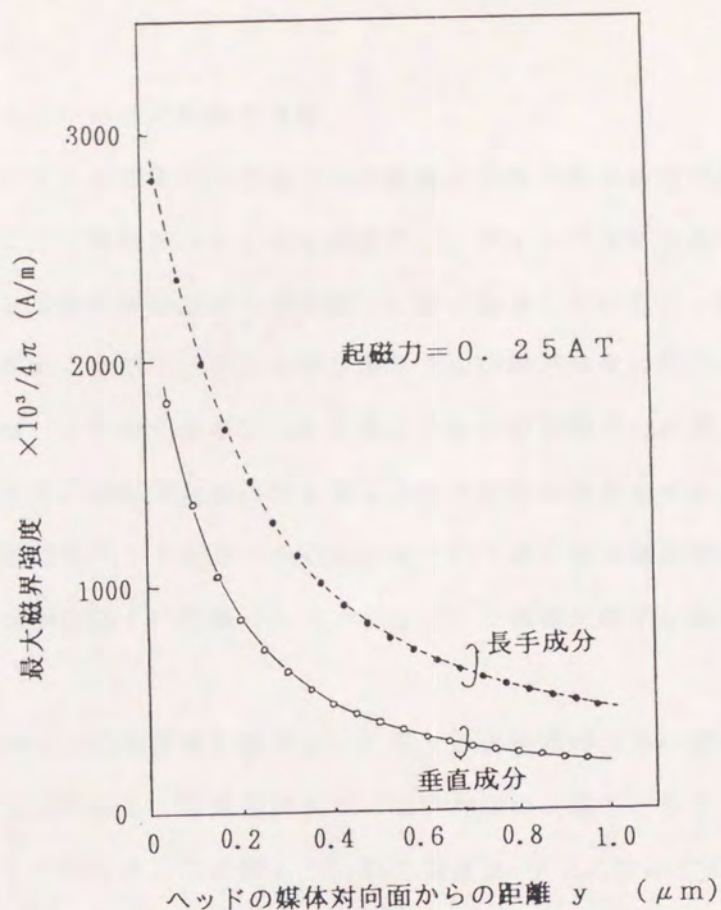
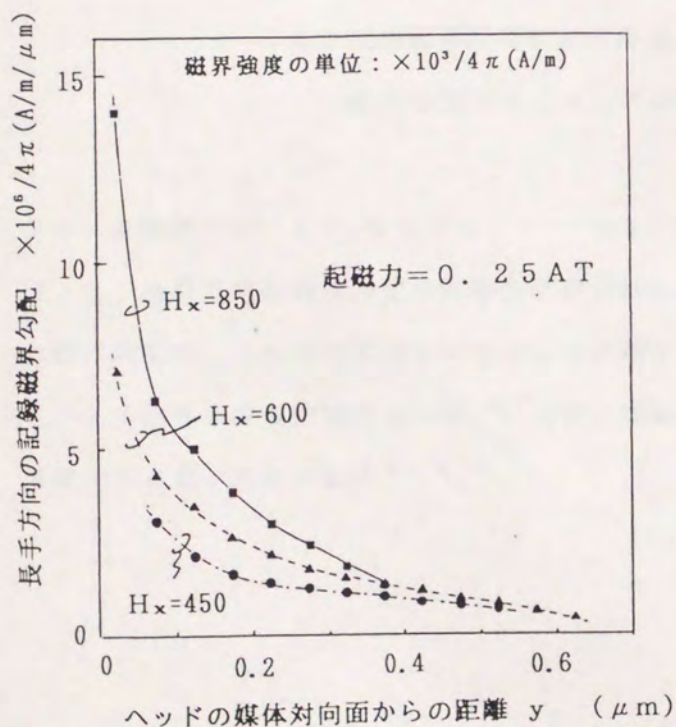
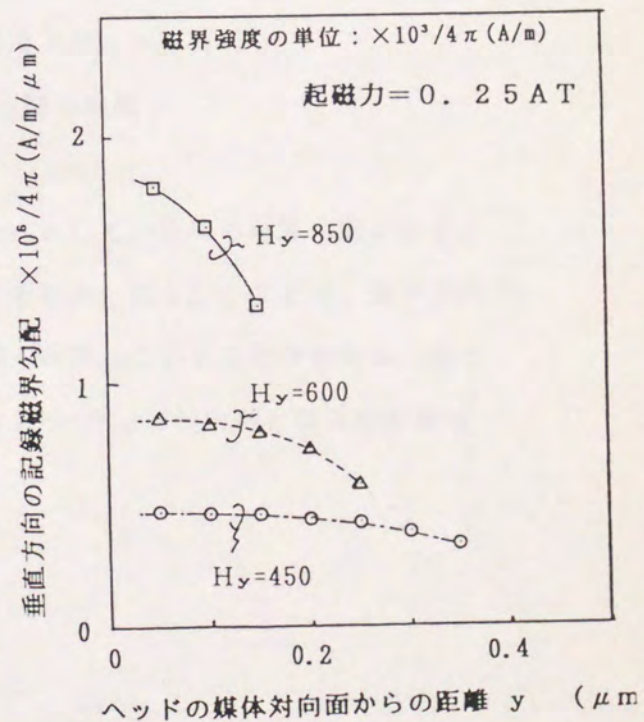


図2. 15 最大磁界強度のヘッドの媒体対向面からの距離依存性



(a) 長手成分



(b) 垂直成分

図2. 16 記録磁界勾配のヘッドの媒体対向面からの距離依存性



## 2-3-1-2 ヘッドからの距離依存性

図2.15に、ヘッドの媒体対向抗面からの距離 $y$ と最大磁界強度 $H_{max}$ の関係を計算した結果を示す。リング型磁気ヘッドの記録磁界は、ギャップ部からのみれ磁界を利用しているため、ヘッドの媒体対向面からの距離 $y$ に強く依存していることが分かる。また、垂直方向の磁界強度は、 $y \geq 0.3 \mu m$ では長手方向の磁界強度の約 $1/2$ であるが、 $y \leq 0.3 \mu m$ では、 $y$ が短くなるにつれて長手方向の磁界強度に次第に近づく。例えば、 $y = 0.05 \mu m$ では、垂直方向の磁界強度は長手方向の磁界強度の約70%となる。従って、特にリング型磁気ヘッドを用いて垂直記録を行う系の記録磁界強度向上には、ヘッドの媒体対向面と媒体表面との距離（スペーシング）の短縮と媒体記録膜の薄膜化が有効である。

図2.16は、ヘッドの媒体対向面からの距離 $y$ と記録磁界分布の磁界勾配 $\partial H / \partial x$ の関係を計算したものである。記録磁界分布の磁界勾配の定義を、長手方向の磁界勾配を例として、図2.17に示す。この図より、磁界強度 $H_x = H_{x1}$ における長手方向の磁界勾配は、次式で求められる。

$$\partial H_x / \partial x (H_x = H_{x1}) = (2 \times \Delta H_x) / L \quad (2-12)$$

$L$ ：記録磁界分布における磁界強度 $(H_{x1} + \Delta H_x)$ と

磁界強度 $(H_{x1} - \Delta H_x)$ との間の距離

なお、本研究では、 $\Delta H_x$ は $50 \times 10^3 / 4\pi (A/m)$ として、以降の磁界勾配の計算を行った。垂直方向の磁界勾配も同様の計算方法により求めた。図2.16より、長手方向の磁界勾配は、ヘッドの媒体対向面からの距離 $y$ に強く依存していることが分かる。従って、長手記録の記録密度向上には、ヘッドと媒体間のスペーシングの短縮と媒体記録膜の薄膜化が有効と考えられる<sup>(2-7)</sup>。



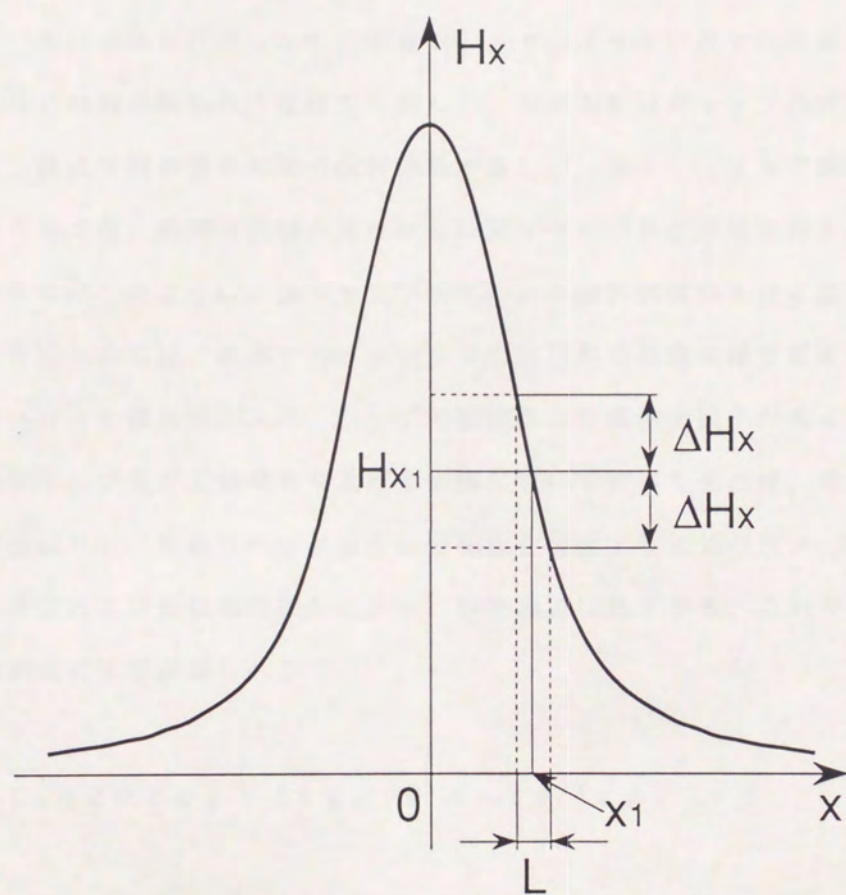


図 2. 1 7 磁界勾配の定義 (長手方向)



### 2-3-1-3 ギャップ長依存性

図2.18に、最大磁界強度 $H_{\max}$ とギャップ長 $g$ の関係を示す。ギャップ長以外のヘッドの諸元は、前節と同様である。起磁力は、各々のギャップ長においてヘッド飽和が開始する起磁力を選んだ。ギャップ長を拡げることによる記録磁界強度の改善効果は大きい。例えば、ギャップ長を $0.2\mu\text{m}$ から $0.5\mu\text{m}$ とすることにより、約2倍の記録磁界強度を得ることができる。

図2.19は、長手方向と垂直方向の磁界分布の磁界勾配 $\partial H_x / \partial x$ ,  $\partial H_y / \partial x$ とギャップ長の関係を計算したものである。各々のギャップ長での起磁力は図2.18と同様、ヘッドの飽和開始点の起磁力を選んだ。磁界勾配はギャップ長が狭いほど急峻となる。特に、垂直方向の磁界勾配の改善効果が著しい。従って、リング型磁気ヘッドで垂直記録を行う系では、高密度記録の観点からは狭ギャップ長化が望まれるが<sup>(2-15)</sup>、図2.18に示したように、狭ギャップ長化による磁界強度の不足が課題となる。これを解決する方法としては、次節で述べるヘッド磁性材料の高飽和磁束密度化<sup>(2-16)-(2-18)</sup>、あるいはヘッドと媒体間のスペーシングの短縮および媒体薄膜化が考えられる。

以上、ギャップ長が記録磁界に及ぼす影響について述べてきたが、再生特性の観点では、ギャップ長はリング型磁気ヘッドの再生分解能を決定する主要パラメータである。ギャップ損失と呼ばれる波長依存性損失により、再生出力は低下する。このギャップ損失 $L_g$ は、以下の解析式により求められる<sup>(2-13)</sup>。

$$L_g = 20 \log [ (\pi g / \lambda) / \sin (\pi g / \lambda) ] \quad (2-13)$$

$L_g$ : ギャップ損失 (dB)     $g$ : ギャップ長 ( $\mu\text{m}$ )

$\lambda$ : 記録波長 ( $\mu\text{m}$ )

通常は、ギャップ長は装置の最短記録波長の $1/3$ 以下に設計される。ギャップ長 $g$ が記録波長の $1/3$ の場合のギャップ損失を上式により求めると、約 $1.6\text{dB}$ となる。従って、ギャップ長は記録における飽和記録特性と高密度特性、さらに再生における再生分解能との関係を考慮して決定する必要がある。



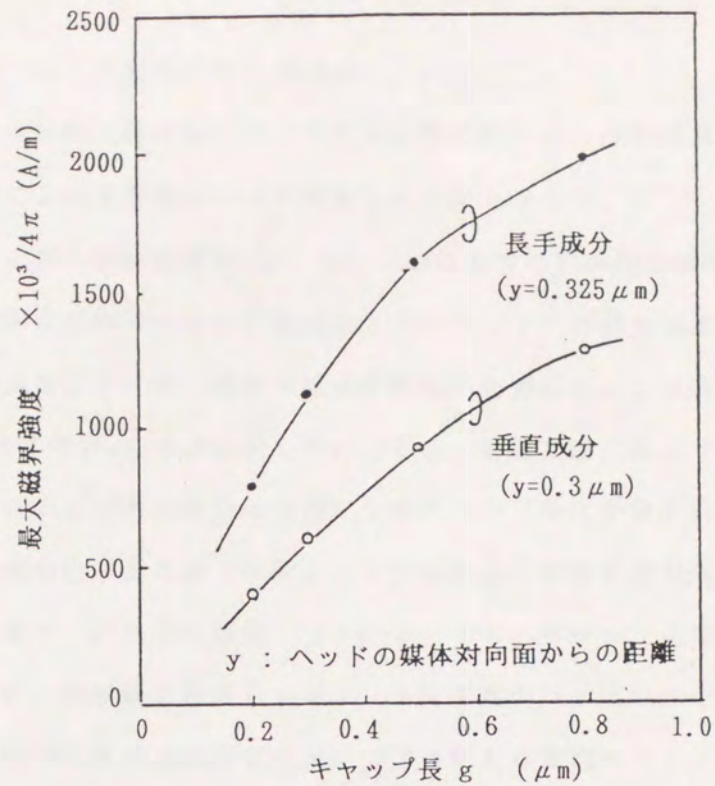


図 2. 1 8 最大磁界強度のギャップ長依存性

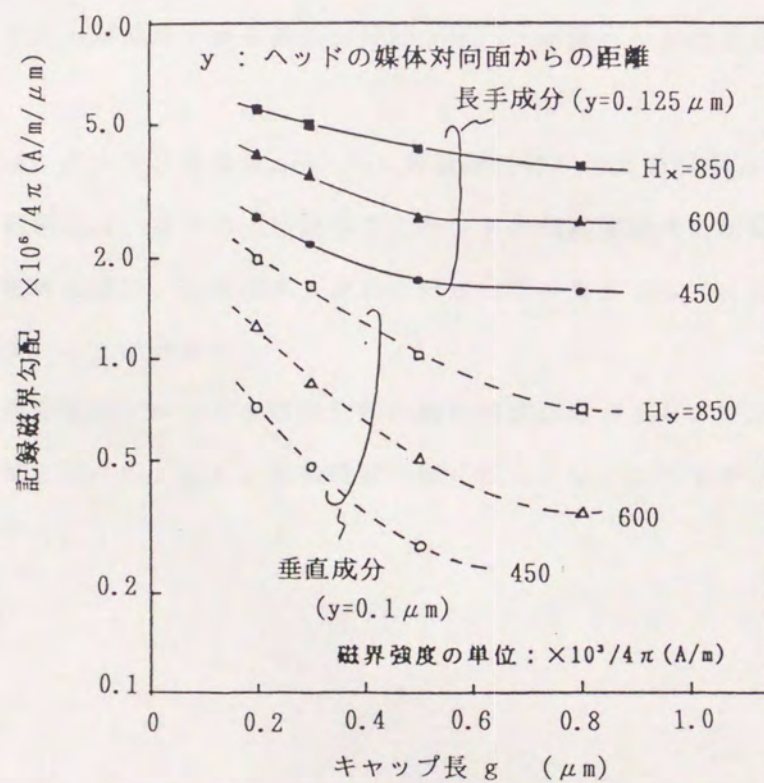


図 2. 1 9 ヘッド磁界勾配のギャップ長依存性



#### 2-3-1-4 ヘッド磁気特性との関係

本節では、ヘッド磁気特性として、ヘッドの軟磁性材料の飽和磁束密度  $B_s$  および透磁率  $\mu$  が記録磁界に及ぼす影響について解析した結果を述べる。

図 2. 20 に、最大磁界強度  $H_{\max}$  とヘッドの軟磁性材料の飽和磁束密度  $B_s$  との関係を示す。飽和磁束密度以外のヘッドの諸元は、2-3-1-2 節と同様である。起磁力は、各々の飽和磁束密度における、飽和開始点の起磁力を選んだ。この図から、最大磁界強度  $H_{\max}$  は飽和磁束密度  $B_s$  にほぼ比例して向上する。前節で述べたように、高密度化を実現するには記録特性および再生特性の両面から狭ギャップ長化が望まれる。この狭ギャップ長化による磁界強度の不足を補う手段として高飽和磁束密度化は有効である。本研究で検討した構造の磁気ディスク用の磁気ヘッドにおいても、ギャップ近傍を  $MnZn$  フェライト材料の替わりに、飽和磁束密度  $B_s$  が 1.0 T 程度のパーマロイやセンダストあるいは Co 合金薄膜材料等の高飽和磁束密度材料で置き換える構造のヘッド、いわゆる MIG ヘッド (Metal-In-Gap ヘッドの略称) が実用化されている<sup>(2-18)</sup>。さらに、大型磁気ディスク装置で現在主流となっている薄膜磁気ヘッドでは、記録磁界強度の確保のためヘッド飽和の回避はより一層重要な課題となっており、上記材料の他、飽和磁束密度  $B_s$  が 1.5 T 以上が期待できる鉄系の材料を用いた薄膜ヘッドの研究が盛んに行われている<sup>(2-19)</sup>。

図 2. 21 は、最大磁界強度  $H_{\max}$  とヘッド軟磁性材料の比透磁率  $\mu$  との関係を示したものである。起磁力は、各々の比透磁率で、ヘッドの飽和開始点の起磁力を選んだ。この図から、記録磁界強度は、比透磁率  $\mu$  がある程度大きい条件では ( $\mu \geq 500$ )、比透磁率  $\mu$  に依存しないことが分かる。

以上、記録磁界強度とヘッド軟磁性材料の飽和磁束密度  $B_s$  および比透磁率  $\mu$  との関係を解析した結果を述べた。なお、記録磁界勾配に関しては、これらのパラメータに依存しないので省略する。



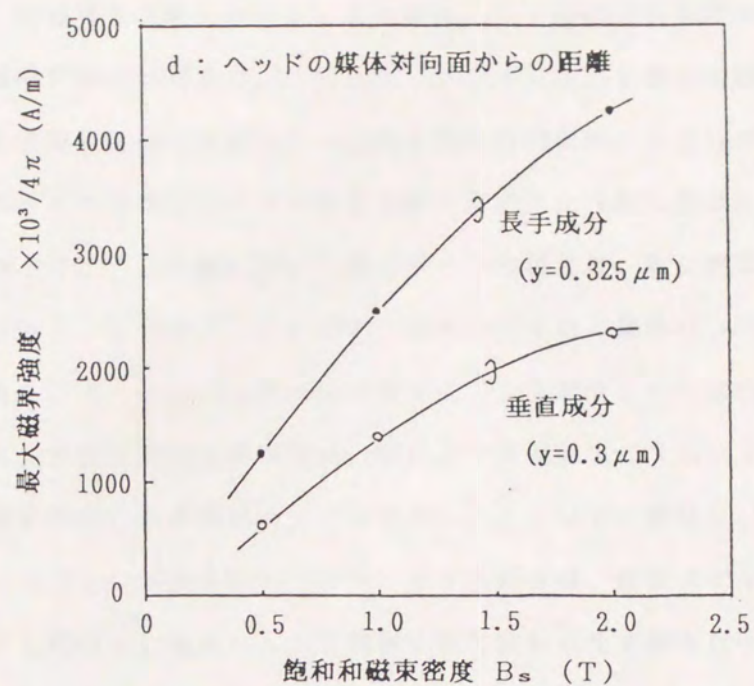


図 2. 2 0 最大磁界強度の飽和磁束密度依存性

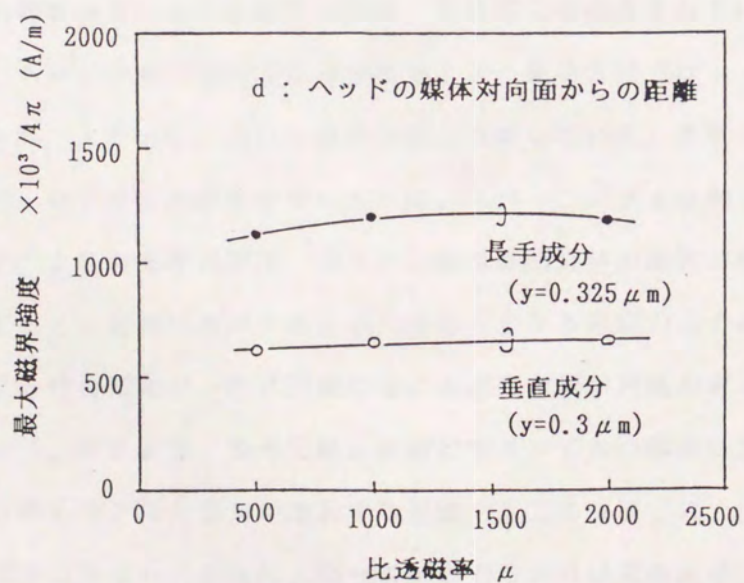


図 2. 2 1 最大磁界強度の比透磁率依存性



### 2-3-1-5 記録再生実験によるリング型磁気ヘッドの高密度記録条件の検討

本節では、記録磁界解析の対象としたMn-Znフェライトを軟磁性材料としたリング型磁気ヘッドと長手記録用塗布媒体および垂直記録用薄膜媒体の2通りの組合せで記録再生実験を行い、ヘッドの磁界強度および磁界勾配が記録再生特性に及ぼす影響について考察した結果を述べる<sup>(2-15)</sup>。実験に用いた磁気ヘッドの諸元は、既に表2.1に示している。媒体の諸元を表2.2と表2.3に示す。長手記録用塗布媒体は、フロッピディスク装置用に開発された、 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 針状粉の表面にCoを被着させた磁性材料を用いた高保磁力媒体である。垂直記録用薄膜媒体は、強化ガラス基盤上にスパッタリングによりCo-Cr記録膜を形成した実験用サンプルを用いた。フロッピ媒体は、スピンドルに固定したガラスディスク上に媒体を貼り付けて、ガラス媒体は、直接スピンドルに媒体を固定した後、回転する媒体上に磁気ヘッドを接触させて記録再生実験を行った。ヘッドと媒体間の相対速度 $v$ は、 $2.5\text{ m/s}$ とした。

図2.22に、 $10\text{ k FCI}$  (Flux Change per Inch: 1インチ当りの磁化反転数)、すなわち記録波長 $\lambda = 5\text{ }\mu\text{m}$ における、起磁力と再生出力との関係を実測した結果を示す。また、図2.23は、実測ヘッドの条件における、長手方向と垂直方向の磁界分布の磁界勾配 $\partial H_x / \partial x$ ,  $\partial H_y / \partial x$ と起磁力の関係を計算したものである。実測に用いた媒体の保磁力相当の磁界強度における磁界勾配は、この図にはほぼ含まれている。なお、図2.23では、ヘッドの媒体対向面からの距離 $y$ が、長手方向では $y = 0.125\text{ }\mu\text{m}$ 、垂直方向では $y = 0.10\text{ }\mu\text{m}$ における磁界勾配を計算している。光学干渉縞によるヘッドと媒体間のスペーシング $d$ の実測結果によれば、スペーシング $d$ は約 $0.05\text{ }\mu\text{m}$ である。従って、図2.23の磁界勾配は、媒体の記録層表面近傍の磁界勾配といえる。この2つの図を比較すると、実測において再生出力が最大となる起磁力以上の領域における再生出力の起磁力依存性の傾向が、磁界計算における磁界勾配の起磁力依存性の傾向と非常によく一致している。すなわち、長手記録と垂直記録のいずれの媒体においても、磁界勾配の計算結果を反映して、再生出力が飽和する起磁力以上の領域では、保磁力の高い媒体ほど再生出力の減少は少ない。さらに、同一の保磁力であれば垂直記録用媒体のほうが長手記録用媒体よりも再生出力の減少は少ない。以上の結果から、長手記録と垂直記録のいずれの記録方式においても、再生出力は磁界勾配に強く依存することが分かった。従って、記録磁界の観点からは、ヘッドの磁界勾配を急峻にすることが高密度化にとって重要であ



ることを示している。また、媒体の観点からは、飽和記録が可能な範囲で、保磁力の高い媒体を用いるほうが、急峻な磁界勾配で記録できるため、高密度記録に有利であることが明かとなった。



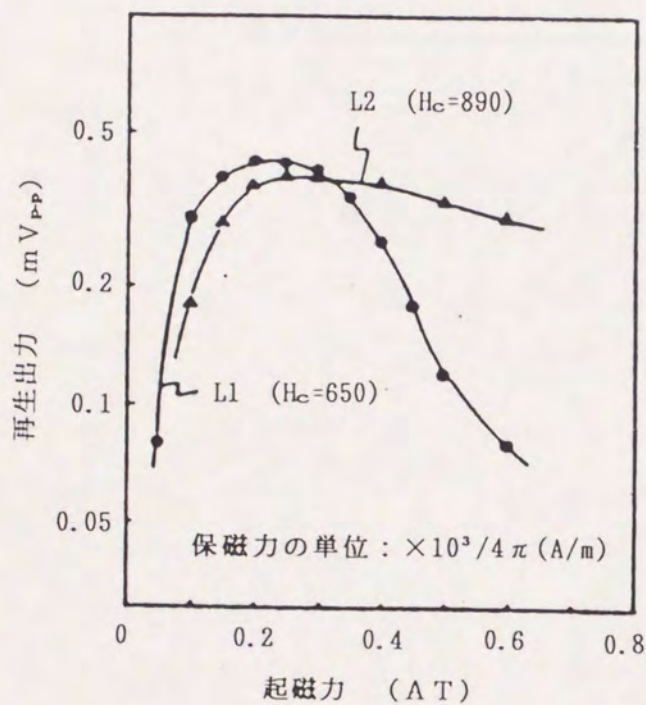
表 2. 2 長手記録用塗布媒体の諸元(長手方向)

| 媒体 # | 材料                | 飽和磁化<br>$M_s(\text{k A/m})$ | 保磁力<br>$H_c(10^3/4\pi \text{ A/m})$ | 角形比<br>$S_q$ | 膜厚<br>$\delta(\mu\text{m})$ |
|------|-------------------|-----------------------------|-------------------------------------|--------------|-----------------------------|
| L 1  | Co被着 $\gamma$ 酸化鉄 | 1 0 7                       | 6 5 0                               | 0. 5 6       | 1. 2 0                      |
| L 2  | Co被着 $\gamma$ 酸化鉄 | 9 4                         | 8 9 0                               | 0. 5 6       | 1. 2 0                      |

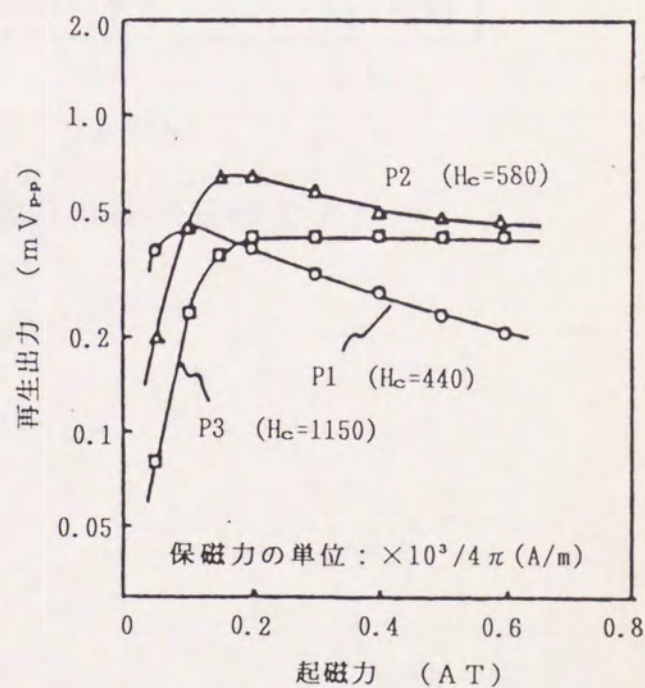
表 2. 3 垂直記録用薄膜媒体の諸元(垂直方向)

| 媒体 # | 材料      | 飽和磁化<br>$M_s(\text{k A/m})$ | 保磁力<br>$H_c(10^3/4\pi \text{ A/m})$ | 角形比<br>$S_q$ | 膜厚<br>$\delta(\mu\text{m})$ |
|------|---------|-----------------------------|-------------------------------------|--------------|-----------------------------|
| P 1  | C o C r | 2 7 2                       | 4 4 0                               | 0. 1 7       | 0. 4 6                      |
| P 2  | C o C r | 2 9 3                       | 5 8 0                               | 0. 1 8       | 0. 4 1                      |
| P 3  | C o C r | 3 7 2                       | 1 1 5 0                             | 0. 2 7       | 1. 0 0                      |

(注) 角形比は反磁界未補正



(a) 長手記録用塗布媒体



(b) 垂直記録用薄膜媒体

図 2. 2 2 10 k F C I における再生出力の起磁力依存性



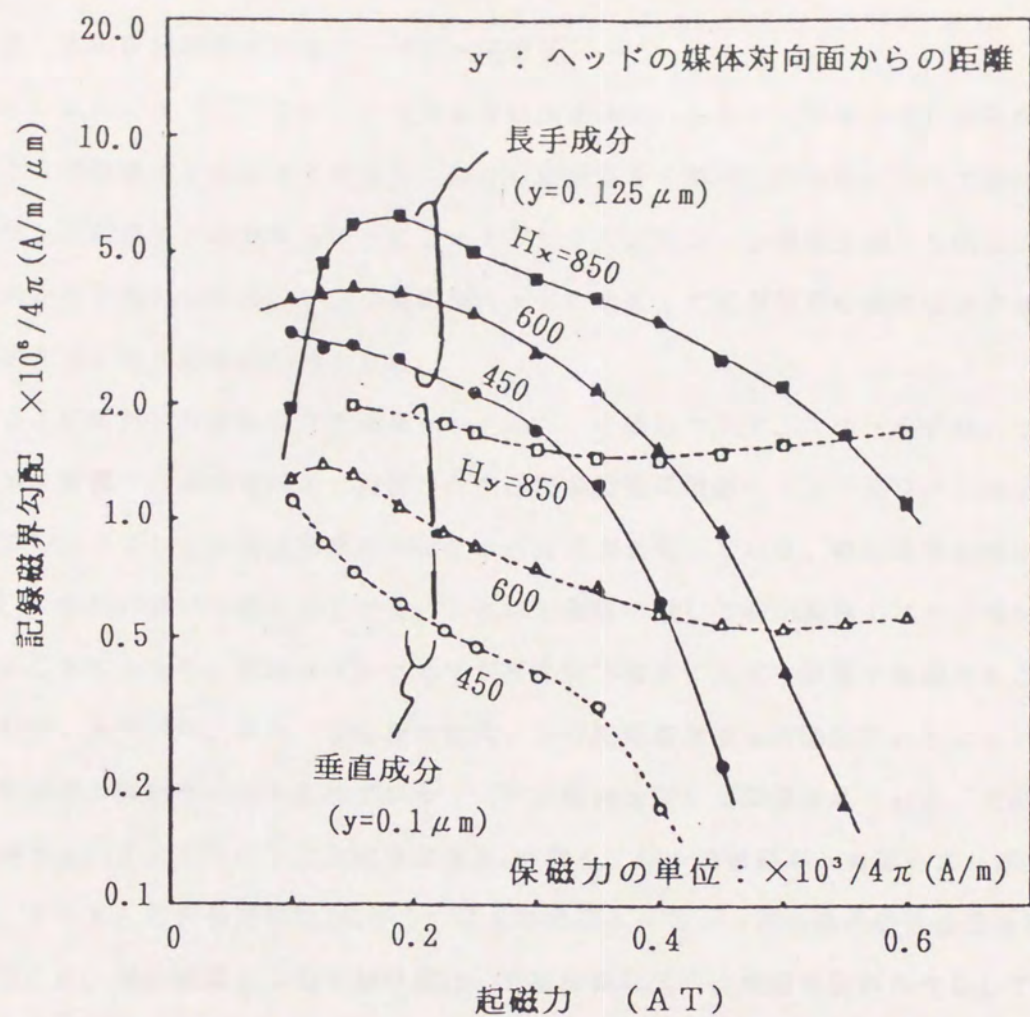


図2. 23 ヘッド磁界勾配の起磁力依存性



### 2-3-2 主磁極励磁型単磁極ヘッドの記録磁界

本節では、図2.3(b)に示した主磁極励磁型単磁極ヘッドと記録層の下に軟磁性層を配置した2層膜媒体を組み合わせた系における記録磁界を解析した結果について述べる。この系では、記録電流を印加することによって発生する磁束は、主磁極先端から媒体の軟磁性層に向かって流れるため、リング型磁気ヘッドに比較して記録磁界の垂直成分が強く、より理想的な垂直磁気記録が期待できる。

図2.24に解析の対象とした単磁極ヘッドのヘッド構造を示す。このヘッドは、フロッピディスク装置への適用を考えて設計した主磁極励磁型単磁極ヘッドであり、主磁極と磁束のリターンパスとなる補助磁極が一体化された構造となっている。補助磁極の媒体対向面には、V字状の溝が形成されている。これは主磁極に対して補助磁極のエッジ部を非平行とすることによって、擬似ギャップ効果が再生出力波形に及ぼす影響を軽減することを目的としている<sup>(2-20)</sup>。また、主磁極の飽和により記録磁界強度が制限されることを防ぐため、主磁極の両側面には軟磁性ブロック（主磁極補助部）が配置されている。主磁極膜は、記録再生の主要部であり飽和磁束密度 $B_s$ が高く、かつ比透磁率 $\mu$ も高いことが必要である。そこで、飽和磁束密度 $B_s$ が1.25 TのCo-Zr-Nb非晶質合金膜を解析の対象とした。補助磁極と主磁極補助部は、主磁極膜に比べ、軟磁性材料特性として高い性能を必要としないため、加工性および耐摩耗性の観点から飽和磁束密度 $B_s$ が0.5 TのMnZnフェライト単結晶を選んだ。

図2.25に、2次元記録磁界解析における本ヘッドの寸法形状を示す。また、表2.4には、本ヘッドの記録再生特性を検討する場合に、主として考慮すべきヘッド・媒体磁気パラメータを示すとともに、記録磁界の計算におけるこれらのパラメータの標準値を示した。主磁極膜は、Co-Zr-Nb非晶質合金膜の磁気特性の実測値を参考にして検討を行った。また、媒体の軟磁性層としては、Co-Mo-Zr膜の磁気特性を参考とした<sup>(2-21)</sup>。本節の記録磁界の解析では、表2.4のヘッド・媒体磁気パラメータのうち、網かけをしたパラメータは可変とし、その他のパラメータは表2.4に示した値で一定として検討を行った。この系の記録磁界は、磁気ヘッドと媒体の軟磁性層との磁氣的結合に大きく影響される。従って、記録磁界の解析に関しては、磁気ヘッドと媒体の軟磁性層との磁氣的結合に深く関わるパラメータと記録磁界との関係を中心に解析を行った。



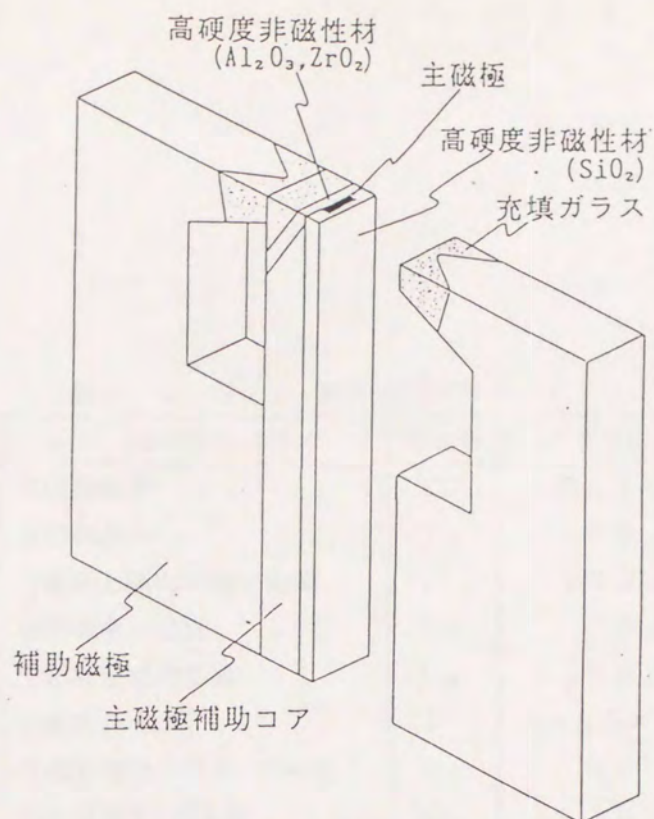


図 2. 24 主磁極励磁型単磁極ヘッドの構造

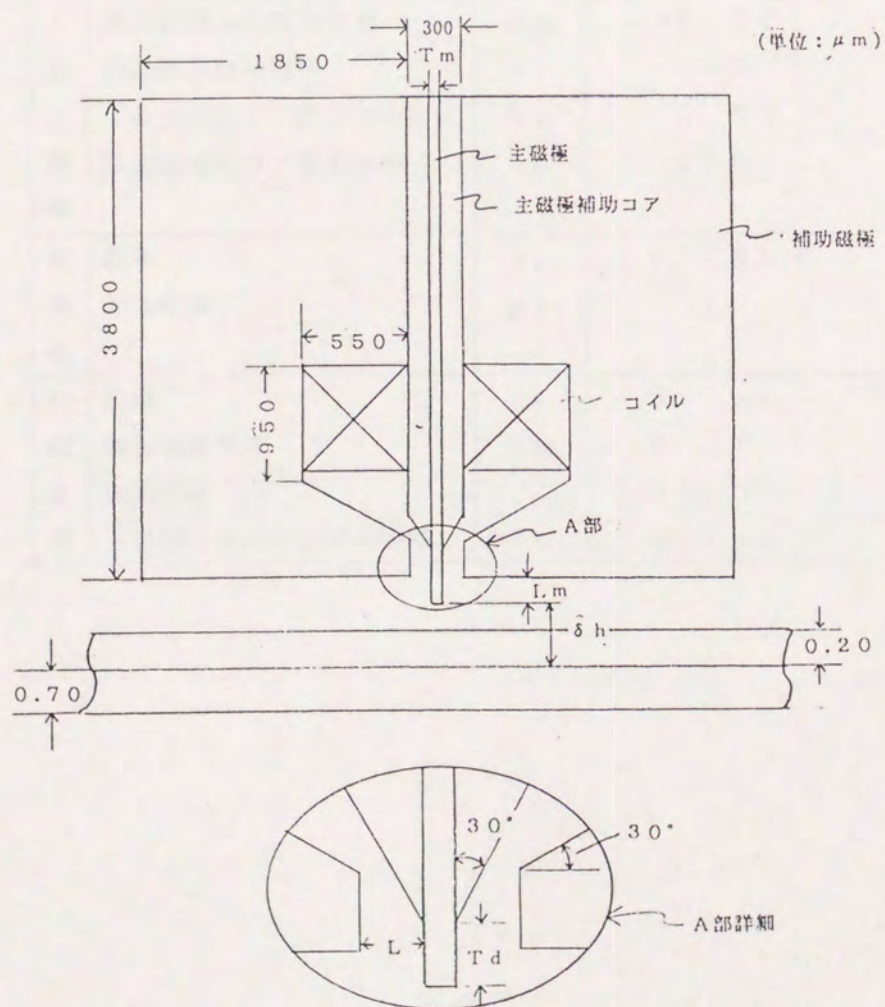


図 2. 25 解析対象ヘッドの寸法形状



表2. 4 ヘッド・媒体磁気パラメータ

|              | ヘッド・媒体磁気パラメータ | 略記号        | パラメータ基準値               |
|--------------|---------------|------------|------------------------|
| ヘッド・媒体<br>形状 | 主磁極膜厚         | $T_m$      | $0.2 \mu m$            |
|              | 主磁極高さ         | $T_d$      | $10 \mu m$             |
|              | 主磁極と補助磁極の距離   | $L$        | $150 \mu m$            |
|              | 補助磁極の高さ       | $L_m$      | $0 \mu m$              |
|              | 主磁極補助コア幅      | $L_a$      | $300 \mu m$            |
|              | 巻線窓サイズ        | —          | $550 \times 900 \mu m$ |
|              | 主磁極補助コアテーパー角度 | $\theta_a$ | $30^\circ$             |
|              | 補助磁極テーパー角度    | $\theta_b$ | $30^\circ$             |
| 磁気特性         | 主磁極飽和磁束密度     | $B_{Sm}$   | $1.25 T$               |
|              | 主磁極比透磁率       | $\mu_m$    | 1000                   |
|              | 補助磁極飽和磁束密度    | $B_{Sa}$   | $0.5 T$                |
|              | 補助磁極比透磁率      | $\mu_a$    | 500                    |
|              | 主磁極補助コア飽和磁束密度 | $B_{Sc}$   | $0.5 T$                |
|              | 主磁極補助コア比透磁率   | $\mu_c$    | 500                    |
| 記録層          | 膜厚            | $\delta_r$ | $0.15 \mu m$           |
|              | 比透磁率          | $\mu_r$    | 1                      |
| 軟磁性膜         | 膜厚            | $\delta_b$ | $0.7 \mu m$            |
|              | 飽和磁束密度        | $B_{sb}$   | $0.5 T$                |
|              | 比透磁率          | $\mu_b$    | 1000                   |
|              | 主磁極・軟磁性膜間の距離  | $\delta_h$ | $0.2 \mu m$            |



### 2-3-2-1 ヘッド・媒体間の磁氣的相互作用の効果

単磁極ヘッドとC o - C r 2層膜媒体を組み合わせた系による垂直磁氣記録では、ヘッドと媒体の磁氣パラメータの最適化を行うとともに、ヘッド・媒体間のスペーシングを狭くすることにより、650 k F C I (記録波長0.08  $\mu$ m) の高密度記録を実現できることが、実験で確認されている<sup>(2-22)</sup>。そして、このような高密度記録が実現できる要因として、この記録再生系におけるヘッド・媒体間の強い磁氣的相互作用が指摘されている<sup>(2-23) (2-24) (2-25) (2-26)</sup>。そこで、本研究では、ヘッド・媒体間の磁氣的相互作用が記録磁界に及ぼす影響を中心に単磁極ヘッドの記録磁界の解析を試みた<sup>(2-7)</sup>。

本節の記録磁界の解析では、表2.4に示したヘッド・媒体磁氣パラメータの値を基準値として用いた。すなわち、主磁極膜厚 $T_m$ 、記録層膜厚 $\delta_r$ 、軟磁性層膜厚 $\delta_b$ は、各々0.2  $\mu$ m、0.15  $\mu$ m、0.7  $\mu$ mとし、ヘッド・媒体間のスペーシング $d$ は、0.05  $\mu$ mとした。従って、ヘッドと媒体の軟磁性層間の距離 $\delta_h$ は、0.2  $\mu$ mである。また、主磁極と軟磁性層の比透磁率 $\mu_m$ 、 $\mu_b$ は、1000とし、主磁極補助部と補助磁極の比透磁率 $\mu_c$ 、 $\mu_a$ は、500とした。さらに、媒体の記録層の比透磁率 $\mu_r$ については、従来どうり $\mu_r=1$ とした。なお、本節では軟磁性部の飽和効果は考慮せず、飽和磁束密度は無限大として計算を行った。

図2.26は、主磁極近傍の磁力線分布により、ヘッド・媒体間の磁氣的相互作用の効果を解析した結果である。図2.26(a)は、ヘッド単体の場合、図2.26(b)は、媒体の軟磁性層の効果を考慮した場合である。(a)(b)より、媒体の記録層の下に軟磁性層を置いて、磁氣的に閉磁路構造とする効果により、主磁極先端から発生する記録磁界は、垂直磁氣記録に適した垂直成分の強い磁界となることが分かる。

図2.27は、図2.26に示した2種類のケースに対応した記録磁界分布を、記録膜表面と裏面について計算したものである。この図より、媒体の軟磁性膜の効果により、垂直方向の記録磁界分布の裾の拡がりが少なくなるとともに、記録磁界の長手成分が減少してゆく様子が把握できる。表2.5は、以上に示した2種類のケースの垂直方向の記録磁界の解析結果を、以下に示す評価尺度により定量的に比較したものである。

(a) 記録効率：記録膜表面における主磁極中心の磁界強度を、ヘッド・媒体間の磁氣的相互作用を考慮しない場合の磁界強度で規格化。

(b) 裾広がり率：主磁極中心から1  $\mu$ m離れた位置の磁界強度 $H_2$ を、主磁極中心の



磁界強度  $H_1$  で規格化。

(c) 磁界強度の膜厚方向依存度：記録膜裏面における主磁極中心の磁界強度  $H_{\text{bottom}}$

を記録膜表面における主磁極中心の磁界強度  $H_{\text{top}}$

で規格化。

媒体の記録層の下に軟磁性層を配置することにより、記録効率および垂直方向の磁界分布が大きく改善されるとともに、膜厚方向で均一な磁界強度が得られるようになる。このように、単磁極ヘッドの記録磁界は、ヘッドと媒体の軟磁性層の磁氣的結合の影響を強く受ける。従って、この系の記録磁界の検討には、ヘッド単体の磁気特性とともに媒体の軟磁性層の磁気特性の影響を考慮して解析する必要がある。



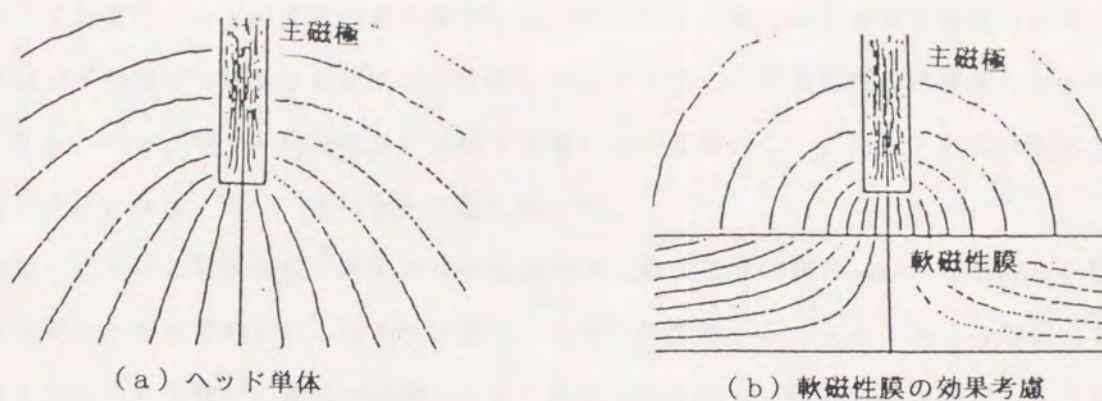


図 2. 2 6 記録磁界に及ぼすヘッド・媒体相互作用の効果

表 2. 5 記録磁界分布とヘッド・媒体相互作用の関係

| 評価項目             | ヘッド単体 | 軟磁性膜の効果考慮 |
|------------------|-------|-----------|
| 記録効率             | 1     | 1.5       |
| 裾広がり率            | 0.19  | 0.13      |
| 磁界強度の<br>膜厚方向依存度 | 0.65  | 0.83      |

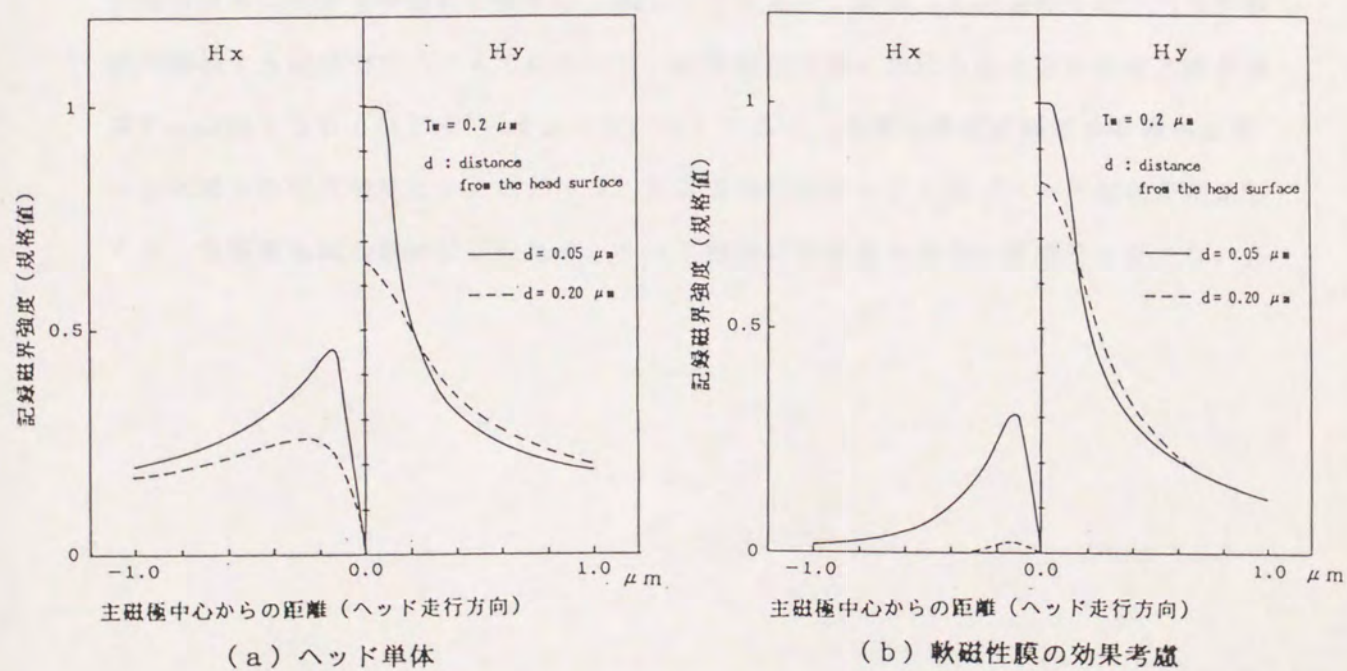


図 2. 2 7 記録磁界分布とヘッド・媒体相互作用の関係



## 2-3-2-2 ヘッド飽和の影響

リング型磁気ヘッドの記録磁界の解析において、ヘッド飽和は記録磁界強度のみならず記録磁界分布にも影響を及ぼすことを示した。そこで、主磁極励磁型単磁極ヘッドについても、ヘッド飽和が記録磁界に及ぼす影響について検討した。ヘッドおよび媒体の磁気パラメータは、表2.4に示した値を用いた。

図2.28は、記録層最下層における垂直方向の最大磁界強度 $H_{y\max}$ と起磁力との関係を計算したものである。これより、表2.4の条件では、0.1 A T以上の起磁力を印加するとヘッド飽和の影響が顕著となり、起磁力に比例して磁界強度が増加しなくなることが分かる。次に、このヘッドにおいて、飽和が最初に発生する場所を調べてみた。結果を図2.29に示す。この図は、主磁極内部の垂直方向磁束密度分布を求めたものである。起磁力としては、ヘッド飽和の影響が見え始める0.125 A Tと、その倍および4倍の起磁力を選んだ。この図から、飽和が最初に発生する場所は、主磁極先端から10  $\mu$  mの位置であることが分かる。図2.25で定義した主磁極高さ $T_d$ は、表2.4の条件では10  $\mu$  mであるから、この結果は、ヘッド飽和は主磁極両側に主磁極補助コアが存在する領域から主磁極単独の領域の境界位置で発生することを示している。記録磁界強度は主磁極先端の磁束密度で決まるため、主磁極励磁型単磁極ヘッドのヘッド構造では、記録磁界強度向上の観点から主磁極補助コアはできるだけ主磁極先端に近づけることが望ましい。ただし、図2.28より、表2.4の条件では、ヘッド飽和が開始する起磁力0.1 A Tにおいて、記録層最下層における垂直方向の最大磁界強度 $H_{y\max}$ は $1500 \times 10^3 / 4\pi$  (A/m)であり、通常の垂直記録媒体を飽和記録するに十分な磁界強度といえる。一方、記録磁界分布については、ヘッド飽和が開始しても、主磁極先端は飽和しないため、ヘッド飽和は記録磁界分布に影響を及ぼさない。



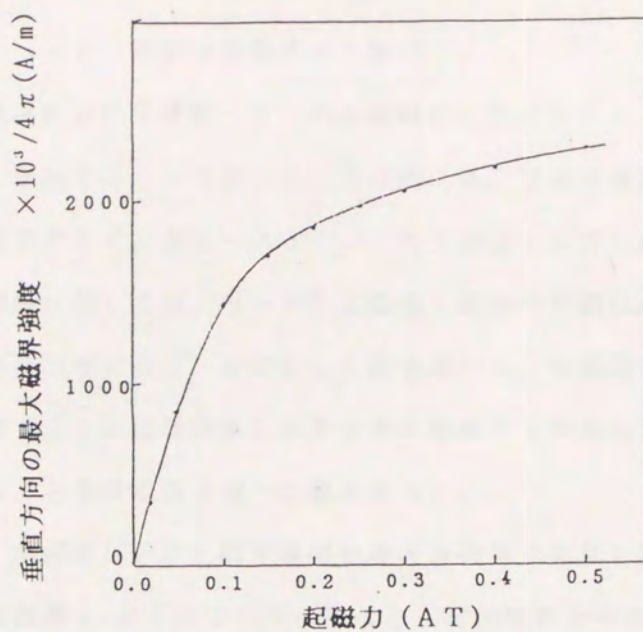


図 2. 28 垂直方向の最大磁界強度の  
起磁力依存性(記録膜最下層)

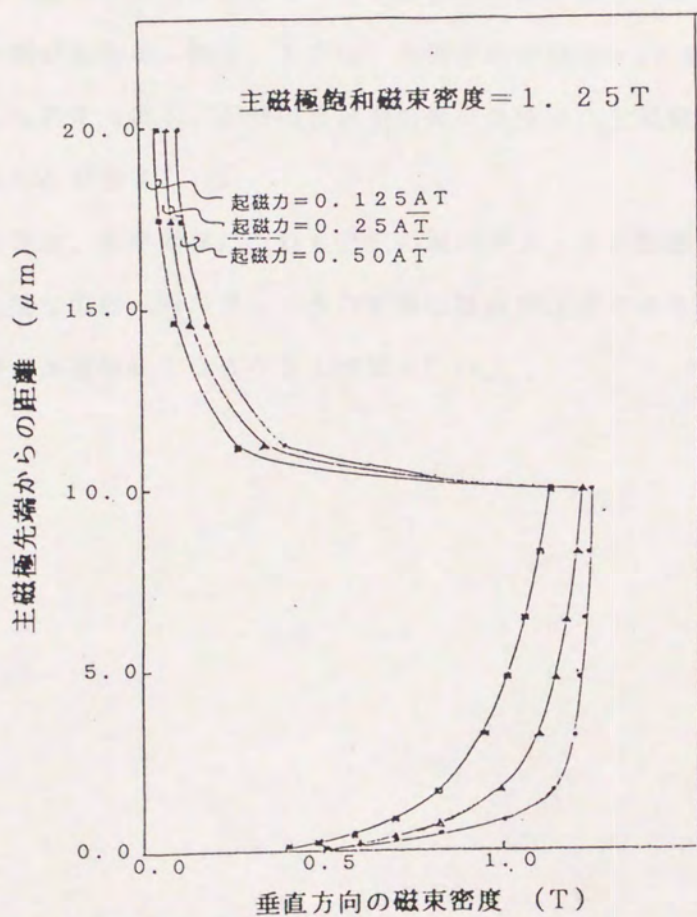


図 2. 29 主磁極内部における垂直方向磁束密度分布



### 2-3-2-3 ヘッド・媒体磁気特性との関係

本節では、主磁極励磁型単磁極ヘッドの記録磁界に及ぼすヘッド・媒体磁気パラメータの影響を解析した結果について述べる。具体的には、閉磁路構造の磁気ヘッドの記録磁界に大きな影響を及ぼすと考えられるヘッドの主磁極と媒体の軟磁性層の透磁率について検討した。解析に際しては、ヘッドの主磁極と媒体の軟磁性層の透磁率以外のヘッド・媒体パラメータの値は表2.4に示した値を用いた。記録磁界の評価尺度としては、2-3-2-1節で述べた記録効率と磁界分布の裾拡がり率を採用した。なお、磁界分布の裾拡がり率は、記録膜の最上層での値を求めた。

図2.30は、記録磁界分布と媒体軟磁性層の透磁率の関係を解析した結果である。媒体軟磁性層の透磁率 $\mu_b$ が100以下になると、記録磁界分布の劣化が顕著となる。図2.31は、媒体軟磁性層の透磁率 $\mu_b$ が1と1000の場合について、垂直方向の記録磁界分布を比較したものである。媒体軟磁性層の透磁率 $\mu_b$ が小さくなると、ヘッド・媒体間の磁氣的結合が弱まりヘッドの主磁極側面からのもれ磁束が増加して、記録磁界分布の裾が拡がる。図2.32は、主磁極の透磁率 $\mu_m$ と記録磁界分布の関係について検討した結果である。記録磁界分布の観点からは、主磁極の透磁率 $\mu_m$ は1000以上とすることが望ましい。

図2.33は、記録効率について上記の両パラメータの影響を検討した結果である。記録効率に関しては、両パラメータの影響はほぼ同程度であり、ヘッドの主磁極と媒体の軟磁性層の透磁率は1000以上が望ましい。



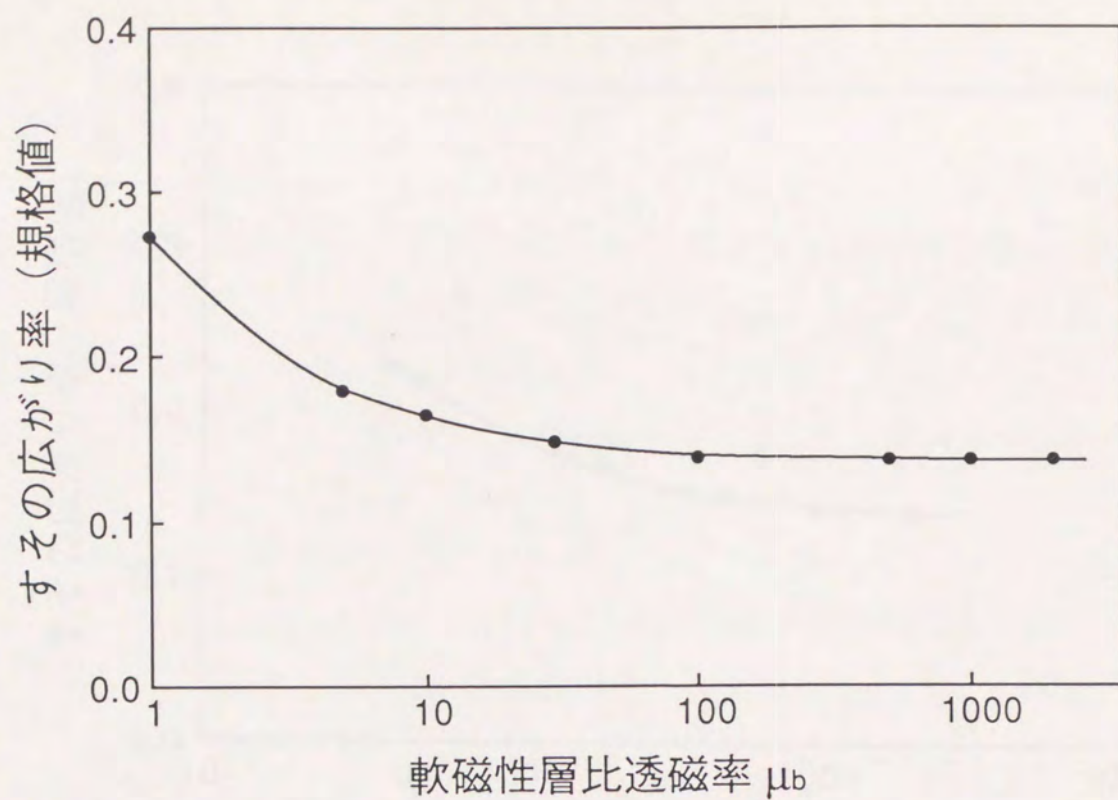


図 2. 3 0 記録磁界分布と媒体軟磁性膜の透磁率の関係 (1)

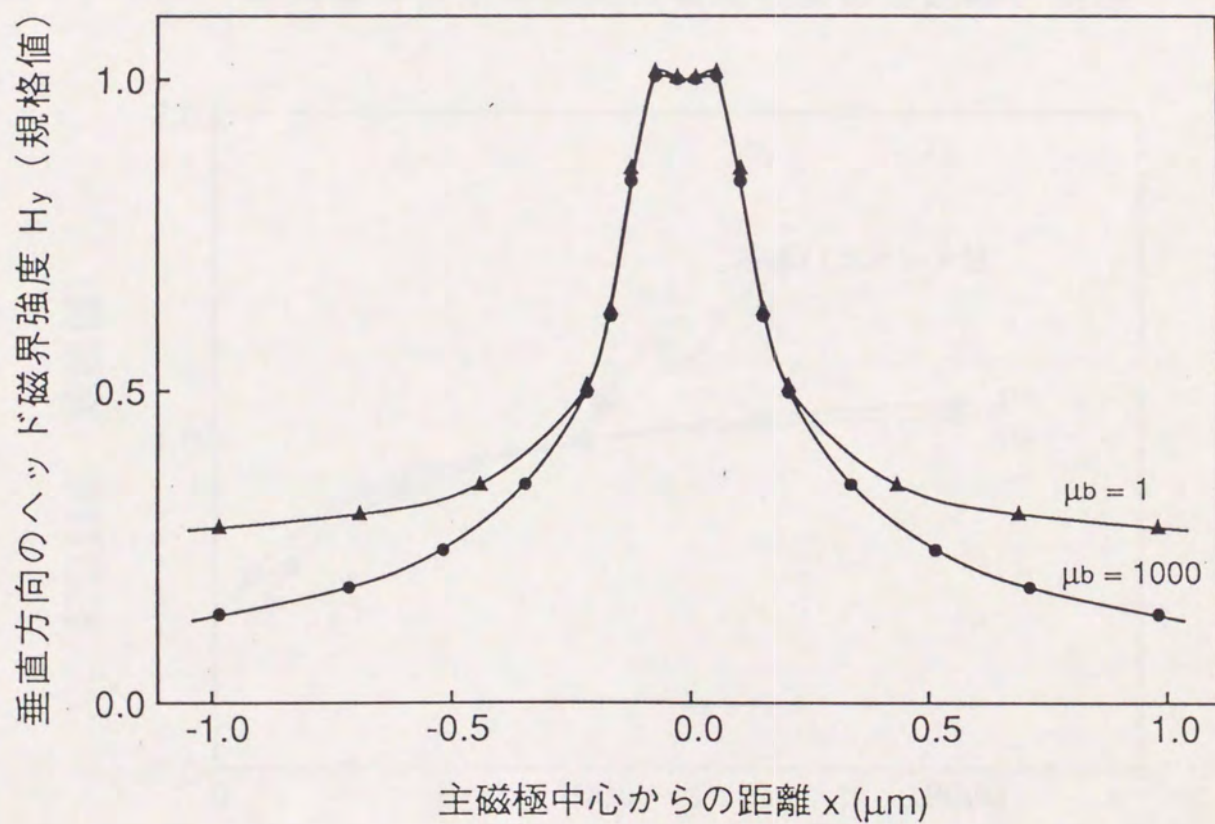


図 2. 3 1 記録磁界分布と媒体軟磁性膜の透磁率の関係 (2)



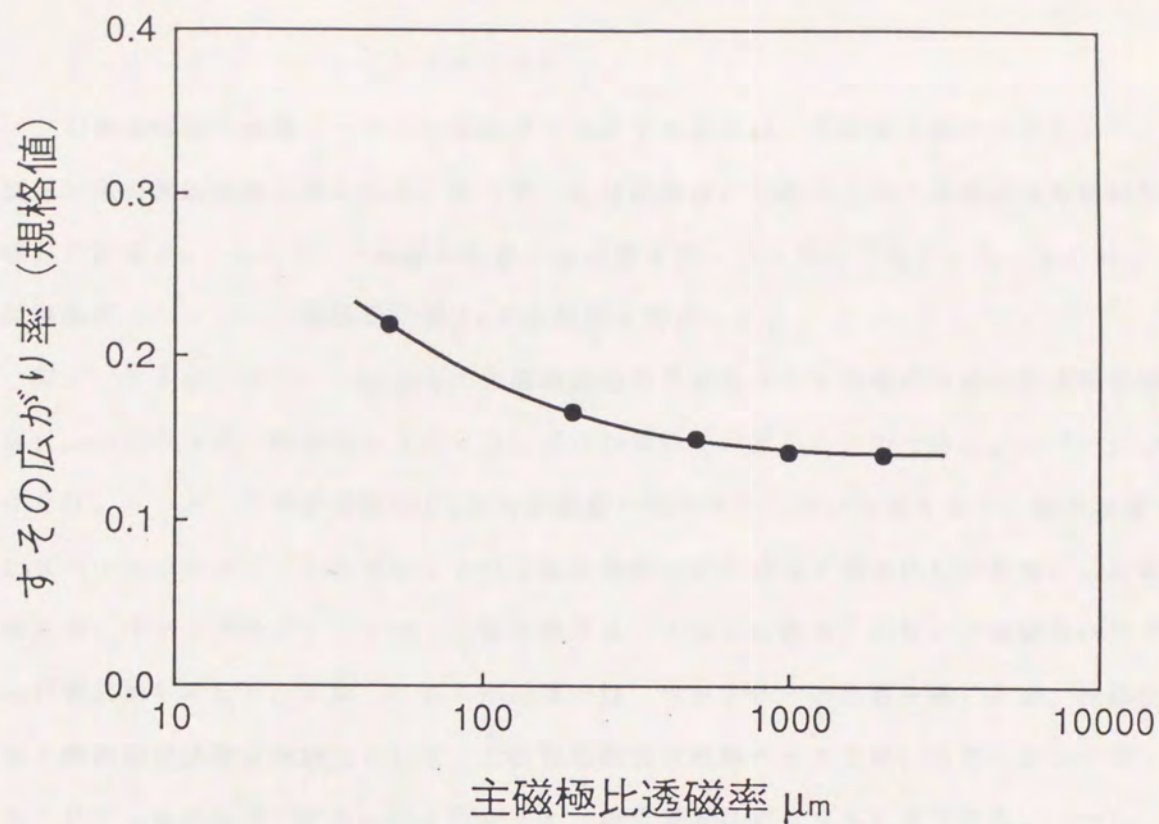


図 2. 3 2 記録磁界分布と主磁極軟磁性膜の透磁率の関係

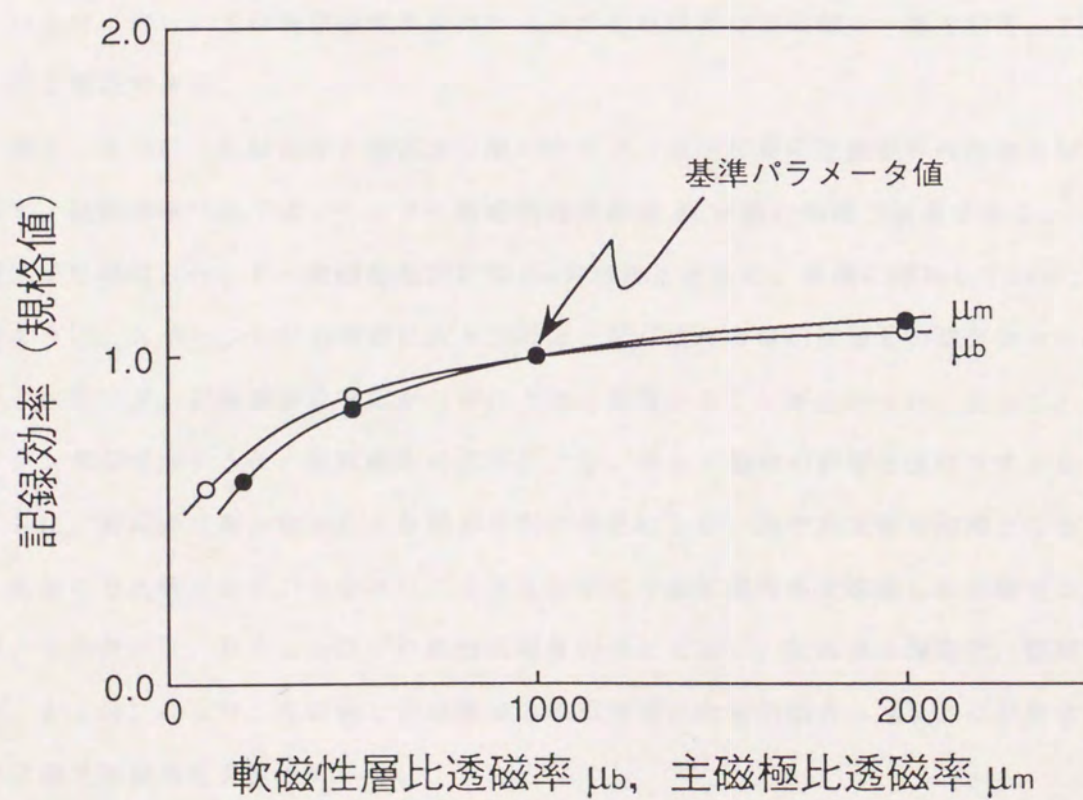


図 2. 3 3 記録効率と主磁極軟磁性膜及び媒体軟磁性膜の透磁率の関係



#### 2-3-2-4 ヘッドからの距離依存性

主磁極励磁型単磁極ヘッドの記録磁界を決定する磁束は、主磁極先端から発生して、記録媒体の軟磁性層に導かれる。従って、記録磁界は、主磁極先端と記録媒体の軟磁性層との距離 $\delta_h$ （ヘッド・下層膜間距離）の影響を強く受けると予想される。そこで、記録磁界とヘッド・下層膜間距離 $\delta_h$ との関係を解析した。

図2.34は、表2.4の条件の主磁極励磁型単磁極ヘッドの垂直方向の最大磁界強度 $H_{y\max}$ とヘッド・媒体間のスペーシング $d$ の関係を計算したものである。スペーシング $d$ は、ヘッド・下層膜間距離 $\delta_h$ から記録層の膜厚を差し引いた値である。磁界強度はスペーシングが $0.05\mu\text{m}$ における媒体表面の磁界強度で規格化して求めた。比較のため、ギャップ長 $0.2\mu\text{m}$ （主磁極膜厚 $0.2\mu\text{m}$ に相当）のリング型磁気ヘッドの計算結果も示した。なお、これらの計算では、ヘッド飽和の影響を除くため、軟磁性部の飽和磁束密度は無限大とした。主磁極励磁型単磁極ヘッドでは、スペーシングが $0.05\mu\text{m}$ から $0.30\mu\text{m}$ に広がると、磁界強度は約60%に低下する。しかし、リング型磁気ヘッドに比較すると、スペーシングの増加による記録磁界強度の低下は少ない。この差は、リング型磁気ヘッドの記録磁界がギャップ部からのもれ磁束を利用しているのに対し、主磁極励磁型単磁極ヘッドの記録磁界は閉磁路の一部を利用しているためと解釈できる。

図2.35に、記録効率と裾広がり率のヘッド・軟磁性層間距離依存性の検討結果を示す。記録効率の低下は、ヘッド・軟磁性層間距離 $\delta_h$ が狭い領域で顕著である。一方、裾広がり率は、ヘッド・軟磁性層間距離 $\delta_h$ の増加とともに、単調に増加している。このように、スペーシングの増加による主磁極と記録媒体の軟磁性層との磁気的カップリングの低下が、記録効率と裾広がり率に大きく影響することが分かった。従って、スペーシングが増加すると、記録効率の低下により、ヘッド飽和の影響を受けやすくなるとともに、裾広がり率の増加による磁界分布の劣化により、高密度記録が困難となることに注意する必要がある。ちなみに、650kFCIの記録再生を確認した実験では、スペーシングが $0.05\mu\text{m}$ 以下の接触記録を行うとともに、記録層の薄膜化（膜厚 $=0.1\mu\text{m}$ ）により、主磁極と記録媒体の軟磁性層との磁気的カップリングが非常に強い状態で記録再生を行っている。



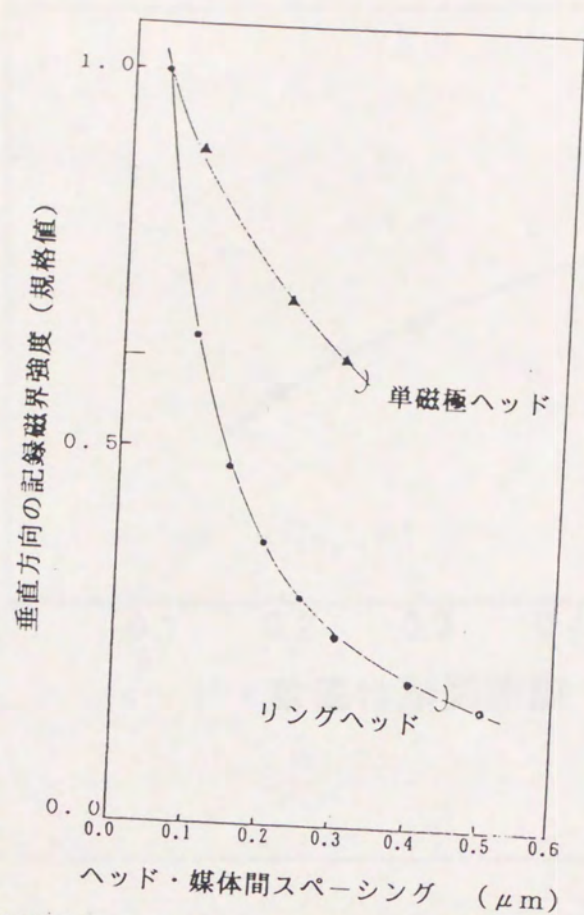


図 2. 3 4 単磁極ヘッドとリングヘッドの垂直方向記録磁界強度のヘッド・媒体間スペーシング依存性



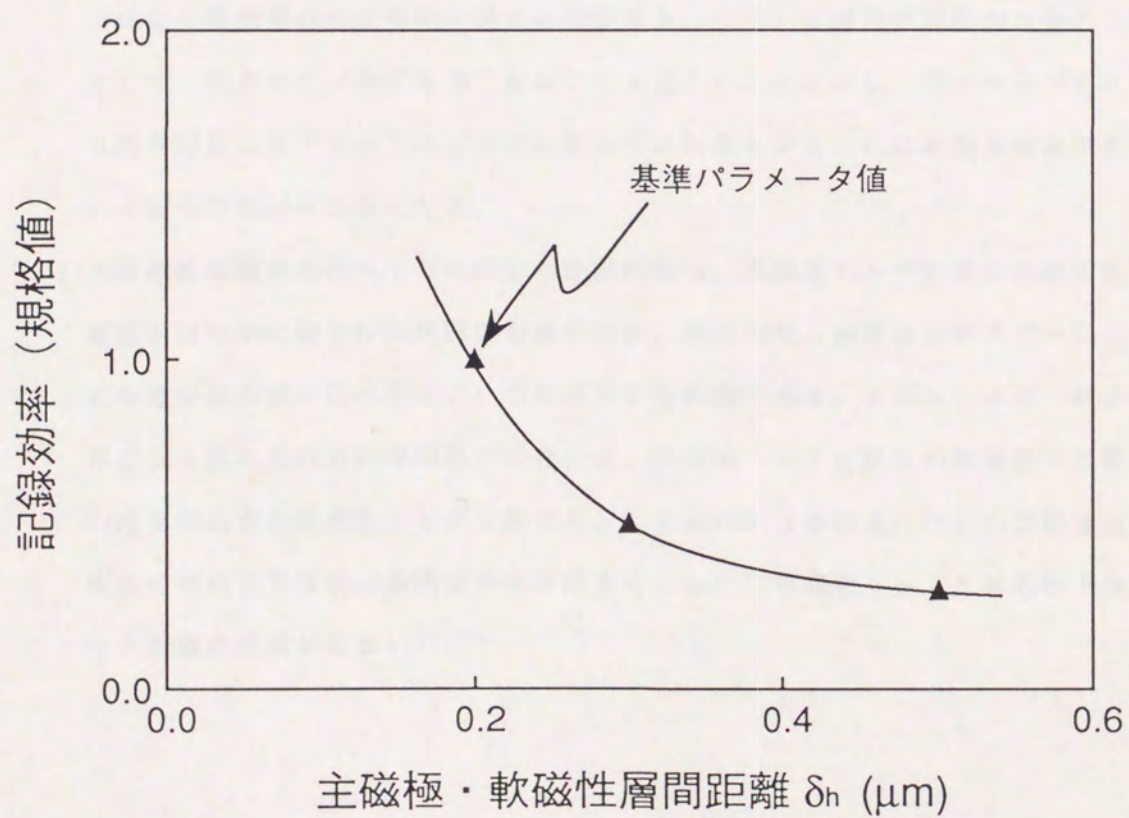
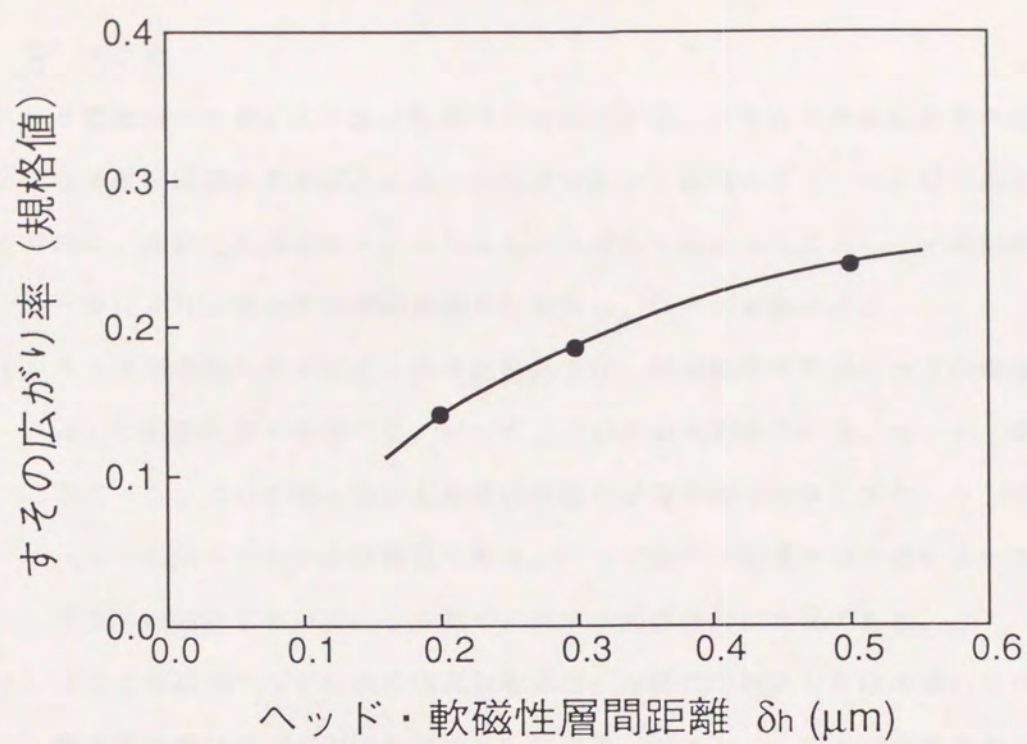


図 2. 3 5 記録効率およびすそ広がり率と  
主磁極・下層膜間の距離との関係



## 2-4 まとめ

リング型磁気ヘッドによる長手記録系と垂直記録系、さらに主磁極励磁型単磁極ヘッドによる垂直記録系の高密度化にとって重要なヘッド磁気パラメータを明らかにすることを目的に、2次元静磁場のマクスウェルの方程式を基本方程式とした記録磁界解析シミュレータにより、各々の系の記録磁界を解析し、以下の結論を得た。

- (1) リング型磁気ヘッドによる長手記録系では、記録磁界勾配がヘッドの媒体対向面からの距離に強く依存する。従って、この系の高密度化には、ヘッド・媒体間のスペーシングの短縮と媒体記録膜の薄膜化が効果的である。また、リング型磁気ヘッドの長手方向の記録磁界勾配は、ヘッド飽和の影響を強く受けるため、記録再生系の設計においてヘッド飽和に対する配慮が特に必要である。
- (2) リング型磁気ヘッドによる垂直記録系は、本研究で検討した他の系に比べて、記録磁界勾配および記録磁界強度ともに劣る。従って、この系で高密度化を図るには、垂直異方性の強い記録膜と組み合わせることにより、記録磁界勾配が劣ることによる高密度特性の劣化を防ぐ必要がある。一方、記録磁界勾配の改善の方策として、狭ギャップ化が有効であることを見出した。ただし、狭ギャップ化により磁界強度は低下するため、十分な記録磁界強度を得るために高飽和磁束密度ヘッド材料の適用が必須となる。
- (3) 主磁極励磁型単磁極ヘッドによる垂直記録系は、単磁極ヘッドと媒体の軟磁性下層膜が磁氣的に結合した閉磁路構造のため、磁界勾配と磁界強度のスペーシング依存性が他の系に比べて小さいことが大きな特徴である。ただし、より一層の高密度化を図るための記録磁界の改善には、単磁極ヘッドと媒体の軟磁性下層膜との磁氣的結合を強めることが有効であり、具体的には単磁極ヘッドの主磁極及び媒体の軟磁性下層膜の高透磁率化を図るとともに、単磁極ヘッドと軟磁性下層膜との距離の短縮が望ましい。



2 - 5 参考文献

- (2-1) S. Iwasaki and K. Takemura : IEEE Trans. Magn., Vol.MAG-11, p.1173(1975)
- (2-2) S. Iwasaki and Y. Nakamura : IEEE Trans. Magn., Vol.MAG-13, p.1272(1977)
- (2-3) 鈴木、岩崎 : 信学技報、MR81-8(1981)
- (2-4) K. Shinagawa, H. Fujiwara, F. Kugiya, T. Okuwaki and M. Kudo :  
J. Appl. Phys., Vol.53, No.3, p.2585(1982)
- (2-5) J. Hokkyo, K. Hayakawa, I. Saito, S. Satake, K. Shirane, N. Honda,  
T. Shmamura and T. Saito : IEEE Trans. Magn., Vol.MAG-18, p.1203(1982)
- (2-6) J. Numazawa, Y. Yoneda, F. Aruga and T. Horiuchi : IEEE Trans. Magn.,  
MAG-23, p.2476(1987)
- (2-7) 菅野、釘屋、中村 : 応用磁気学会誌、Vol.12, No.2, p.137(1988)
- (2-8) J. Toda, K. Kobayashi and M. Hirane : IEEE Trans. Magn., Vol.MAG-18,  
p.1164(1982)
- (2-9) Y. Shiroishi, K. Shiiki, I. Yuitoo, N. Kumasaka and M. Kudo :  
J. Appl. Phys., Vol.57, p.3961(1985)
- (2-10) S. Iwasaki and Y. Nakamura : IEEE Trans. Magn., Vol.MAG-14, p.436(1978)
- (2-11) 中田、高橋 : 「電気工学の有限要素法」森北出版、p9(1982)
- (2-12) 鈴木、岩崎 : 信学技報、MR73-4(1973)
- (2-13) 西川 : 「磁気記録の理論」朝倉書店 p.136(1985)
- (2-14) 高橋 : 「電磁気学」裳華房(1961)
- (2-15) F. Kugiya, M. Koizumi, F. Kanno, Y. Uesaka, T. Okuwaki and T. Tamura :  
IEEE Trans. Magn., MAG-21, No.5, p.1411(1985)
- (2-16) J. Hokkyo et al : IEEE Trans. Magn., Vol.MAG-18, p.1203(1982)
- (2-17) 斎藤、川添、法橋 : 日本応用磁気学会 学術講演概要集、17pB-4(1982)
- (2-18) Y. Sonobe, Y. Tanaka and S. Nishikawa : IEEE Trans. Magn., Vol.MAG-24,  
p.2473(1988)
- (2-19) T. Kobayashi, R. Nakatani, S. Ootomo, N. Kumasaka, and K. Shiiki  
: J. Appl. Phys., Vol.64(6), p.3157(1988)



- (2-20) 菅野、釘屋、熊坂 : 昭和62年度電子情報通信学会総合全国大会予稿集  
1-183(1987)
- (2-21) Y. Uesaka, M. Koizumi, N. Tsumita, O. Kitakami and H. Fujiwara :  
J. Appl. Phys., Vol.57, p.3925(1985)
- (2-22) S. Yamamoto, Y. Nakamura and S. Iwasaki : IEEE Trans. Magn., Vol.MAG-23,  
p.2070(1987)
- (2-23) S. Iwasaki and Y. Nakamura : IEEE Trans. Magn., Vol.MAG-14, p.436(1978)
- (2-24) J. Hokkyo, I. Saito and S. Satake : IEEE Trans. Magn., Vol.MAG-16,  
p.887(1980)
- (2-25) Y. Nakamura, S. Yamamoto and S. Iwasaki : IEEE Trans. Magn., Vol.MAG-22,  
p.376(1986)
- (2-26) 佐竹、法橋、斉藤、早川 : 日本応用磁気学会 学術講演概要集、 p123(1980)



## 第3章 リング型磁気ヘッドによる記録再生系のスペーシング損失の解析

### 3-1 はじめに

図3.1は、過去の大型磁気ディスク装置の面記録密度の推移と装置の高密度化に寄与したと考えられる記録再生系の主要パラメータとの関係を示したものである。この図より、面記録密度が約150倍に高密度化される間に、ヘッド・媒体間のスペーシングは約1/8、磁気ヘッドのギャップ長は約1/6に狭小化され、媒体記録膜の膜厚も約1/8に薄膜化されている。ところで、これらの主要パラメータと記録磁界の関係については、第2章で既に報告した。その解析結果によれば、リング型磁気ヘッドはギャップからの漏れ磁界により記録磁界が形成されるため、その強度と分布は磁気ヘッドからの距離に強く依存している。従って、図3.1で取り上げたパラメータのうち、ヘッド・媒体間のスペーシングの短縮と媒体記録膜の薄膜化は、記録磁界の観点から高密度化に有効であることは明らかである。また、リング型磁気ヘッドのギャップ長に関しては、第2章の図2.19に示したように、長手記録の記録磁界の観点からは記録密度向上に大きく影響するパラメータではない。一方、再生の観点から高密度化の条件を考えた場合、再生分解能の向上にはヘッド・媒体間のスペーシングと磁気ヘッドのギャップ長の短縮が有効であることが分かっている<sup>(3-1)</sup>。このように、ヘッド・媒体間のスペーシングは、記録および再生のいずれの観点からも高密度記録を実現するためのキーパラメータであり、記録再生特性のスペーシング依存性を定量的に明らかにすることは磁気記録再生系の高密度化研究の最重要課題である。

ところで、リング型磁気ヘッドを用いた長手記録における再生出力 $E$ は、正弦波磁化を仮定した理論解析および記録再生実験によれば、再生時のスペーシングの増加に伴い次式に示すように指数関数的に低下する<sup>(3-2)</sup>。

$$E \propto \exp(-2\pi d/\lambda) \quad (3-1)$$

$d$  : ヘッド・媒体間スペーシング ( $\mu\text{m}$ )

$\lambda$  : 記録波長 ( $\mu\text{m}$ )



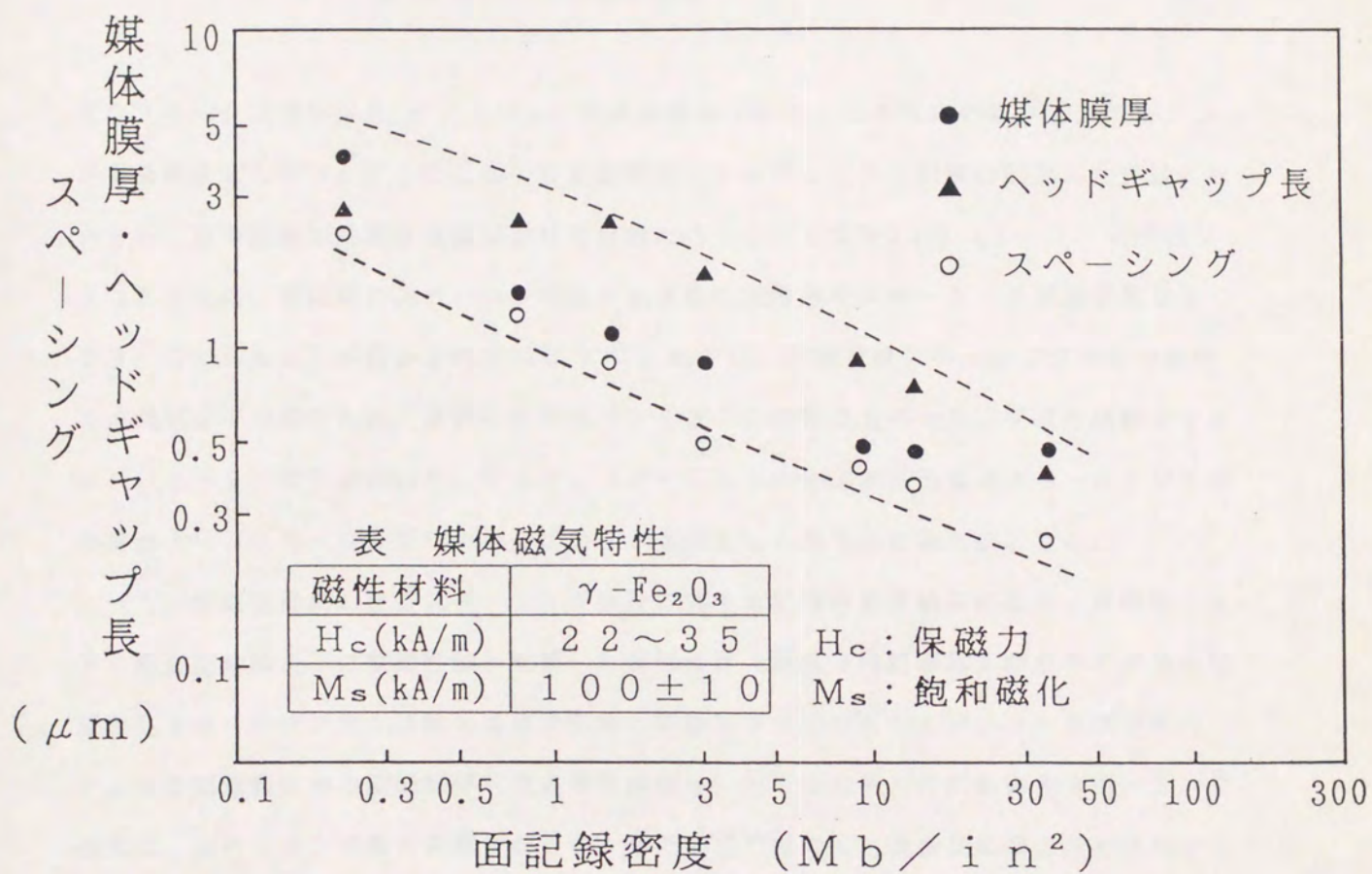


図 3. 1 面記録密度と記録再生系の主要パラメータの関係



従って、再生時のスペーシングの増加による対数表示の再生出力の低下の割合（再生スペーシング損失 $L_r$ ）は、次式で求まる。

$$L_r = -k \cdot (d/\lambda) \approx -54.6 (d/\lambda) \text{ [dB]} \quad (3-2)$$

$k$ : スペーシング損失係数

再生スペーシング損失 $L_r$ と $(d/\lambda)$ は直線関係であり、この直線の傾きをスペーシング損失係数 $k$ と呼ぶ。さらに、矩形波記録電流によるデジタル記録の記録再生実験においても、長手記録の高密度領域における再生スペーシング損失 $L_r$ は $(3-2)$ 式が成り立つとともに、記録時のスペーシング損失も含めた記録再生スペーシング損失係数 $k$ は99.0であることが報告されている<sup>3-3)</sup>。ただし、実験ではスペーシングが0の条件での測定は不可能なため、実験可能なスペーシングの範囲でスペーシング損失係数 $k$ を求め、 $(3-2)$ 式を適用した。従って、 $(3-2)$ 式から求まる任意のスペーシングでの再生出力は、スペーシング0の再生出力を0 dBとして規格化された値となる。

一方、垂直記録におけるスペーシング損失に関する記録再生実験によると、単磁極ヘッドと垂直記録膜の下に軟磁性膜を配置した記録媒体（垂直2層膜媒体）からなる系での記録再生スペーシング損失係数 $k$ は長手記録と同様に99.0となるが、リング型磁気ヘッドと垂直記録膜のみの記録媒体（垂直単層膜媒体）からなる系での記録再生スペーシング損失は、スペーシング損失係数 $k$ が99.0で一定ではなく、長波長になるほどスペーシング損失係数 $k$ が大きくなる傾向にあることが報告されている<sup>3-4)</sup>。また、垂直記録の再生スペーシング損失に関しては記録再生実験により、上記いずれの記録再生系でも $(3-2)$ 式が成り立つことが報告されている<sup>3-5)</sup>。

本研究では、第2章の記録磁界の解析結果に基づき、以下の観点から、垂直記録方式を中心としたリング型磁気ヘッドを用いた記録再生系のスペーシング損失について検討した結果について述べる<sup>3-6)</sup>。

- 1) スペーシング損失と記録磁界および媒体特性の関係
- 2) 記録スペーシング損失と再生スペーシング損失の分離解析
- 3) 再生スペーシング損失に及ぼすヘッド・媒体相互作用の影響



### 3-2 記録再生実験によるスペーシング損失の解析

#### 3-2-1 垂直記録方式の記録再生スペーシング損失

リング型磁気ヘッドと垂直記録媒体であるC o - C r 単層膜媒体からなる記録再生系の記録再生スペーシング損失の検討を行った。記録再生実験には、第2章の図2. 7に示した大型磁気ディスク用に開発されたM n Z n フェライト材料からなるリング型磁気ヘッドを用いた。表3-1と表3-2に、実験に用いた磁気ヘッドの仕様と2種類のC o - C r 膜の磁気特性および結晶学的な性質を示す。C o - C r 膜の磁気特性に関しては、磁化曲線はV S M (振動試料型磁力計)、磁気異方性はトルクメータにより測定した。また、C o - C r 膜の結晶配向度を評価するために、X線回折法によるC o - C r (002) 回折ピークに関するロックング曲線の半値幅 $\Delta \theta_{50}$ を測定した。媒体Aは、リング型磁気ヘッドの垂直方向の記録磁界強度がスペーシングの増加とともに大きく低下することを勘案して垂直方向の保磁力 $H_{c\perp}$ が比較的低い媒体である。一方、媒体Bは垂直磁気異方性および結晶配向度の良好な媒体である。記録再生実験におけるヘッド・媒体間のスペーシングはC o - C r 記録膜の上のS i O<sub>2</sub>膜の膜厚を変えるにより制御した。なお、C o - C r 記録膜およびS i O<sub>2</sub>膜はスパッタリング法により成膜した。記録再生特性は、第2章の記録再生実験と同様に、スピンドルに媒体を固定し、回転する媒体上に磁気ヘッドを接触させて測定した。媒体の周速は2. 5 m/sである。本実験に用いた再生回路系の周波数特性は10 MHzまでフラットである。従って、媒体の周速は2. 5 m/sの場合、線記録密度200 k F C Iまでの測定が可能である。

図3. 2は、スペーシング量をパラメータに表3. 2の2種類の媒体の記録密度特性を測定したものである。さらに、図3. 3は、10 k F C Iにおける磁気ヘッドの起磁力と再生出力の関係を測定したものである。ギャップ長は0. 3  $\mu$ mの磁気ヘッドを用いた。なお、記録密度特性の測定における磁気ヘッドの起磁力は、各スペーシングにおいて最大出力が得られる起磁力を選んだ。記録密度特性を両媒体で比較すると、媒体Aは媒体Bよりも垂直方向の磁気特性および結晶配向度が劣るにもかかわらず高密度特性に優れている。例えば、スペーシング $d = 0. 05 \mu$ mにおいて、低密度の再生出力の1/2となる記録密度(出力半減記録密度) $D_{50}$ で両媒体を比較すると、媒体Aでは105 k F C Iに対し、媒体Bでは76 k F C Iである。この理由として、媒体Bでは垂直方向の保磁力 $H_{c\perp}$ が大きいため記録磁界強度が不足していることが考えられる。そこで、実験に用いたヘッド



表 3. 1 測定ヘッドの諸元

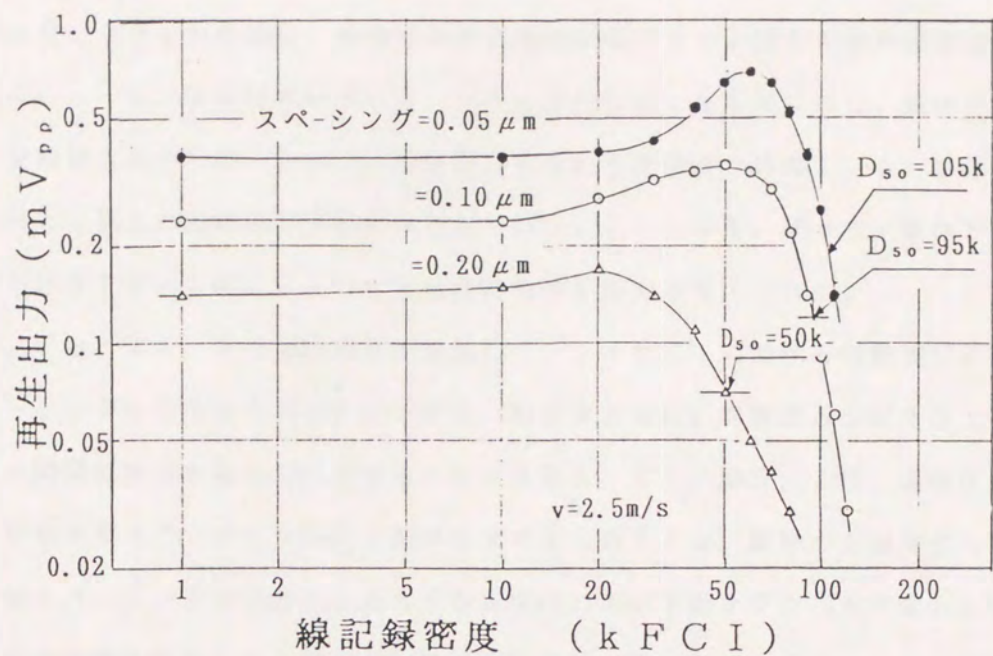
| ヘッド # | 材料        | ギャップ長<br>( $\mu\text{m}$ ) | トラック幅<br>( $\mu\text{m}$ ) | 巻線数<br>(turn) |
|-------|-----------|----------------------------|----------------------------|---------------|
| # 1   | MnZnフェライト | 0. 3                       | 1 0 0                      | 1 0 + 1 0     |
| # 2   | MnZnフェライト | 0. 5 5                     | 1 0 0                      | 1 0 + 1 0     |

表 3. 2 測定媒体の諸元

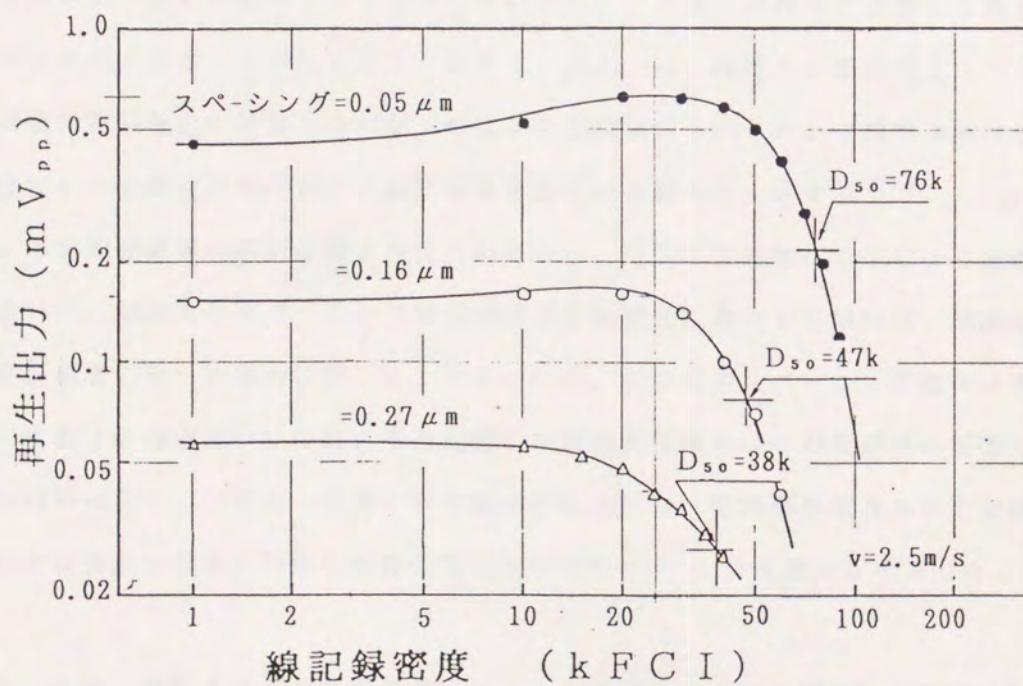
| 媒体 # | $M_s$<br>(kA/m) | $H_{C \perp}$<br>( $\times 10^3 / 4 \pi \text{ A/m}$ ) | $H_{C \parallel}$ | $(M_r/M_s)_{\perp}$<br>(注) | $(M_r/M_s)_{\parallel}$ | $\Delta \theta_{so}$<br>( $^{\circ}$ ) | $H_k$<br>( $\times 10^3 / 4 \pi \text{ A/m}$ ) | 膜厚<br>( $\mu\text{m}$ ) |
|------|-----------------|--------------------------------------------------------|-------------------|----------------------------|-------------------------|----------------------------------------|------------------------------------------------|-------------------------|
| 媒体 A | 272             | 440                                                    | 160               | 0.17                       | 0.09                    | 5.0                                    | 3800                                           | 0.46                    |
| 媒体 B | 310             | 1040                                                   | 390               | 0.29                       | 0.11                    | 3.2                                    | 5550                                           | 0.58                    |

(注) 膜面垂直方向の反磁界補正なし





(a) 媒体 A



(b) 媒体 B

図 3. 2 記録密度特性のスペースング依存性 (1)

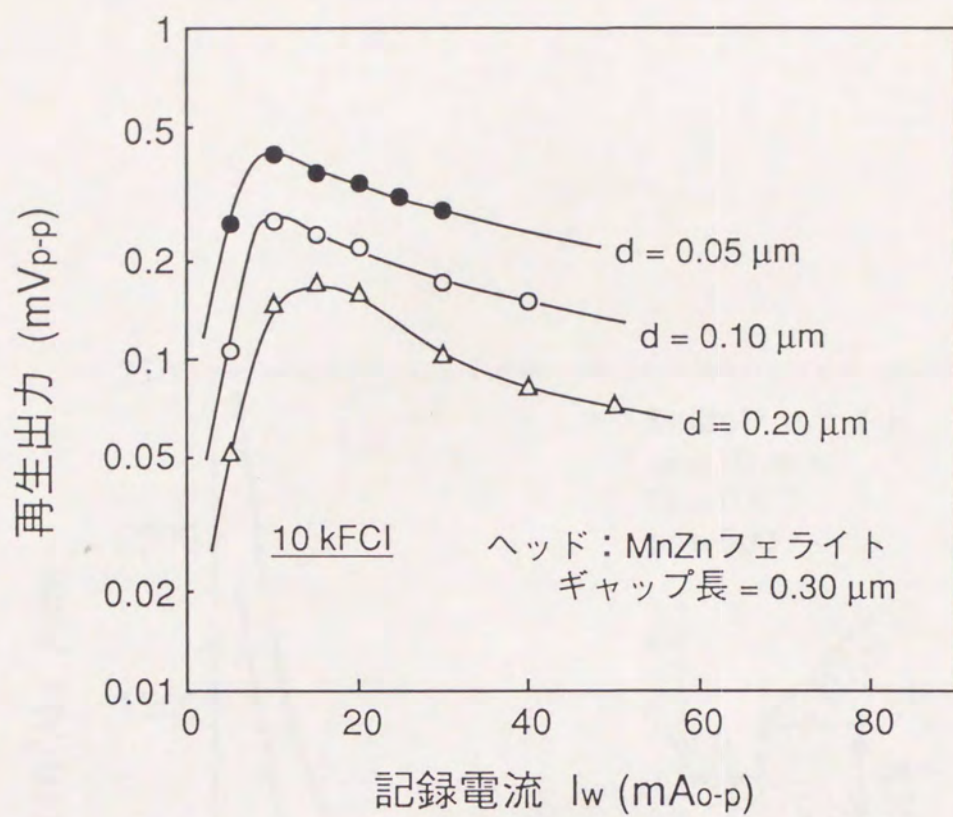


の垂直方向の磁界強度のスペーシング依存性を解析した。結果を図3.4に示す。図3.4にはギャップ長が $0.55\mu\text{m}$ のヘッドの解析結果もあわせてプロットした。スペーシング $d=0.05\mu\text{m}$ の場合、媒体の垂直方向の保磁力 $H_{c\perp}$ 相当の記録磁界強度は、媒体AではCo-Cr記録層表面から $0.37\mu\text{m}$ の位置であるのに対し、媒体BではCo-Cr記録層表面から $0.10\mu\text{m}$ の位置、すなわち記録膜全体の $1/6$ しか垂直方向の保磁力 $H_{c\perp}$ 以上の記録磁界強度が得られていないことになる。従って、媒体Bは記録磁界強度不足が主要因で媒体Aよりも記録密度特性が劣ると考えられる。

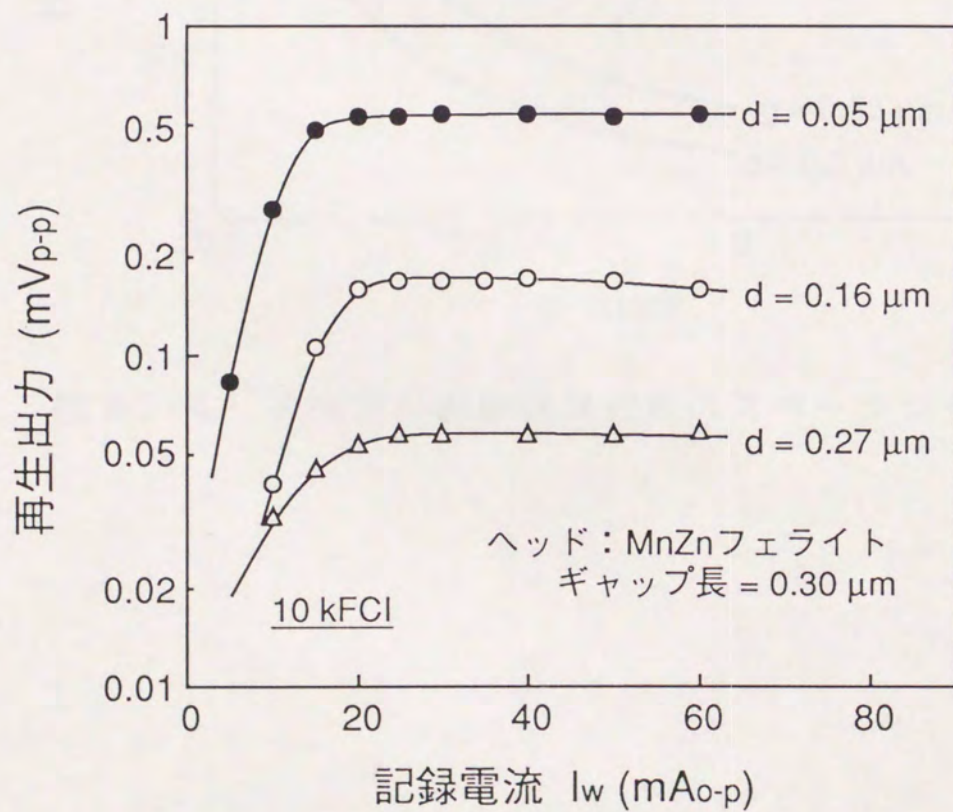
図3.5は、図3.2の実験結果を整理して、 $1\text{ k FCI}$ における対数表示の再生出力とスペーシングの関係を求めたものである。両媒体ともに、対数表示の再生出力とスペーシングの関係は概ね直線で近似できることが分かる。また、図3.6は、両媒体の線記録密度と記録再生スペーシング損失の関係を求めたものである。縦軸の記録再生スペーシング損失はスペーシング増加量 $1\mu\text{m}$ 当りの再生出力の低下量をデシベルで表わした値を用いた。記録密度全般にわたり媒体Aのほうが媒体Bよりも記録再生スペーシング損失は少ないが、高密度領域ではその差は小さくなっている。また、記録再生スペーシング損失係数 $k$ を図中の括弧内の数字として表示しているが、この値を両媒体で比較してみると、隣接磁化反転間の波形干渉が生ずる $20\text{ k FCI}$ 以上では、媒体Aの記録再生スペーシング損失係数は記録波長に依存しないが、媒体Bの記録再生スペーシング損失係数は短波長になるほど小さくなる傾向にあり、既に報告されている結果と一致する<sup>(3-4)</sup>。この結果と図3.4の記録磁界の解析結果を考え合わせると、リング型磁気ヘッドによる垂直磁気記録において、記録再生スペーシング損失係数が記録波長に依存する傾向は、記録磁界強度の不足が顕著になった場合に生じると考えられる。記録再生スペーシング損失係数が記録波長に依存する理由については、垂直記録では短波長領域のほうが反磁界の影響が少なく、少ない磁界強度でより安定に記録できる傾向にあるため、記録磁界強度の不足が顕著な記録条件では安定な記録が可能な短波長ほど記録再生スペーシング損失が小さくなると推定した。

図3.7は、媒体Aをギャップ長 $0.55\mu\text{m}$ の磁気ヘッドで記録した場合の記録密度特性である。ギャップ損失のため、各スペーシングでの記録密度特性にディップが生じている<sup>(3-7)</sup>。なお、磁気ヘッドのギャップ長は、全て光学ギャップ長である。ギャップ長 $0.55\mu\text{m}$ のヘッドを用いれば、図3.4の記録磁界の解析結果から、スペーシングが





(a) 媒体 A



(b) 媒体 B

図 3. 3 記録電流特性



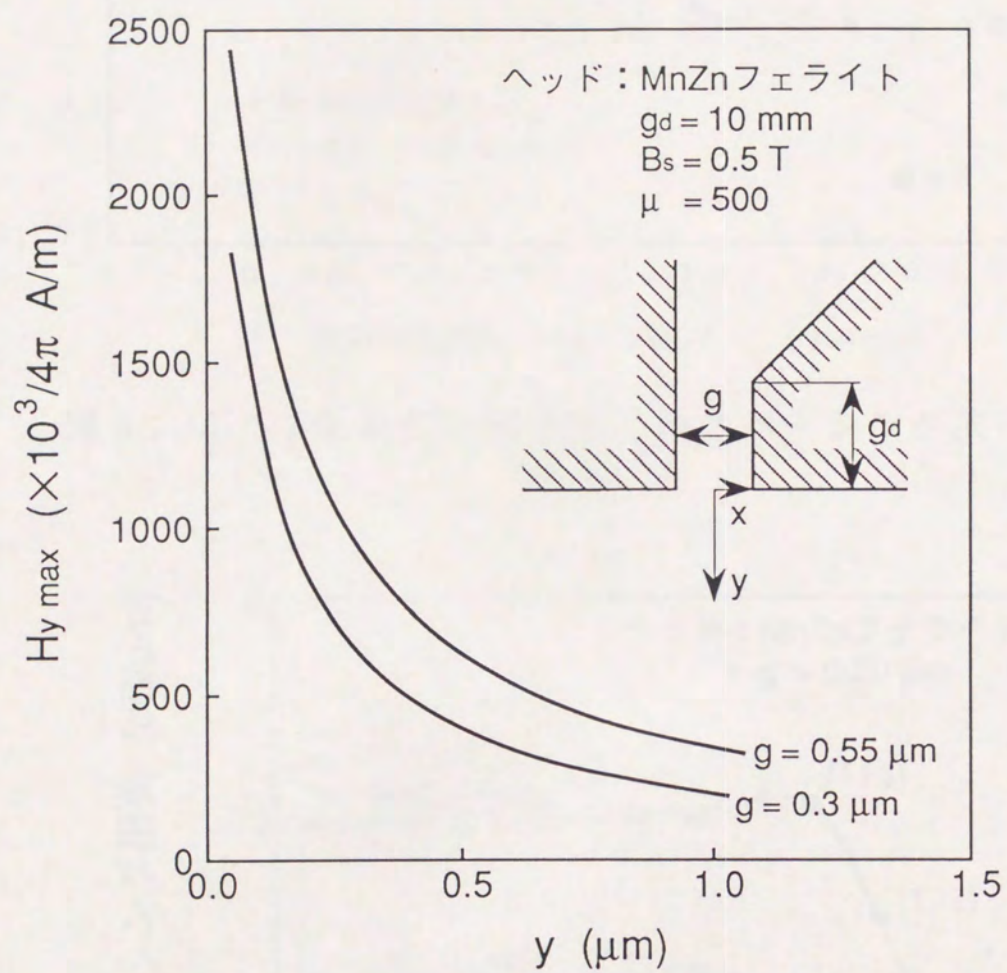


図 3. 4 垂直方向記録磁界強度のスペーシング依存性



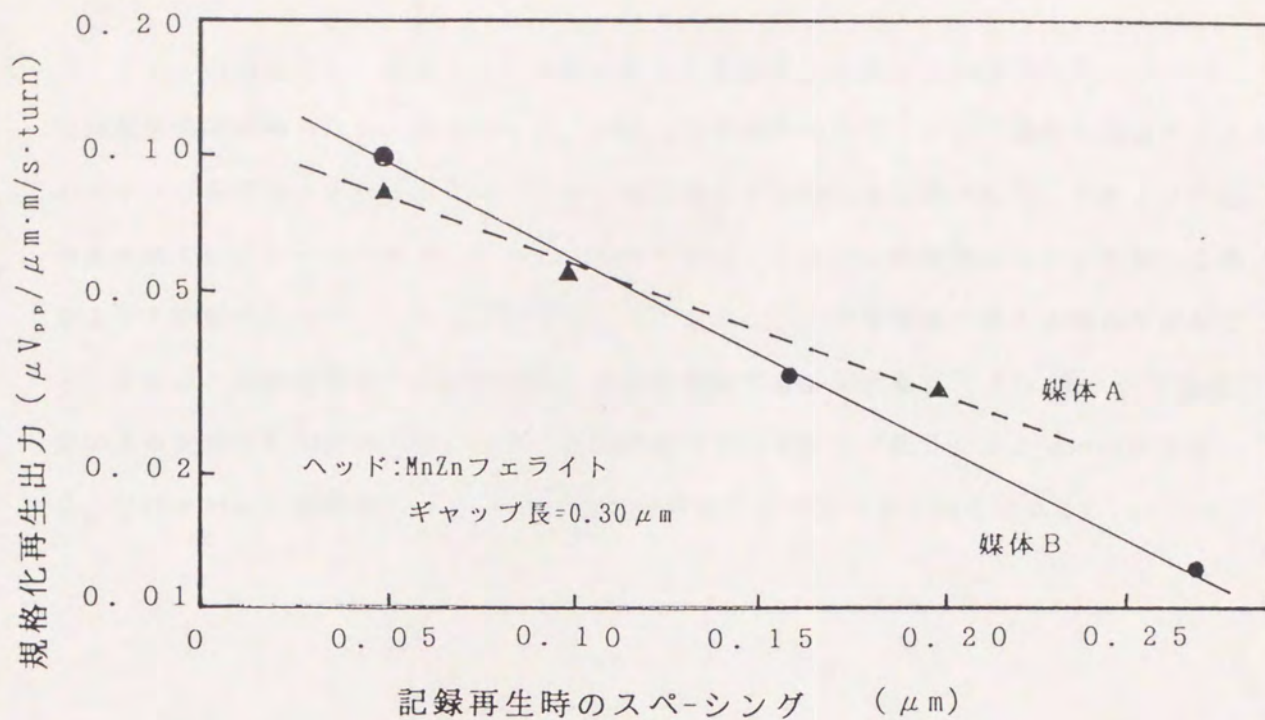


図 3. 5 1 k F C I 再生出力のスペーシング依存性

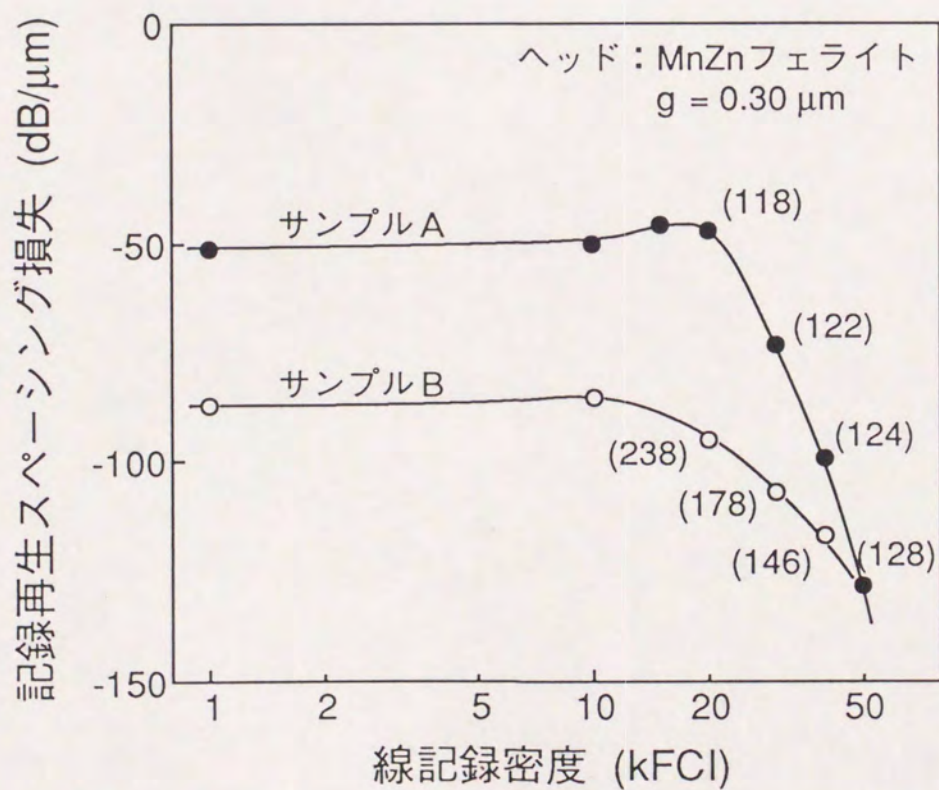


図 3. 6 記録再生スペーシング損失の線記録密度依存性 (1)



0.2  $\mu\text{m}$ の場合でも、媒体Aの記録膜の裏面で記録膜の垂直方向の保磁力 $H_{c\perp}$ 以上の記録磁界強度が得られる。図3.8は、媒体Aの記録再生スペーシング損失を磁気ヘッドのギャップ長が0.30  $\mu\text{m}$ と0.55  $\mu\text{m}$ の場合で比較したものである。これより、低密度領域では、ギャップ長0.55  $\mu\text{m}$ のほうが0.30  $\mu\text{m}$ の磁気ヘッドで記録した場合よりも記録再生スペーシング損失が小さい。しかし、高密度領域ではその関係が逆転する。これは、高密度領域では記録減磁の影響を考慮する必要があり<sup>3-8</sup>、ギャップ長拡大による記録磁界勾配の劣化により、高密度領域ではギャップ長0.55  $\mu\text{m}$ のほうが0.30  $\mu\text{m}$ より記録再生スペーシング損失が大きくなっていると推定される。



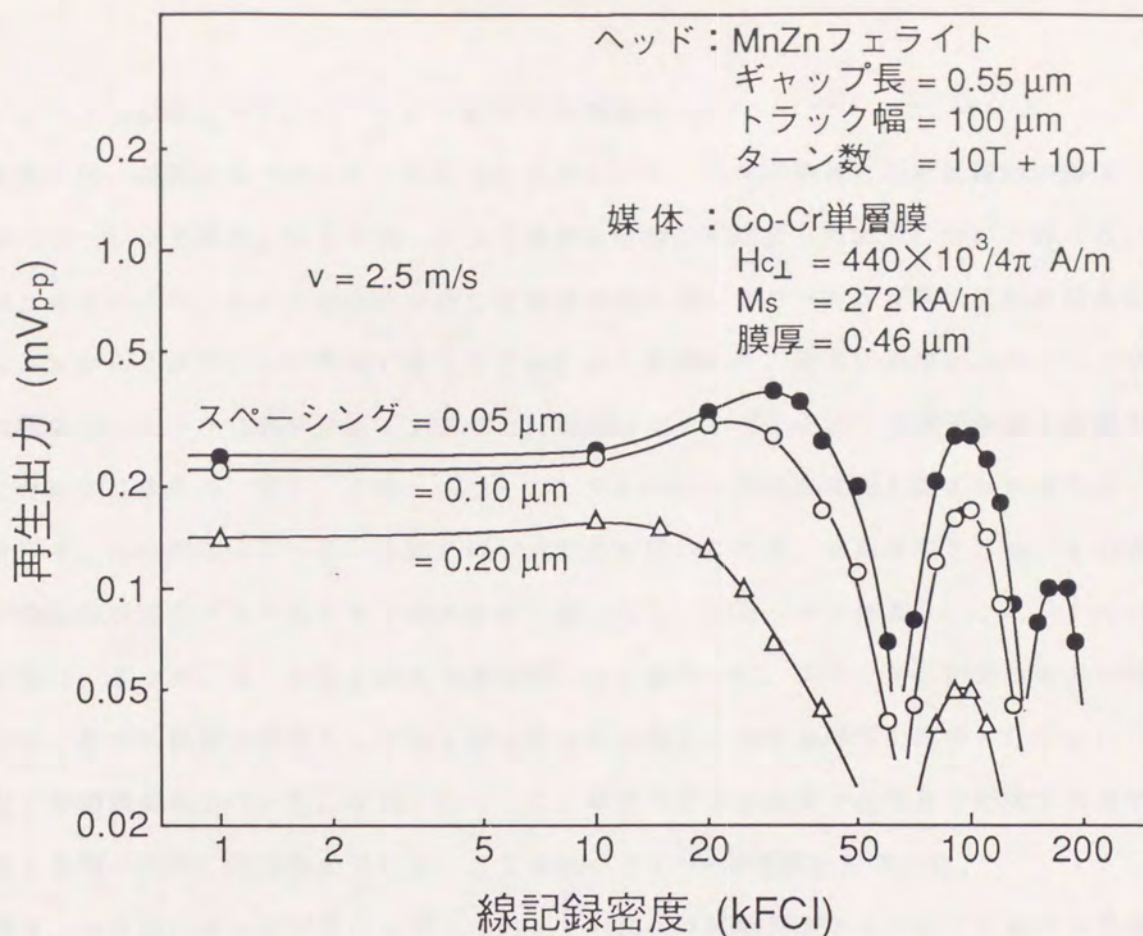


図 3. 7 記録密度特性のスペーシング依存性 (2)

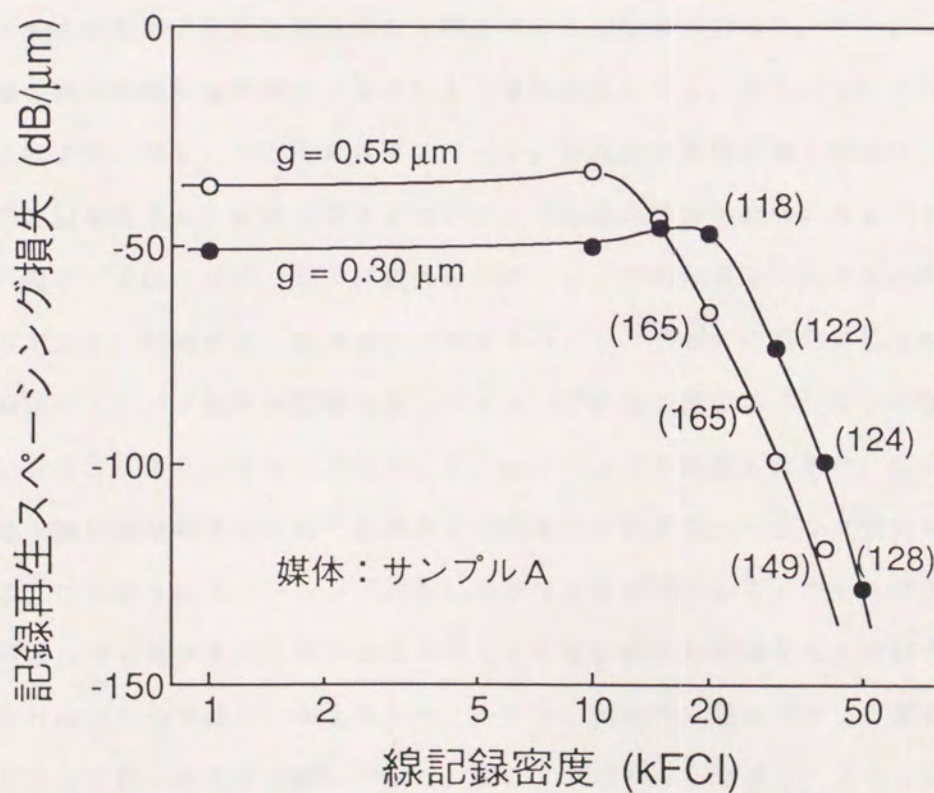


図 3. 8 記録再生スペーシング損失の線記録密度依存性 (2)



### 3-2-2 記録と再生スペーシング損失の分離解析

本節では、前節と同一のリング型磁気ヘッドにより、長手記録用と垂直記録用の媒体の記録スペーシング損失と再生スペーシング損失を分離して解析した結果について述べる。記録と再生のスペーシング損失を分離して解析するため、スペーシング量は媒体の周速を  $5\text{ m/s}$  から  $20\text{ m/s}$  の範囲で変えることにより制御した。媒体の周速とスペーシング量の関係は、あらかじめガラスディスク上に測定ヘッドを浮上させて光学干渉縞を観察することにより求めた。図3.9に、スペーシングと媒体の周速の関係を測定した結果の一例を示す。再生回路は3-2-1節と同一の回路を用いたため、相対速度  $20\text{ m/s}$  の場合で線記録密度  $25\text{ k FCI}$  までの再生が可能である。測定ヘッドは表3.1に示すギャップ長  $0.3\text{ }\mu\text{m}$  と  $0.55\text{ }\mu\text{m}$  の2種類のヘッドを用いた。表3.3に測定媒体の仕様を示す。長手記録用の媒体としては $\gamma$ 酸化鉄塗布媒体を、垂直記録用の媒体としてはCo-Cr単層膜媒体を用いた。なお、Co-Cr単層膜媒体は記録再生実験で媒体が損傷することを防ぐため、記録膜の上に  $0.05\text{ }\mu\text{m}$  の $\text{SiO}_2$ 保護膜を付加した。

図3.10は、ギャップ長  $0.3\text{ }\mu\text{m}$  のヘッドにより記録密度  $1\text{ k FCI}$  における記録再生スペーシング損失と再生スペーシング損失を測定したものである。なお、再生スペーシング損失は、媒体周速  $2.5\text{ m/s}$  で記録した後、再生時の周速を  $5.0\text{ m/s}$  から  $20\text{ m/s}$  まの範囲で変えて再生出力を測定することにより求めた。さらに、図3.11は、同様の測定を線記録密度  $20\text{ k FCI}$  (記録波長  $\lambda = 2.54\text{ }\mu\text{m}$ ) で行ったものである。これより、図3.5の記録再生スペーシング損失の実験結果と同様に、対数表示の再生出力と記録再生および再生時のスペーシングは概ね線形の関係にあることが分かる。そこで、表3.4に、スペーシング損失をスペーシング増加量  $1\text{ }\mu\text{m}$  当りの再生出力の低下量として表し、記録再生、記録および再生スペーシング損失の測定結果を整理した。なお、記録スペーシング損失は記録再生スペーシング損失と再生スペーシング損失の差より求めた。表3.4より、ギャップ長  $0.3\text{ }\mu\text{m}$  のヘッドで記録した場合、Co-Cr単層膜媒体は $\gamma$ 酸化鉄塗布媒体に比べ記録および再生いずれのスペーシング損失も大きいことが分かる。このようにスペーシング損失に差が生ずる原因として、ギャップ長  $0.3\text{ }\mu\text{m}$  のMn-ZnフェライトヘッドではCo-Cr単層膜媒体を記録するために十分な磁界強度が得られないためではないかと考えた。そこで、同様の実験をギャップ長  $0.55\text{ }\mu\text{m}$  のヘッドにより行い結果を比較してみた。表3.5にギャップ長  $0.55\text{ }\mu\text{m}$  のヘッドに



より、各々記録密度1 k F C Iと20 k F C Iにおける記録再生スペーシング損失と再生スペーシング損失を測定した結果を整理して示す。ギャップ長0.55  $\mu$ mのヘッドの場合、C o - C r 単層膜媒体の再生スペーシング損失は $\gamma$ 酸化鉄塗布媒体と同等の値となる。C o - C r 単層膜媒体の再生スペーシング損失は、周速2.5 m/sで記録し、再生時のスペーシング量を変えることにより測定している。記録時のスペーシングは、ヘッド浮上量0.05  $\mu$ mにS i O<sub>2</sub>保護膜の膜厚0.05  $\mu$ mを加えた0.1  $\mu$ mである。C o - C r 記録膜の膜厚は0.29  $\mu$ mであるから、記録膜最下層の垂直方向の磁界強度は、図3.4の記録磁界の解析結果より、ギャップ長0.3  $\mu$ mでは $490 \times 10^3 / 4\pi$  (A/m)、ギャップ長0.55  $\mu$ mでは $760 \times 10^3 / 4\pi$  (A/m)である。従って、ギャップ長0.55  $\mu$ mの場合は記録膜最下層でC o - C r 記録膜の垂直方向保磁力以上の記録磁界強度で記録されているといえる。そして、このような記録条件ではC o - C r 単層膜媒体の再生スペーシング損失は $\gamma$ 酸化鉄塗布媒体の再生スペーシング損失とほぼ同等の値が得られている。一方、ギャップ長0.55  $\mu$ mでは、C o - C r 単層膜媒体の記録スペーシング損失もギャップ長0.3  $\mu$ mの場合に比べ大幅に改善される。しかし、 $\gamma$ 酸化鉄塗布媒体の記録スペーシング損失に比べると大きく、特に、記録密度20 k F C Iにおける記録スペーシング損失の差がより顕著である。これは、短波長領域の方が長波長領域よりも磁界勾配の劣化の影響を強く受けるためと推定される。



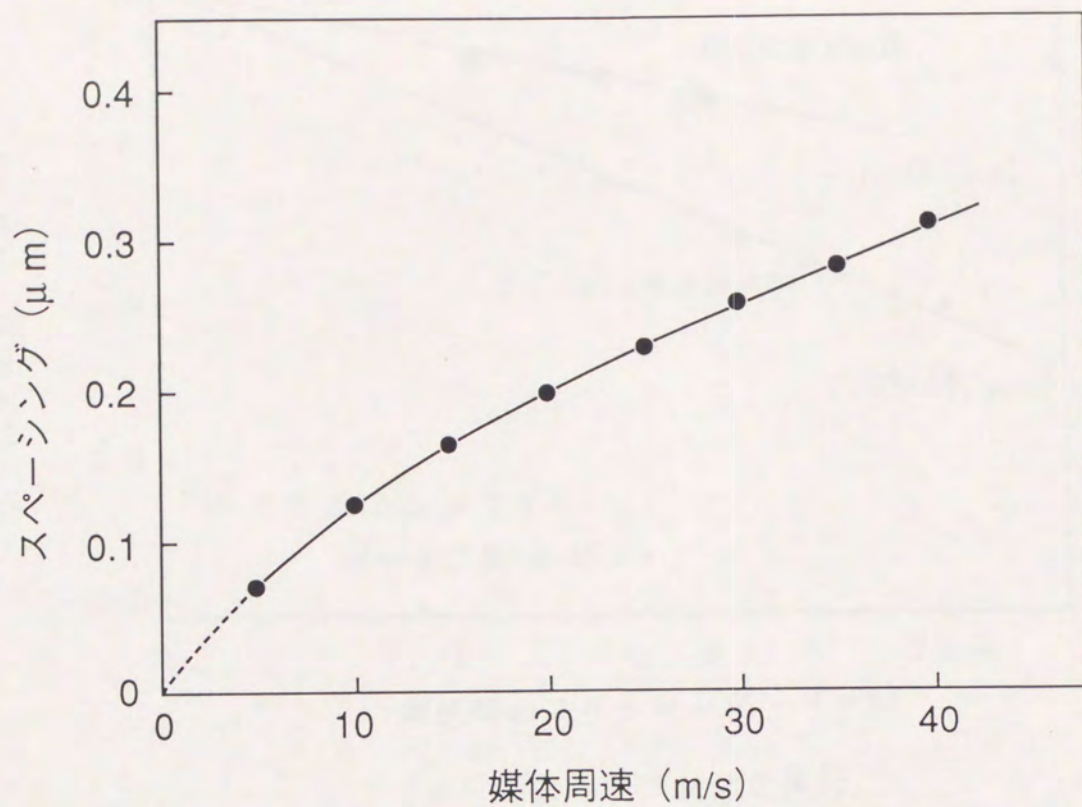
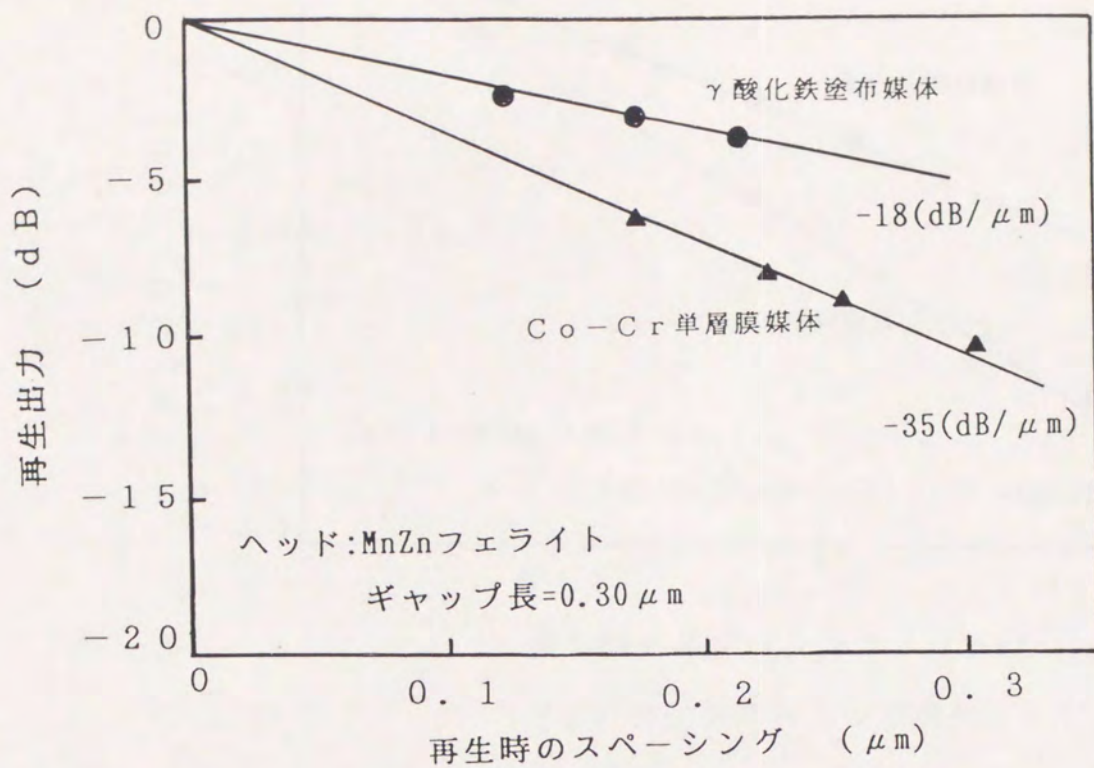


図 3. 9 スペーシングと媒体周速の関係

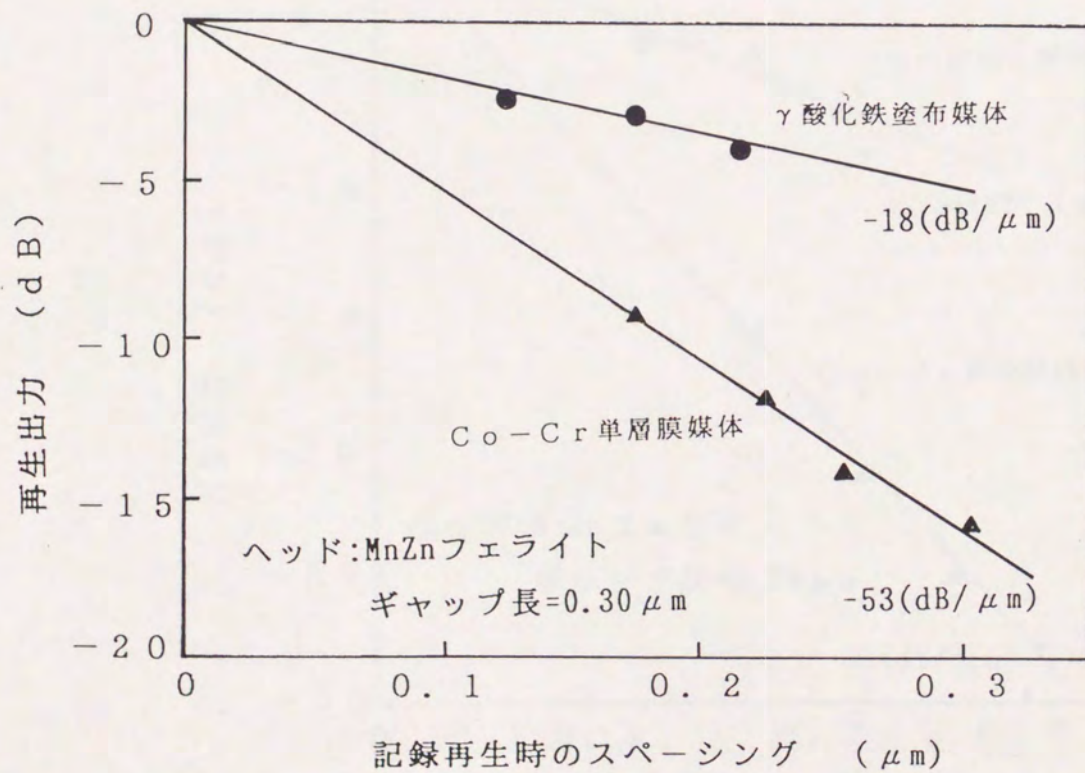
表 3. 3 測定媒体の諸元

| 媒体の種類        | 飽和磁化<br>(kA/m) | 保磁力<br>( $\times 10^3 / 4\pi$ A/m) | 角形比    |        | 膜厚<br>( $\mu\text{m}$ ) |
|--------------|----------------|------------------------------------|--------|--------|-------------------------|
|              |                |                                    | //     | ⊥      |                         |
| $\gamma$ 酸化鉄 | 1 1 0          | 4 1 5 (長手方向)                       | 0. 8   | —      | 0. 5 0                  |
| C o - C r    | 3 3 0          | 6 2 0 (垂直方向)                       | 0. 1 6 | 0. 1 7 | 0. 2 9                  |





(a) 再生スペーシング損失

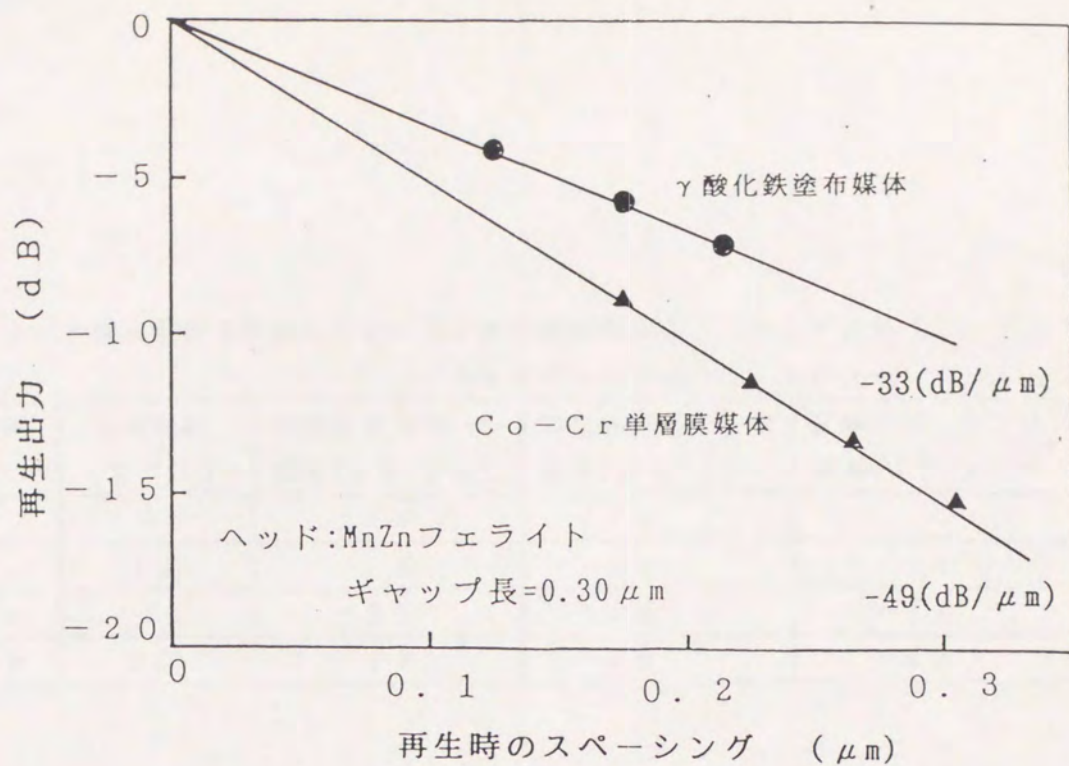


(b) 記録再生スペーシング損失

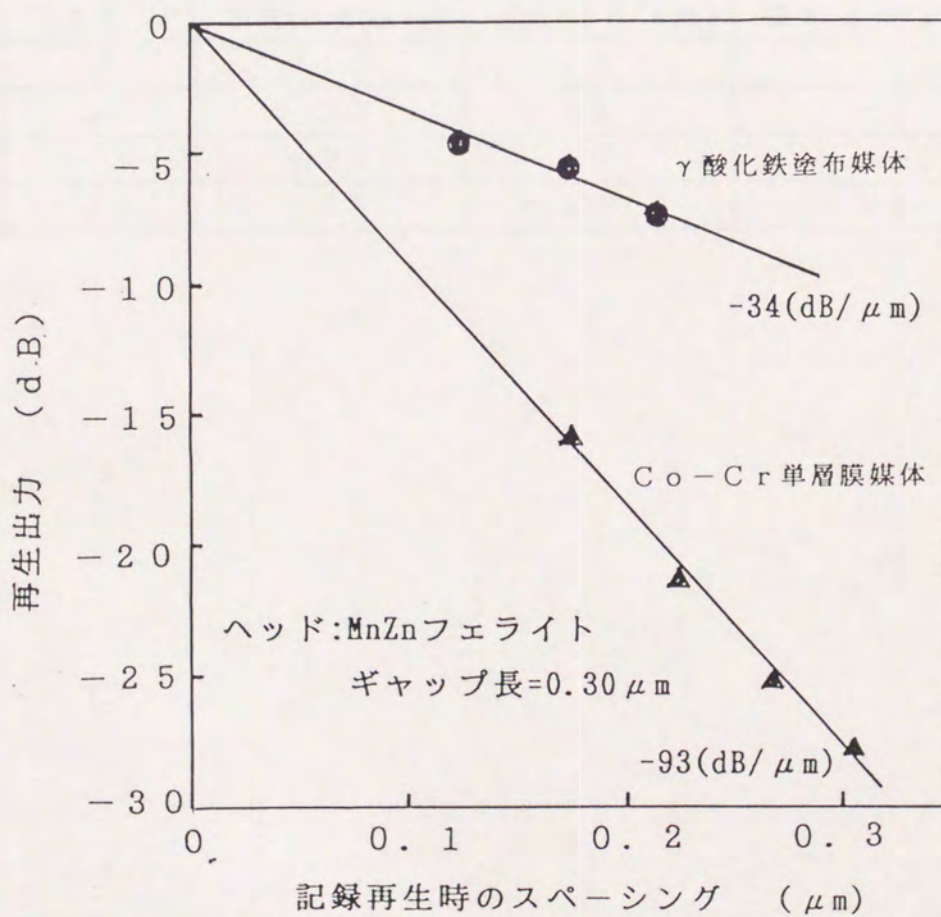
図3.10 1kFCIにおけるスペーシング損失

(ヘッドギャップ長: 0.3  $\mu\text{m}$ )





(a) 再生スペーシング損失



(b) 記録再生スペーシング損失

図3.11 20kFCIにおけるスペーシング損失  
(ヘッドギャップ長: 0.3  $\mu\text{m}$ )



表 3. 4  $\gamma$ 酸化鉄塗布媒体と Co-Cr 単層膜媒体のスペーシング損失 (1)

(ヘッドギャップ長 = 0.30  $\mu\text{m}$ )

| 媒体の種類        | 記録密度<br>(k F C I) | 記録再生スペーシ<br>損失(d B/ $\mu\text{m}$ ) | 再生スペーシング<br>損失(d B/ $\mu\text{m}$ ) | 記録スペーシング<br>損失(d B/ $\mu\text{m}$ ) |
|--------------|-------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| $\gamma$ 酸化鉄 | 1                 | -18                                 | -18                                 | 0                                   |
| $\gamma$ 酸化鉄 | 20                | -34                                 | -33                                 | -1                                  |
| Co-Cr        | 1                 | -53                                 | -35                                 | -18                                 |
| Co-Cr        | 20                | -93                                 | -49                                 | -44                                 |

表 3. 5  $\gamma$ 酸化鉄塗布媒体と Co-Cr 単層膜媒体のスペーシング損失 (2)

(ヘッドギャップ長 = 0.55  $\mu\text{m}$ )

| 媒体の種類        | 記録密度<br>(k F C I) | 記録再生スペーシ<br>損失(d B/ $\mu\text{m}$ ) | 再生スペーシング<br>損失(d B/ $\mu\text{m}$ ) | 記録スペーシング<br>損失(d B/ $\mu\text{m}$ ) |
|--------------|-------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| $\gamma$ 酸化鉄 | 1                 | -17                                 | -17                                 | 0                                   |
| $\gamma$ 酸化鉄 | 20                | -37                                 | -32                                 | -5                                  |
| Co-Cr        | 1                 | -29                                 | -20                                 | -9                                  |
| Co-Cr        | 20                | -58                                 | -30                                 | -28                                 |



### 3-3 数値シミュレーションによる再生スペーシング損失の解析

前節の実験結果より、飽和記録が可能な記録磁界強度が印加されている場合には、長手記録用の $\gamma$ 酸化鉄塗布媒体と垂直記録用のCo-Cr単層膜媒体の再生スペーシング損失は概ね一致することが確認された。ところで、従来の報告では高密度領域の再生スペーシング損失として(3-2)式が導かれており、再生スペーシング損失係数は54.6である。一方、今回の実験結果では、20kFCI(記録波長 $\lambda = 2.54 \mu\text{m}$ )の再生スペーシング損失は、表3.5より $\gamma$ 酸化鉄塗布媒体で-32(dB/ $\mu\text{m}$ )、Co-Cr単層膜媒体で-30(dB/ $\mu\text{m}$ )である。この結果を(3-2)式に当てはめて再生スペーシング損失係数を求めると、 $\gamma$ 酸化鉄塗布媒体で81.3、Co-Cr単層膜媒体で76.2となり、従来の報告よりも再生スペーシング損失係数は大きい。この理由を明らかにするため、両媒体に理想的に矩形波記録が行われた場合を想定し、数値シミュレーションにより再生過程を解析して実験結果との比較検討を行った。

#### 3-3-1 解析方法

再生過程の数値シミュレーションでは、図3.12に示す2次元静磁場を想定し、マックスウェルの静磁場における電磁界方程式に基づく次式を基本式とした。また、数値解析手法としては有限要素法を用いた。

—磁気ヘッドの領域—

$$\begin{aligned} \partial / \partial x (1 / \mu_y \cdot \partial A_z / \partial x) + \partial / \partial y (1 / \mu_x \cdot \partial A_z / \partial y) \\ = 0 \end{aligned} \quad (3-3-a)$$

—媒体の領域—

$$\begin{aligned} \partial / \partial x (1 / \mu_o \cdot \partial A_z / \partial x) + \partial / \partial y (1 / \mu_o \cdot \partial A_z / \partial y) \\ = -(\partial M_y / \partial x - \partial M_x / \partial y) \end{aligned} \quad (3-3-b)$$

—空気の領域—

$$\begin{aligned} \partial / \partial x (1 / \mu_o \cdot \partial A_z / \partial x) + \partial / \partial y (1 / \mu_o \cdot \partial A_z / \partial y) \\ = 0 \end{aligned} \quad (3-3-c)$$

$A_z$ : ベクトルポテンシャルのZ成分

$\mu_x$ : ヘッドの透磁率の長手方向成分(H/m)



$\mu_y$  : ヘッドの透磁率の垂直方向成分 (H/m)

$\mu_0$  : 真空の透磁率 (H/m)

M : 媒体の磁化の強さ (A/m)

この再生過程シミュレータは、磁気ヘッドと記録媒体を同時に解析できるため、磁気ヘッドと記録媒体間の磁氣的相互作用を考慮した解析が可能である。なお、本解析で用いたシミュレータに関する詳しい説明は、4-3節「記録再生シミュレータの開発」を参照されたい。

図3.13に再生スペーシング損失を求めるための再生過程シミュレーションの概略フローを示す。入力データとしては、ヘッドと媒体の構造と磁気特性、さらにヘッド・媒体の相対的位置関係を与える。具体的には、ヘッドの磁化モデルとしては、第2章の(2-9)式を用い、MnZnフェライトの磁気特性として、表2.1に示した飽和磁束密度0.5T、比透磁率500を与えた。また、媒体の磁化モデルとしては、実測の記録膜の磁化曲線を部分的に直線で近似するモデルを用いた<sup>(3-9)</sup><sup>(3-10)</sup>。磁化モデルの説明は後述するとして、このモデルで必要な媒体磁気特性は、飽和磁化、長手方向と垂直方向の保磁力および角形比である。次に、媒体記録膜に所定の記録密度の磁化状態を設定する。記録膜の磁化状態は、図3.14に示すように、各ビットの内部ではすべて一方向に飽和磁化状態にある理想的な記録状態を初期状態とする。まず、この媒体磁化状態で媒体自身の自己減磁作用による媒体磁化の変化を計算する。この計算は、磁気ヘッドを取り除いた状態で行う。再生過程の計算は、ヘッドと媒体の相対位置を移動させながら、媒体から発生した磁束がヘッドの再生コイルを鎖交する量を求め、ヘッド・媒体の相対位置と再生コイル鎖交磁束量の関係から、次式により再生出力Eを求める。

$$E = -N \cdot Tw \cdot V \cdot \Delta \phi / \Delta x \quad (3-4)$$

N : コイル巻線数      Tw : トラック幅 (m)

V : ヘッドと媒体の相対速度 (m/s)

$\Delta \phi / \Delta x$  : 単位移動量当りの

再生コイル鎖交磁束量の変化 (Wb/m)



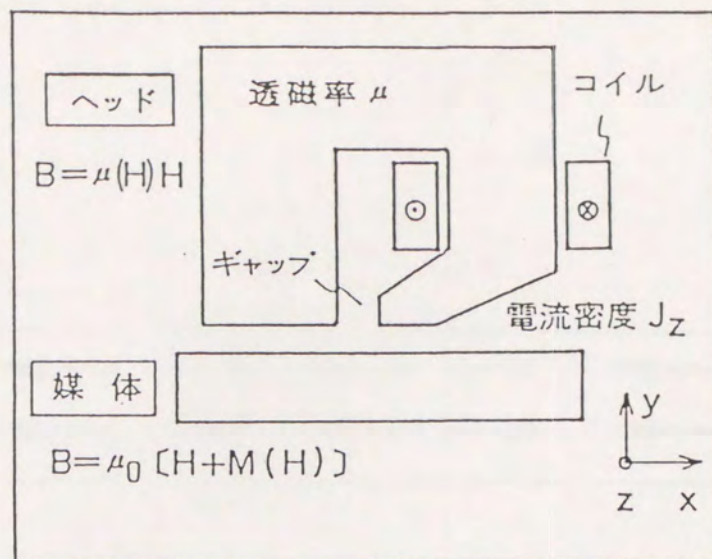


図 3. 1 2 再生過程シミュレーションの解析領域

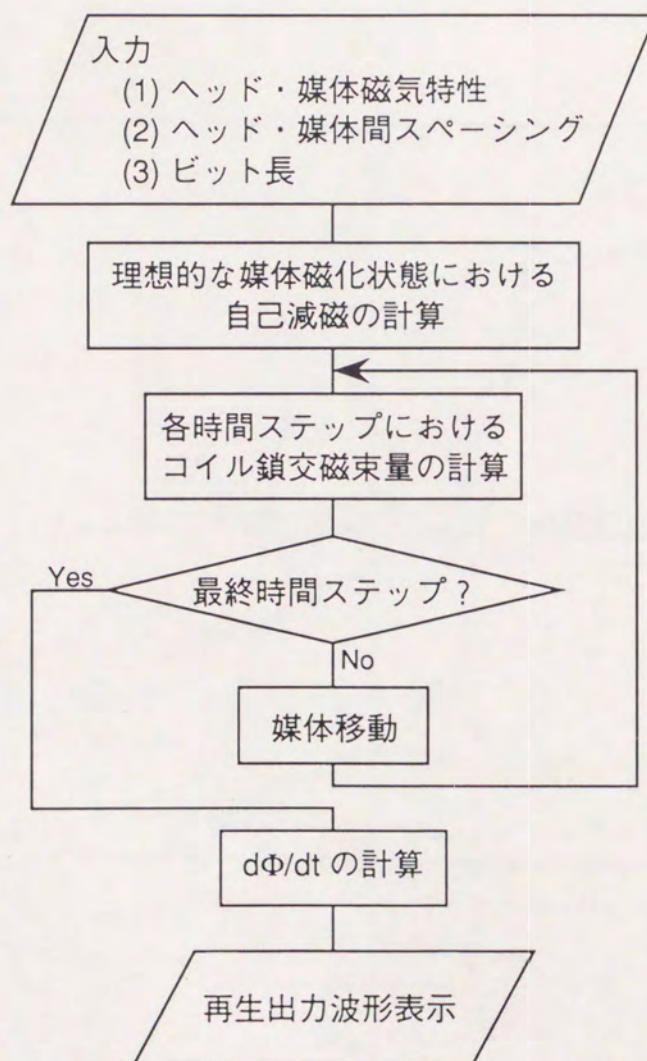


図 3. 1 3 再生過程シミュレーションの概略フロー



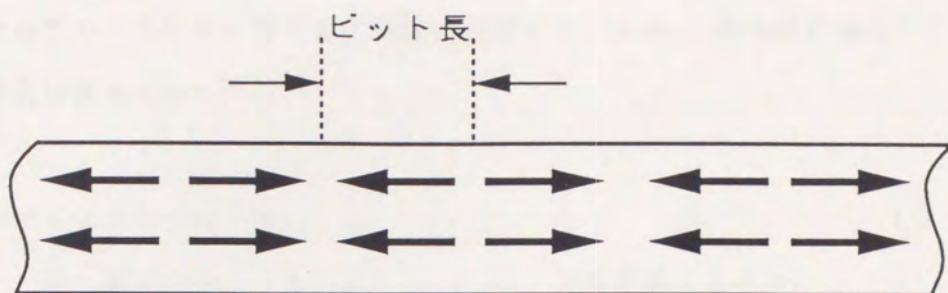


図 3. 1 4 理想的な媒体磁化状態

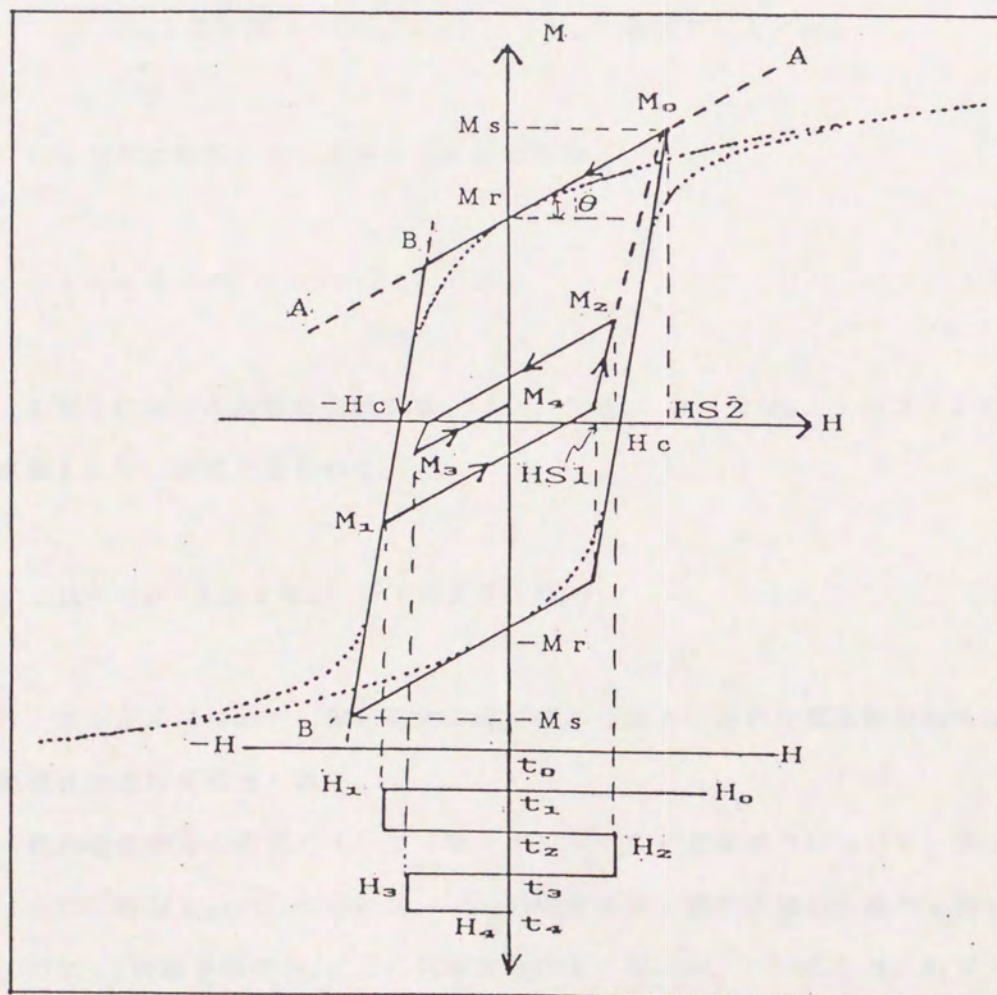


図 3. 1 5 ループ直線近似モデルの磁化曲線



本研究で用いた媒体記録膜の磁化モデルを図3. 15を用いて説明する。まず、破線で示した実測の飽和磁化曲線に対し、 $(0, \pm M_r)$  及び  $(\pm H_c, 0)$  で接線を引き、これらの接線で囲まれたループにより飽和磁化曲線を近似する。 $\pm M_r$  (飽和残留磁化) における接線の方程式は次式で表される。

$$M = \tan \theta \cdot H \pm M_r \quad (3-5)$$

$M$ : 磁化の強さ (A/m)       $H$ : 磁界強度 (A/m)

$M_r$ : 飽和残留磁化 (A/m)       $\theta$ : 接線と横軸の成す角度 ( $^\circ$ )

ここで、図中の  $HS_2$  は実験的に次式で与えられることが分かっている<sup>(3-11)</sup>。

$$HS_2 = H_c / S_q \quad (3-6)$$

$S_q$ : 角形比 ( $= M_r / M_s$ )       $H_c$ : 保磁力 (A/m)

従って、 $\tan \theta$  は次式により求めることができる。

$$\tan \theta = M_r \cdot (1 - S_q) / H_c \quad (3-7)$$

さらに、 $\pm H_c$  における接線の方程式は、 $(0, \pm H_c)$  と  $(\pm M_s, \pm HS_2)$  の2点間を結ぶ直線として、次式で表される。

$$M = M_s \cdot (H \pm H_c) / (HS_2 - H_c) \quad (3-8)$$

以上より、本モデルにおいて、飽和磁化曲線を求めるために必要な媒体磁気特性は、保磁力、飽和磁化および角形比である。

次に、飽和磁化曲線の内部のループ (マイナーループ) の求め方について、図3. 15に示すように、時刻  $t_0 \sim t_4$  の間に  $H_0 \sim H_4$  の磁界強度を順次印加した場合を例にとり説明する。時刻  $t_0$  の磁界強度  $H_0$  により飽和状態にある磁化  $M_0 (= M_s)$  は、時刻  $t_1$  の磁界強度  $H_1$  により、飽和磁化曲線を辿って磁化  $M_1$  となる。さらに、時刻  $t_2$  に磁界強度  $H_2$



が印加されると、磁化はマイナーループに入り、磁化は $M_1$ から接線 $AA'$ に並行な直線を辿る。そして、磁界強度が $HS_1$ までいくと、閉ループを形成するために直線近似の飽和磁化曲線の交点を目指して進み、磁化 $M_2$ となる。このようにしてマイナーループは形成されていき、同様な過程を通して時刻 $t_3$ 、 $t_4$ における磁化 $M_3$ 、 $M_4$ が求まる。

2次元場の再生過程の計算に、この媒体磁化モデルを適用する場合、長手方向と垂直方向の2種類の磁化曲線を与え、それぞれの磁化曲線を個別に計算することにより最終的な媒体磁化状態を求めた。実際の媒体磁化過程はベクトル的な磁化過程であり<sup>(3-12)</sup><sup>(3-13)</sup>、記録再生過程の厳密な計算には、上記モデルのように長手方向と垂直方向の磁化を独立に求めるのではなく、ベクトル的な磁化過程を考慮した磁化モデルが望ましい。このようなベクトル磁化モデルに関する検討は次章で述べる。本章の解析は、理想的磁化状態を条件とした再生過程の計算であり、記録時の複雑な磁化過程を辿る訳ではないので、計算時間を大幅に節約できる上記磁化モデルを採用して以降の解析を行った。



### 3-3-2 解析結果

再生スペーシング損失の計算を、3-2節で記録再生実験を行った $\gamma$ 酸化物塗布媒体とCo-Cr単層膜媒体について行い、実測と計算の比較を試みた。

図3.16は、1kFCIにおける再生スペーシング損失の実測と計算を比較したものである。Co-Cr単層膜媒体の再生スペーシング損失に関しては、ギャップ長 $0.3\mu\text{m}$ では記録磁界強度が不足していると考えられるため、ギャップ長 $0.55\mu\text{m}$ の実測結果も示した。なお、理想磁化状態を仮定した再生スペーシング損失の計算では、ギャップ長 $0.3\mu\text{m}$ と $0.55\mu\text{m}$ の計算結果は概ね一致したので、ギャップ長 $0.3\mu\text{m}$ の計算結果のみ示した。これより、両媒体とも実測と計算は良く一致しているといえる。また、再生スペーシング損失の計算結果では、狭スペーシング領域になると、対数表示の再生出力とスペーシングの関係は線形の関係ではなく、高スペーシング領域よりも再生スペーシング損失係数は大きい。実測の結果も若干その傾向が見え始めている。

図3.17は、25kFCI（記録波長 $\lambda = 2.0\mu\text{m}$ ）における再生スペーシング損失の実測と計算を比較したものである。1kFCIの場合と同様に、Co-Cr単層膜媒体はギャップ長 $0.3\mu\text{m}$ とともにギャップ長 $0.55\mu\text{m}$ の磁気ヘッドによる実測結果も示した。これより、ギャップ長 $0.3\mu\text{m}$ の磁気ヘッドによる再生スペーシング損失の実測は、 $\gamma$ 酸化物塗布媒体では計算と良く一致しているが、Co-Cr単層膜媒体の場合は再生スペーシング損失の実測は計算よりも大幅に大きい。しかし、ギャップ長 $0.55\mu\text{m}$ の磁気ヘッドを用いると、Co-Cr単層膜媒体の再生スペーシング損失の実測と計算は良く一致するようになる。従って、ギャップ長 $0.3\mu\text{m}$ の磁気ヘッドによるCo-Cr単層膜媒体の再生スペーシング損失の実測が計算と異なる理由は、記録磁界強度不足による記録磁化状態の不完全性にあると考えられる。また、25kFCIにおいても1kFCIの場合と同様に、狭スペーシング領域は高スペーシング領域よりも再生スペーシング損失は大きくなることを、この計算結果は示している。ところで、図3.17の図中に破線で示している直線の傾きは、再生スペーシング損失が従来から報告されている $-54.6\text{dB}/\lambda$ （ $d$ ：スペーシング量、 $\lambda$ ：記録波長）とした場合のスペーシング量の増加に伴う再生出力の低下の割合を表している。再生スペーシング損失の計算結果は、高スペーシング領域でこの直線の傾きに漸近していることが分かる。このようにスペーシングの程度により再生スペーシング損失係数が変わる理由としては、狭スペーシ



グ領域では磁気ヘッドと記録媒体の磁氣的相互作用が強まるため、磁気ヘッドが媒体の残留磁化状態に影響を及ぼしていることが考えられる。そこで、ヘッド・媒体間の相互作用が再生スペーシング損失に及ぼす影響について検討した。図3. 18に結果を示す。検討対象はCo-Cr単層膜媒体とした。この図における計算Ⅰ、Ⅱ、Ⅲの計算条件を以下に示す。

計算Ⅰ：媒体内の磁化状態を各ビットの内部ではすべて一方向に飽和磁化されている理想的磁化状態に固定して、再生出力の計算を行った。

計算Ⅱ：媒体内を計算Ⅰと同様の磁化状態に設定した後、磁気ヘッドを除いた状態で媒体自身の自己減磁作用による磁化状態の変化を計算する。再生出力の計算においては、磁化状態は上記媒体自身の自己減磁の影響を考慮した計算結果に固定して、再生出力の計算を行った。

計算Ⅲ：媒体内を計算Ⅰと同様の磁化状態に設定した後、ヘッド・媒体間の相互作用を考慮した通常の再生過程シミュレーションを行った。

ヘッド・媒体間の相互作用を考慮した計算Ⅲの再生出力は、高スペーシング領域では計算Ⅱの再生出力に、低スペーシング領域では計算Ⅰの再生出力に近づいている。また、計算Ⅰと計算Ⅱの直線の傾きは、(3-2)式の再生スペーシング損失を表す直線式の傾きと一致している。従って、計算Ⅲの再生スペーシング損失係数が狭スペーシング領域で(3-2)式と異なる理由は、スペーシングが狭くなると、自己減磁作用により減磁していた媒体内の磁化がヘッド・媒体間の相互作用により、理想磁化状態の方向に回復するためと考えられる。



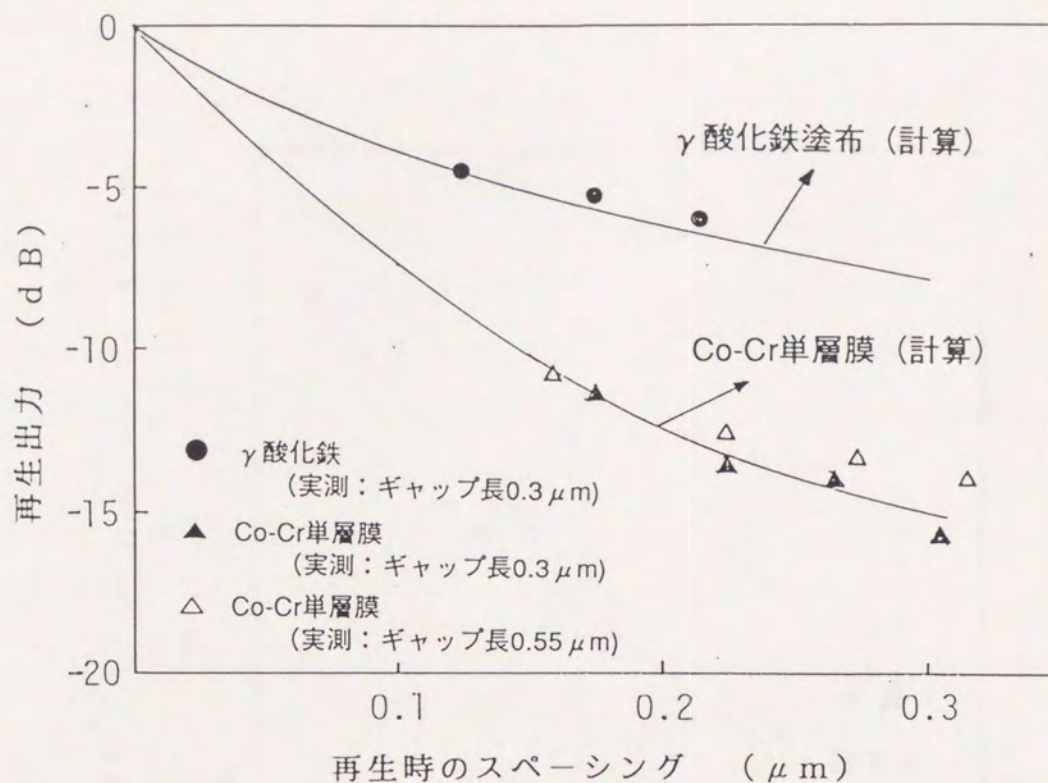


図3. 16 16 kHzにおける再生スペーシング損失の実測と計算の比較

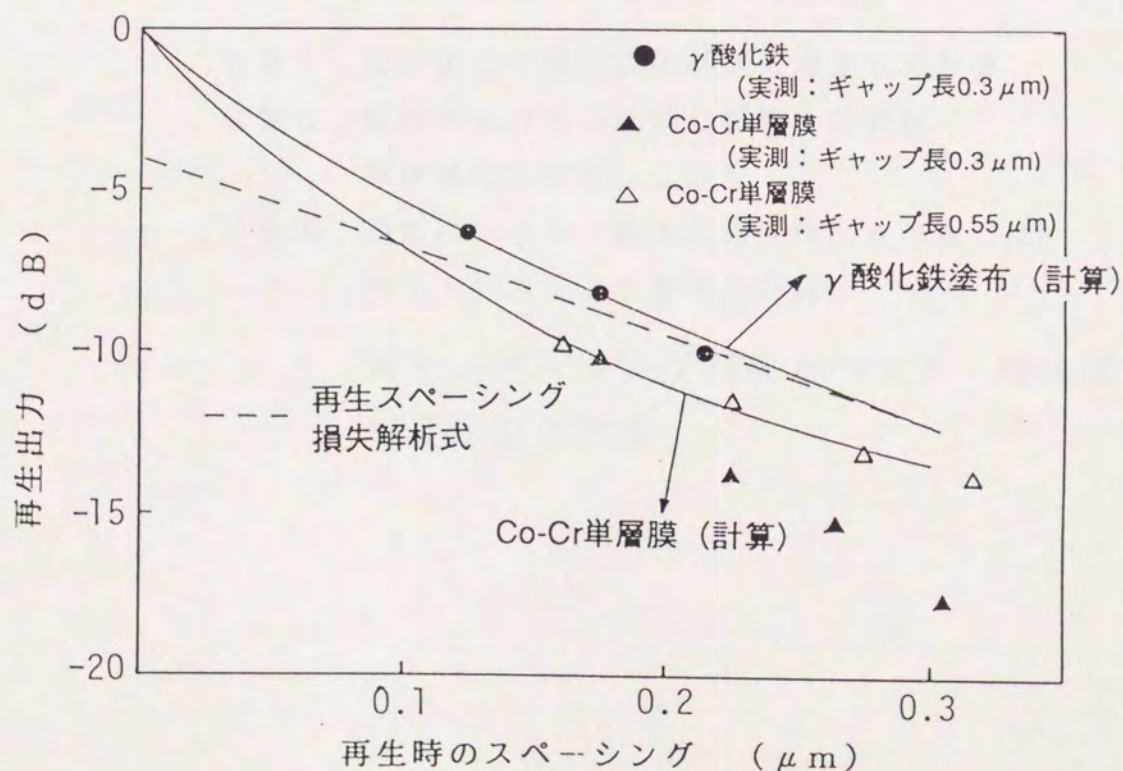
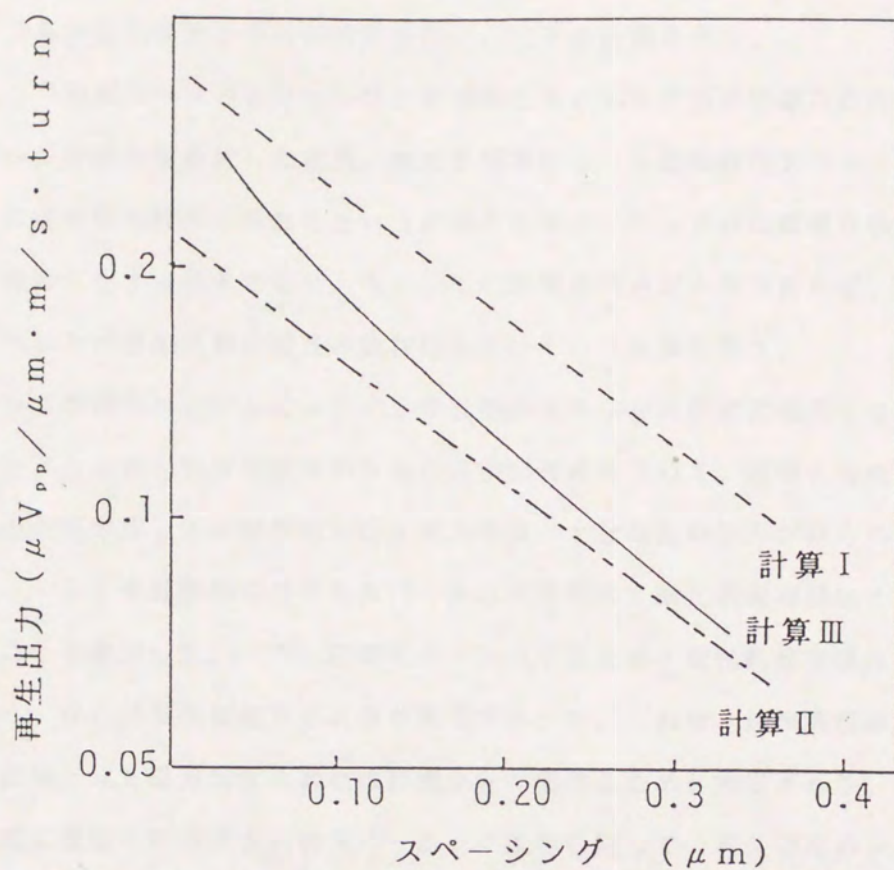


図3. 17 25 kHzにおける再生スペーシング損失の実測と計算の比較





計算 I : 媒体磁化を飽和磁化状態に固定して計算

計算 II : 媒体単独の自己減磁の影響を計算後

媒体磁化を固定して計算

計算 III : 通常のヘッド・媒体間相互作用を考慮した

再生スペーシング損失の計算

図 3. 1 8 再生スペーシング損失とヘッド・媒体間相互作用の関係



### 3-4 まとめ

第2章の記録磁界の解析結果に基づき、リング型磁気ヘッドで高密度化を実現する上でキーパラメータとなるヘッド・媒体間のスペーシングの影響について、リング型磁気ヘッドによる垂直記録系を中心に検討を行い、以下の結論を得た。

- (1) リング型磁気ヘッドとC o - C r 単層膜媒体からなる垂直記録系の記録再生スペーシング損失を検討した結果、短波長領域において記録再生スペーシング損失係数に波長依存性がみられるという従来の報告は、ヘッドの記録磁界強度が不足した場合に生ずる現象であり、ヘッドの記録磁界強度が十分であれば、記録再生スペーシング損失係数に波長の依存性はないという結論を得た。
- (2) リング型磁気ヘッドとC o - C r 単層膜媒体からなる垂直記録系とリング型磁気ヘッドと $\gamma$ 酸化鉄塗布媒体からなる長手記録系について、記録と再生スペーシング損失を分離して比較解析した。その結果、十分な記録磁界が得られる条件では、C o - C r 単層膜媒体の再生スペーシング損失は $\gamma$ 酸化鉄塗布媒体とほぼ一致することを確認した。一方、記録スペーシング損失は $\gamma$ 酸化鉄塗布媒体に比べて大きく、特に短波長領域でその差が顕著であった。これは、短波長領域の方が長波長領域よりも磁界勾配の劣化の影響を強く受けるためと推定される。
- (3) 上記2種類の記録再生系のスペーシング損失に関して、再生過程のシミュレーションを行い、再生スペーシング損失の実測と計算の比較を行った結果、十分な記録磁界強度が得られる条件では再生スペーシング損失の実測と計算は概ね一致した。さらに、再生過程のシミュレーションにおいて、再生スペーシング損失におよぼすヘッド・媒体間の磁氣的相互作用の影響について解析した。その結果、狭スペーシング領域ではヘッド・媒体間の磁氣的相互作用の影響が強まるため、再生スペーシング損失係数は従来のヘッド・媒体間の磁氣的相互作用を無視できる条件における理論解析および記録再生実験結果に比べ大きな値をとることが明らかとなった。



3 - 5 参考文献

- (3-1) 松本 : 「磁気記録」 共立出版 p.115(1977)
- (3-2) W.K. Westmize : Philips Res. Rep. 8, p.260(1953)
- (3-3) H.N. Bertram and R. Niedermeyer : IEEE Trans. Magn., Vol.MAG-18,  
p.1206(1982)
- (3-4) S. Iwasaki, D.E. Speliotis and S. Yamamoto : IEEE Trans. Magn.,  
Vol.MAG-19, p.1626(1983)
- (3-5) 山本、中村、岩崎 : 信学技報、MR84-27(1984)
- (3-6) F. Kugiya, M. Koizumi, T. Okuwaki, K. Uesaka and T. Tamura :  
J. Appl. Phys., Vol.55, p.2220(1984)
- (3-7) 松本 : 「磁気ヘッドと磁気記録」 総合電子出版 p.98(1983)
- (3-8) F. Kugiya, M. Koizumi, F. Kanno, Y. Uesaka, T. Okuwaki and T. Tamura :  
IEEE Trans. Magn., Vol.MAG-21, p.1411(1985)
- (3-9) N. Curland and D.E. Speliotis : IEEE Trans. Magn., Vol.MAG-7, No.3,  
p.538(1971)
- (3-10) D.E. Speliotis and C.S. Chi : IEEE Trans. Magn., Vol.MAG-14, p.643(1978)
- (3-11) B. Kostyshin : IEEE Trans. Magn., Vol.MAG-2, p.236(1966)
- (3-12) E.C. Stoner and E.P. Wohlfarth : Phil. Trans. Roy. Soc.(London),  
Vol.A240, p.599(1948)
- (3-13) K. Suzuki : IEEE Trans. Magn., Vol.MAG-12, p.224(1976)



## 第4章 リングヘッドと塗布媒体からなる 長手記録系による高密度記録

### 4-1 はじめに

計算機のオンラインファイルとして中心的な役割を担っている大型磁気ディスクでは、リングヘッドと塗布媒体からなる長手記録系が採用されてきた。しかし、塗布媒体の磁性粉として従来一貫して用いられてきた $\gamma$ 酸化鉄は、その磁気特性の点から高密度化の限界に近づきつつある。一方、記録再生特性の点で塗布媒体に比べ優れているC<sub>60</sub>基の強磁性金属を用いた薄膜媒体が最近注目されており、小型磁気ディスクの分野では、塗布媒体から薄膜媒体に移行しつつある。しかし、ディジタル磁気記録装置の中でも特に高信頼性が要求される大型磁気ディスク装置に薄膜媒体を導入するには、信頼性に関する実績がまだ十分とはいえない。また、記録方式に関しても、高信頼性の観点から、磁気ヘッドと記録媒体との隙間（スペーシング）を他の装置よりも広くとる必要のある大型磁気ディスク装置では、しばらくは長手記録方式が垂直記録方式よりも有利と考えられる。従って、リングヘッドと塗布媒体からなる長手記録系の高密度化の可能性を明らかにすることは、大型磁気ディスクの研究開発においては、極めて重要な課題である。

本研究では、図4.1に示すように、1) 塗布媒体の高精度磁化モデルを構築し、この媒体磁化モデルの導入により、記録再生特性の定量的検討が可能なシミュレータを開発すること、さらに2) このシミュレータによる計算機実験により、高密度化に有効な媒体パラメータを検討し、塗布媒体の高密度化の可能性を明らかにすることを試みた。

第2節では、磁性粉として $\gamma$ 酸化鉄を用いた塗布媒体を具体的例題に、塗布媒体の磁気特性を高精度に再現できる媒体磁化モデルを検討した結果について述べる。本研究では、塗布媒体の磁気特性は個々の磁性粉の磁氣的性質の集合と考え、磁性粉単体の磁氣的性質を基本とした媒体磁化モデルを構築することを試みた。第3節では、この磁化モデルを媒体磁化モデルとして導入した記録再生シミュレータを開発し、リングヘッドと $\gamma$ 酸化鉄を用いた塗布媒体からなる長手記録系の記録再生特性の実測と計算を比較した結果について述べる。比較対象には、比較の精度を高めるため、過去に製品化されて実績のある磁気ディスク装置に用いた磁気ヘッドと塗布媒体の組合せを選んだ。第4節では、開発した記録



再生シミュレータをツールとして、塗布媒体の磁気特性と記録再生特性との関係を解析した結果について述べる。本研究により開発した媒体磁化モデルは、塗布媒体を構成する磁性粉の磁氣的性質を考慮できるため、媒体のマクロな磁気特性とともに、磁性粉の配向性や磁気特性の均一性等が記録再生特性に及ぼす影響についても検討が可能となった。第5節では、第4節の知見をもとに、磁気ディスク装置における塗布媒体の高密度化のアプローチについて検討した結果を述べる。

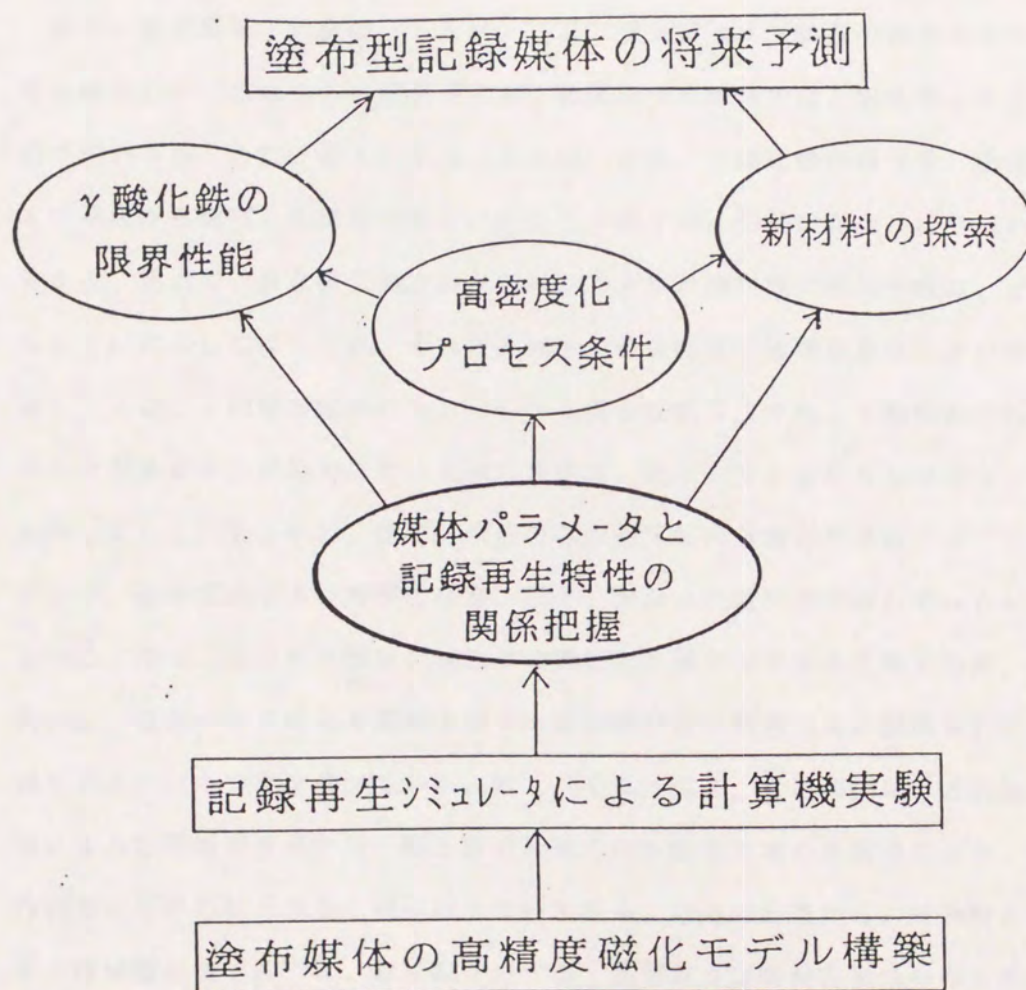


図4. 1 本研究の目的



#### 4-2 塗布媒体磁化モデルの構築

磁気記録の記録再生シミュレータによる記録再生特性の計算精度は、当然ながらシミュレータに組み込まれた磁気ヘッドおよび記録媒体の磁化モデルに大きく依存する。本研究で対象とした塗布媒体は、磁性粉とアルミナ粉を高分子熱硬化樹脂と混練して、アルミニウム基板上に塗布することにより作製される。従って、振動試料型磁力計等により測定される媒体の磁気特性は、個々の磁性粉の磁気特性の集合としての特性と考えることができる。そこで、本研究では、磁性粉の磁氣的性質を検討し、その知見をもとに媒体磁化モデルを構築することを試みた。

##### 4-2-1 走査型電子顕微鏡による塗布媒体の観察

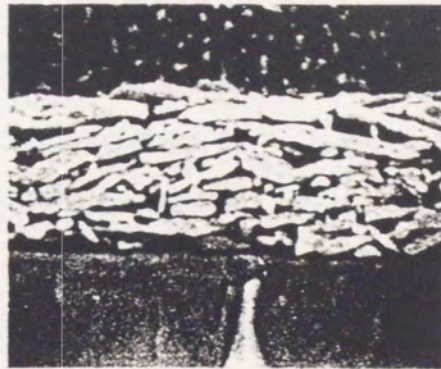
まず、走査型電子顕微鏡 (SEM) により磁気ディスク装置の塗布媒体中の磁性粉の様子を観察した。これまでの磁気ディスク装置用塗布媒体では、磁性粉として針状の $\gamma$ 酸化鉄が用いられてきた。図4.2は、SEMにより、 $\gamma$ 酸化鉄の様子を、塗布媒体の表面および断面から観察した結果である。針状粒子の寸法・形状はかなりばらついていることが分かる。従って、形状磁気異方性が支配的である $\gamma$ 酸化鉄の磁気特性は、寸法・形状のばらつきに対応してばらつき、それが記録膜の磁気特性に影響を及ぼしていると考えられる。図4.3は、この塗布媒体のSEMによる表面観察写真から、 $\gamma$ 酸化針状粒子の長軸の長さの分布を求めた結果である。長軸の長さは、約100nmから600nmの範囲で広く分布している。ちなみに、塗布工程前のこの磁性粉の長軸の長さは、 $470 \pm 105$  nmであり、塗布工程および表面の研磨工程で、かなりの磁性粉が折れていると推定される。さらに、図4.2から $\gamma$ 酸化針状粒子の磁化容易軸方向である長軸方向は、長手記録方式向けに、磁気ヘッドによる記録方向である記録円板の円周方向に配向されてはいるが、やはり方向にばらつきを持っている。図4.4は、図4.3と同様に、この塗布媒体のSEMによる表面観察写真から、磁性粉の長軸方向の分布を求めた結果である。長軸の方向は円周方向を中心に $\pm 30^\circ$ 程度ばらついている。以上の結果から、針状粉を用いた塗布媒体の媒体磁化モデルでは、針状粒子の寸法・形状および長軸方向の分布を考慮したモデルを構築する必要があると言える。

##### 4-2-2 磁性粒子の磁化反転機構





(a) 媒体表面



(b) 媒体断面

図4. 2 走査型電子顕微鏡による $\gamma$ 酸化鉄塗布媒体の観察

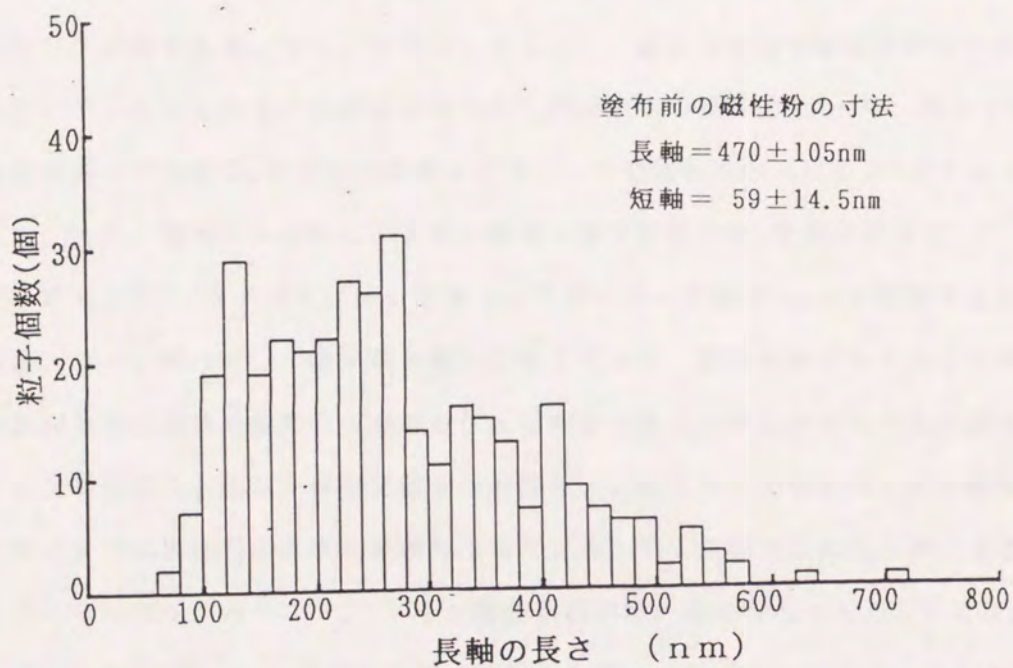


図4. 3  $\gamma$ 酸化鉄塗布媒体の長軸の長さの分布 (媒体表面)

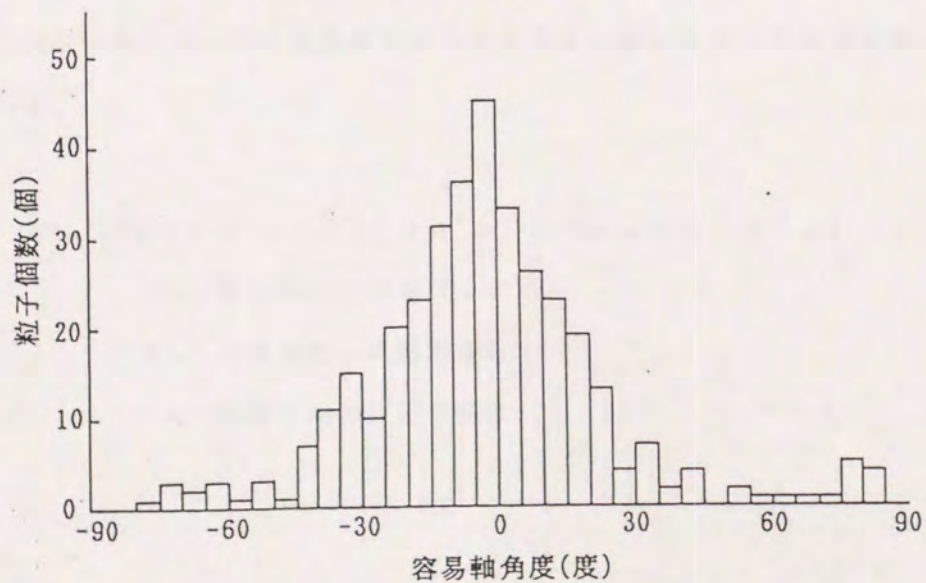


図4. 4  $\gamma$ 酸化鉄塗布媒体の長軸の方向分布 (媒体表面)



まず、 $\gamma$ 酸化鉄単体の磁化状態について調べた。図4. 5は、電子線ホログラフィにより、外部磁場の無い状態で $\gamma$ 酸化鉄単体から発生する磁場の観察を行なった結果である。電子線ホログラフィにおける干渉縞は、磁性体から発生する磁力線を表している<sup>〔4-1〕</sup>。この観察結果は、 $\gamma$ 酸化鉄単体から発生する磁場は、長軸の先端から発生する磁場が支配的であることを示している。従って、外部磁場の無い状態では、 $\gamma$ 酸化鉄は長軸方向に磁化された単磁区粒子であると仮定して、磁化反転機構の検討を進めることにした。

つぎに、媒体中の磁性粉が磁化反転するために必要な磁界である臨界磁界について調べた。図4. 6は、媒体から7mm□の薄片を切り出し、振動試料型磁力計により、記録円板の円周方向つまり針状粉の長軸が配向されている方向に外部磁場を印加して磁化曲線を測定した結果である。図4. 4で示したように、媒体中の全ての磁性粉が一律に円周方向を向いていないため多少の誤差を伴うが、円周方向の保磁力 $H_{c\parallel}$ は、媒体中の磁性粉の臨界磁界の平均値 $H_n$ と近似的に考えてよく、その値は $350 \times 10^3 / 4\pi$  (A/m)である。一方、磁気トルク計による同一媒体の異方性磁界 $H_k$ を測定すると $930 \times 10^3 / 4\pi$  (A/m)であり、円周方向の保磁力 $H_{c\parallel}$ と比較すると約2.5倍程度大きい。従って、 $\gamma$ 酸化鉄の磁化反転モデルは、磁化容易方向である長軸方向の臨界磁界が異方性磁界の数分の1であることを考慮できるモデルである必要がある。

以上の知見をもとに、単磁区粒子の各種磁化反転モデルの中から、針状磁性粉の形状異方性および臨界磁界の性質を反映できるモデルとして、扁長回転楕円体（葉巻型）に関するカーリングモデル<sup>〔4-2〕</sup>・<sup>〔4-3〕</sup>を $\gamma$ 酸化鉄磁性粉の磁化反転モデルとして検討してみることにした<sup>〔4-4〕</sup>。このモデルでは、磁性粉を図4. 7 (a)に示すような扁長回転楕円体で近似する。この磁性粉の長軸とのなす角度 $\Omega$ の方向に外部磁場 $H_{ex}$ を印加した結果、長軸とのなす角 $\omega$ の方向に磁化が向いたとすると、磁化の方向の内部磁場 $H_t$ は、次式で表される。

$$H_t = -M_s (N_b \sin^2 \omega + N_a \cos^2 \omega) + H_{ex} \cos (\Omega - \omega) \quad (4-1)$$

$M_s$  : 飽和磁化の強さ (A/m)

$N_a$  : 長軸方向の反磁界係数

$N_b$  : 短軸方向の反磁界係数



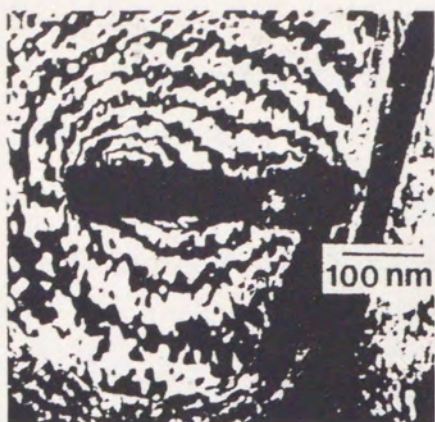


図 4. 5

電子線ホログラフィによる $\gamma$ 酸化鉄粒子の磁化状態の観察

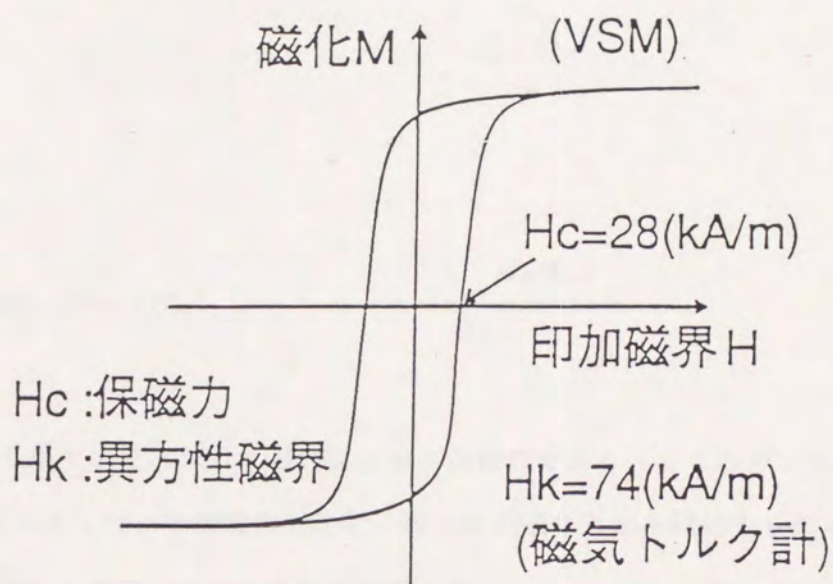
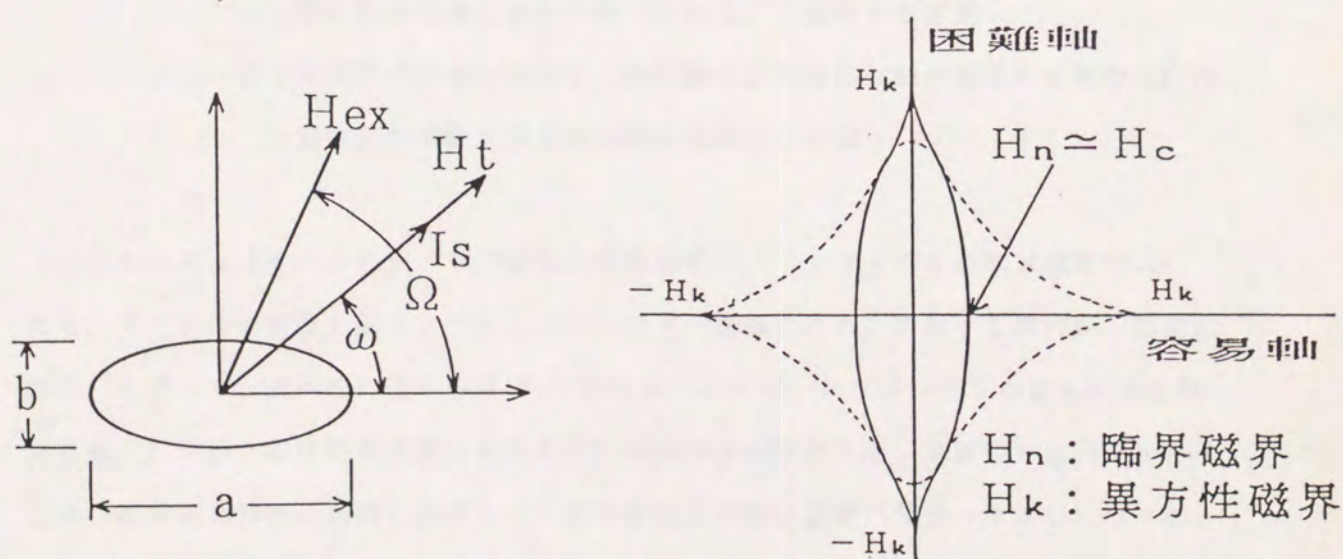


図 4. 6  $\gamma$  酸化鉄塗布媒体の飽和磁化曲線



(a) 針状粒子の近似形状 (b) 針状粒子の臨界磁界

図 4. 7 扁長回転楕円体カーリングモデル



一方、この磁性粉の異方性エネルギーとゼーマンエネルギーのエネルギー最小の条件は、次式で表される。

$$1/2 M_s^2 (N_b - N_a) \sin 2\omega - M_s H_{ex} \sin(\Omega - \omega) = 0 \quad (4-2)$$

(4-1) 式と (4-2) 式より  $\omega$  を消去すると、次式が求まる。

$$\frac{H_{ex}}{H_k} = \frac{h(h+1)}{\sqrt{(h+1)^2 - \sin^2 \Omega (2h+1)}} \quad (4-3)$$

ただし、

$$H_k = M_s (N_b - N_a), \quad h = \frac{(H_t + M_s N_a)}{H_k}$$

$H_k$  は、扁長回転楕円体で近似した磁性粉の異方性磁界である。ところで、扁長回転楕円体カーリングモデルでは、外部磁界  $H_{ex}$  が、磁性粉が磁化反転を開始する磁界強度である臨界磁界  $H_n$  に等しい場合、 $h$  は、次式で表される。

$$h = -k / S^2 + N_a / 2\pi \quad (4-4)$$

$k$  : 磁性粉の長軸と短軸の比（針状比）に依存する定数

$S$  : 磁性粉の短軸の半径を、磁性粉の材料特性（飽和磁化と交換相互作用定数）から決まる基準半径で規格化した値

(4-3) 式と (4-4) 式より、扁長回転楕円体カーリングモデルの臨界磁界  $H_n$  は、図 4. 7 (b) の実線で示すように、アステロイド曲線とこれに内接する楕円から形成される。ところで、具体的に臨界磁界  $H_n$  を求めるためには、パラメータ  $S$  の値を知る必要がある。しかし、磁性粉の交換相互作用定数の計測は困難なため、本研究ではパラメータ  $S$  は、媒体磁気特性の実測と計算との対応を検討する際の調整パラメータとして用いた。



#### 4-2-3 塗布媒体の磁化モデルの構築

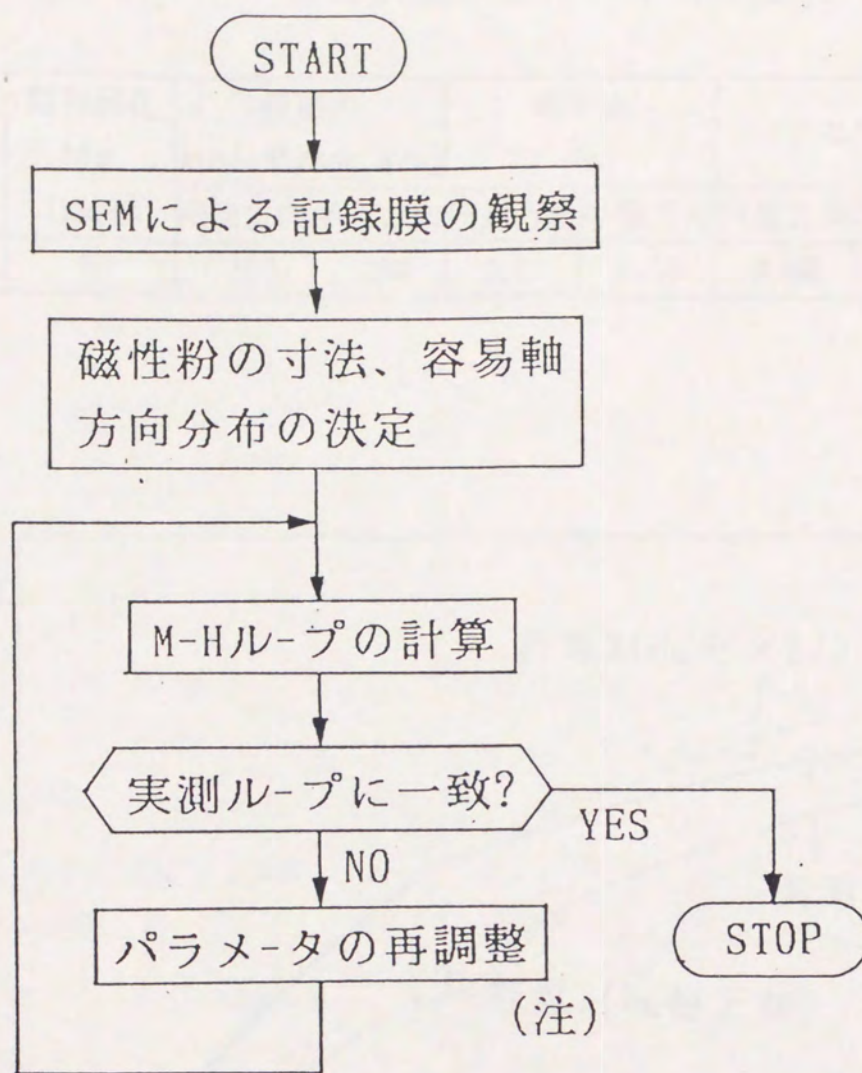
塗布媒体の磁化モデルを図4.8に示す手順に従って構築した。まず、対象とする塗布媒体の記録膜表面と断面をSEMにより観察し、磁性粉の寸法（長軸と短軸の長さ）と磁性粉の磁化容易軸方向である長軸の方向分布を求める。次に、これらの分布を入力データとして、媒体の磁化曲線（M-Hループ）を計算し、実測との比較を行なう。具体的には、粒子寸法と磁化容易軸方向が入力データとして与えられている個々の磁性粉に対し、外部磁場を印加した場合の磁化ベクトルの向きを各々計算する。外部からの印加磁場に対する記録膜としての磁化の大きさと向きは、個々に計算された磁性粉の磁化ベクトルのベクトル和として求めた。従って、このモデルでは、磁性粒子間の磁氣的相互作用については考慮していない。なお、個々の磁性粉の非可逆な磁化過程である磁化反転のモデルとしては、4-2-2で述べた扁長回転楕円体カーリングモデルを用いた。また、磁化反転前後の可逆磁化過程については、一斉回転型磁化モデル<sup>4-5)</sup>に従うとした。

以上の手順に従って、表4.1に示す磁気特性を有する $\gamma$ 酸化鉄塗布媒体の磁化モデルの構築を試みた。図4.9は、半径方向の初期磁化曲線について実測と計算を比較した結果である。計算Iは、磁化モデルの調整パラメータとして、4-2-2で述べた扁長回転楕円体カーリングモデルにおけるパラメータSのみを用いた場合である。この結果は、パラメータSのみを調整パラメータとして用いた磁化モデルは、実際よりも円周方向の磁気異方性が大きいこと半径方向に磁化されにくいことを示していると考えられる。その原因としては、実際の磁性粉の表面は平滑でなく凹凸が存在すること、さらに磁性粉の形状も理想的な扁長回転楕円体ではないこと等により、実際の磁性粉の異方性磁界 $H_k$ は、計算で求められる異方性磁界 $H_k = M_s (N_b - N_a)$ （ $M_s$ ：飽和磁気の強さ、 $N_a$ ：長軸方向の反磁界係数、 $N_b$ ：短軸方向の反磁界係数）よりも小さくなっていると考えられる。そこで、磁性粉の異方性磁界を次式で求めることとし、dを磁化曲線を実測と一致させるための調整パラメータとして新たに追加した<sup>4-6)</sup>。

$$H_k = d \cdot M_s (N_b - N_a) \quad (4-5)$$

図4.9の計算IIは、このようにして求めた半径方向の初期磁化曲線であり、ほぼ実測と一致することが確認された。なお、計算IIにおける調整パラメータSおよびdの





(注) 調整パラメータは、パラメータ  $S$  と異方性磁界  $H_k$

図4. 8 磁化曲線 (M-Hループ) の復元手順



表 4. 1  $\gamma$  酸化鉄塗布媒体の磁気特性

| 材 料                           | 飽和磁化<br>$M_s$<br>(kA/m) | 保磁力<br>$H_c(10^3/4\pi \text{ A/m})$ |      | 角形比<br>$S_d$ |      | $S^*$ |      | 膜厚<br>$\delta(\mu\text{m})$ |
|-------------------------------|-------------------------|-------------------------------------|------|--------------|------|-------|------|-----------------------------|
|                               |                         | 円周方向                                | 半径方向 | 円周方向         | 半径方向 | 円周方向  | 半径方向 |                             |
| $\gamma\text{Fe}_2\text{O}_3$ | 90                      | 350                                 | 200  | 0.83         | 0.39 | 0.69  | 0.17 | 0.56                        |

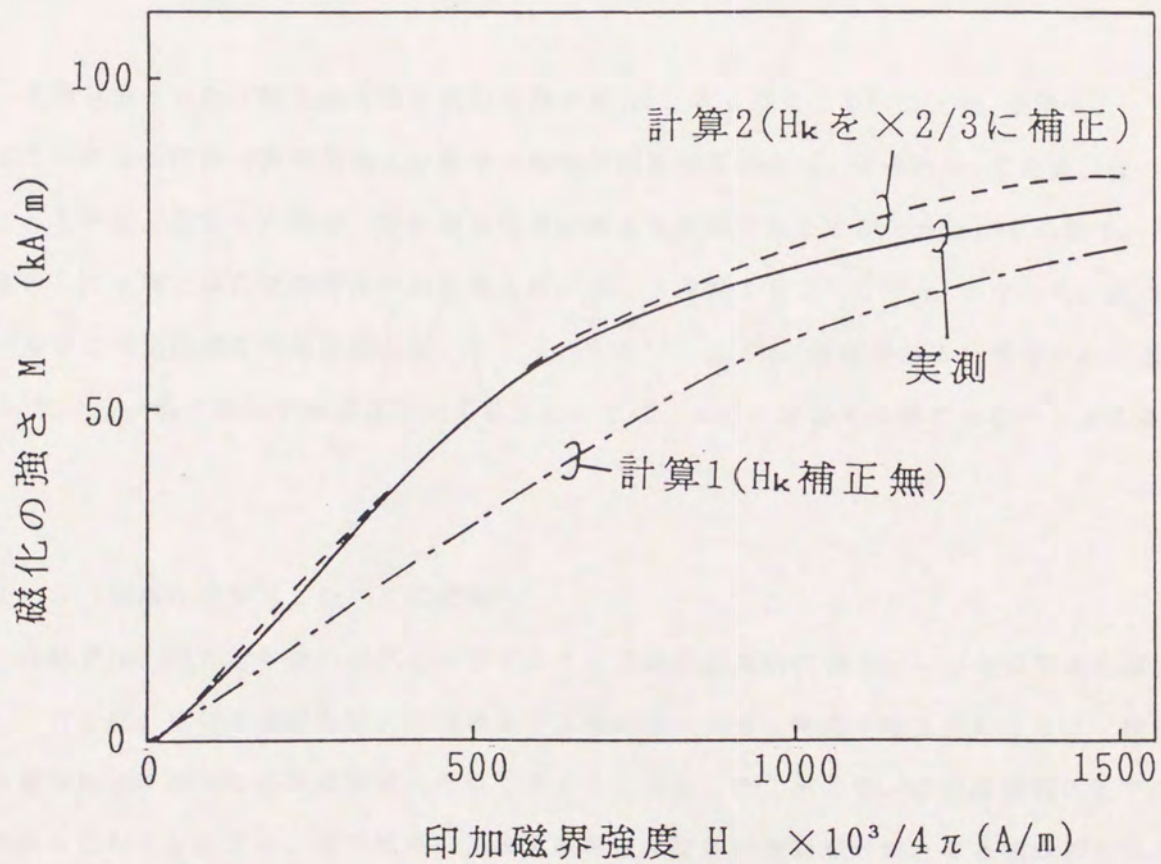


図 4. 9 半径方向の初期磁化曲線の実測と計算の比較



最終的な値は、それぞれ  $S = 1.8$ 、 $d = 2/3$  となった。

図4.10は、円周方向と半径方向の飽和磁化曲線の実測と計算を比較した結果である。飽和磁化曲線に関しても、計算は実測結果と良く一致することが分かった。

ところで、パラメータ  $S$  は次式で定義される。

$$S = R / R_0 \quad (4-6)$$
$$R_0 = \sqrt{A / M_s}$$

$R$  : 粒子の短軸半径

$A$  : 交換相互作用定数

$M_s$  : 飽和磁化の強さ

今回対象とした  $\gamma$  酸化鉄の飽和磁化の強さ  $M_s$  は、 $340 \times 10^3 \text{ A/m}$  であり、SEMによる媒体の観察結果より粒子の短軸半径  $R$  の平均値は、 $26 \text{ nm}$  である。従って、 $S = 1.8$  とした場合、交換相互作用定数  $A$  を逆算することができる。その結果、対象とした  $\gamma$  酸化鉄の交換相互作用定数  $A$  は、 $0.24 \times 10^{-11} \text{ J/m}$  となった。鉄のバルクでの交換相互作用定数  $A$  が、 $1.4 \times 10^{-11} \text{ J/m}$  程度であると報告されており<sup>4-7)</sup>、 $\gamma$  酸化鉄の交換相互作用定数  $A$  としては、大きく矛盾する値ではないと言える。

#### 4-3 記録再生シミュレータの開発

前節では、磁性粉単体の磁化反転モデルとして扁長回転楕円体カーリングモデルを導入し、さらに、媒体中の磁性粉の寸法および方向のばらつきを考慮することにより、 $\gamma$  酸化鉄塗布媒体の磁気特性を高精度に再現できることを示した。そこで、この媒体磁化モデルを組み込むことにより、塗布媒体の記録再生特性の定量的検討が可能となる記録再生シミュレータの開発を試みた。

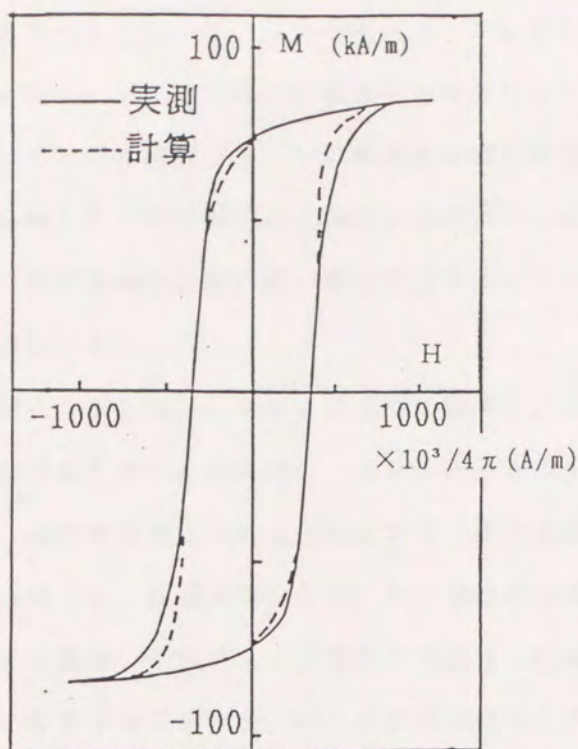
##### 4-3-1 記録再生機構の概要

図4.11に、磁気記録装置の記録再生の原理をリングヘッドを用いた長手記録系を例にとり示す。記録では、リング状の高透磁率磁性材料からなる磁気コアにコイルを巻回し

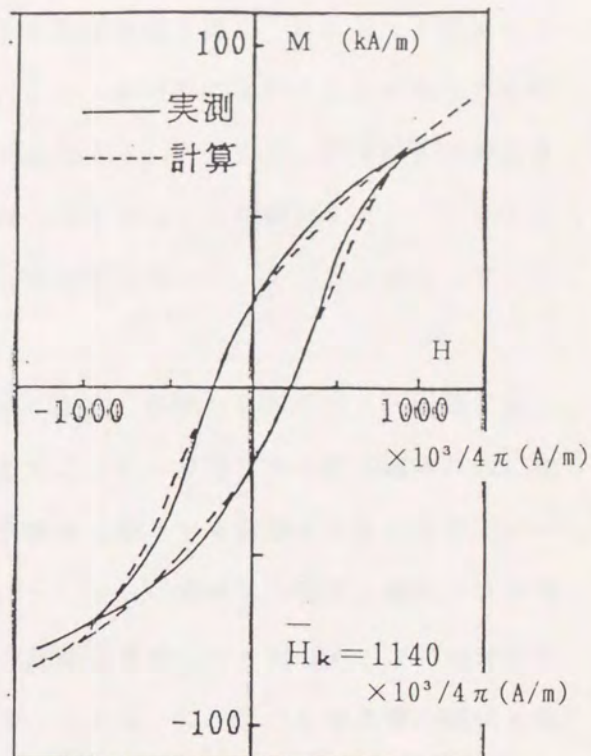


$S=1.8$

$H_k$ を2/3に補正



(a) 円周方向



(b) 半径方向

図4. 10 飽和磁化曲線の実測と計算の比較

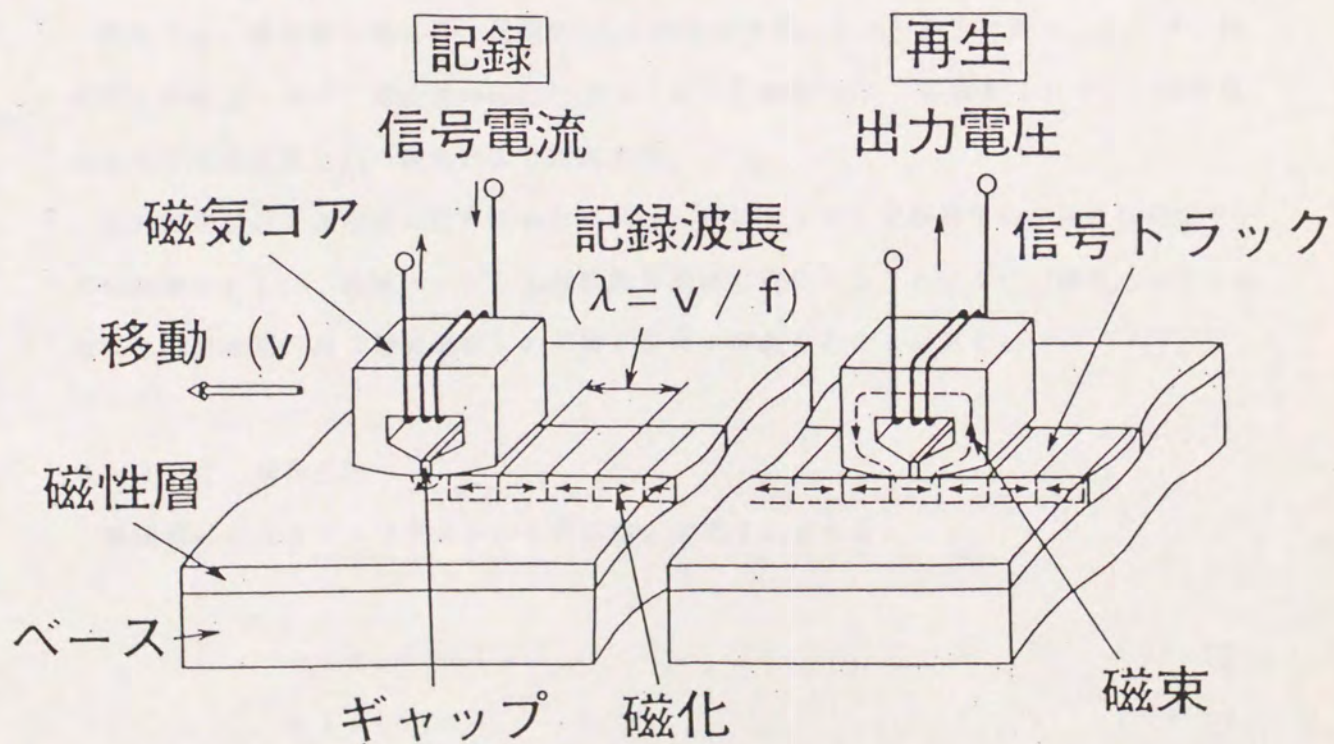


図4. 11 磁気記録装置の記録再生の原理



た磁気ヘッドに、1、0の情報パターンに対応する記録電流を流すことによって磁気コアを磁化し、ギャップ部から漏洩する磁界により、これと相対的に移動する記録媒体の磁性層に1、0の情報パターンに対応する磁化状態を記録する。再生では、記録媒体の磁性層に記録された残留磁化から発生する磁束が、磁気ヘッドのコイルを鎖交すると、ファラデーの電磁誘導の法則に従い再生電圧が誘起される原理を利用して、1、0の情報パターンを検出する。

図4. 12は、記録および再生の機構を、さらに詳しく説明した図である。記録では、磁性層に作用する磁界は、コイルに記録電流を流すことにより発生する記録磁界 $H_{ex}$ に加え、磁性層が磁化されることにより、磁化の境界領域に発生する磁極による反磁界 $H_d = -NM$  ( $N$ : 反磁界係数 $\geq 0$ 、 $M$ : 磁性層の磁化)、さらに磁性層の磁化で磁気コアが帯磁するため、それによって発生する磁界いわゆる鏡像磁界 $H_{im} = \alpha M$  ( $\alpha$ : コアの透磁率等に依存する正の定数、 $M$ : 磁性層の磁化) が考えられる。このように磁性層の磁化を決定する磁界のうち、反磁界 $H_d$ と鏡像磁界 $H_{im}$ は磁性層の磁化状態に依存するため、最終的な磁性層の磁化を正確に求めるためには、図4. 13に示すような、セルフコンシステントな反復収束計算を行なう必要がある<sup>〔4-8〕</sup>。反磁界 $H_d$ は記録磁界 $H_{ex}$ と逆向きに働くため、磁化 $M$ を減少させる。一方、鏡像磁界 $H_{im}$ は記録磁界 $H_{ex}$ と同じ方向に働くため、磁化 $M$ を増大させる効果をもっている。

再生では、磁性層の磁化は、反磁界 $H_d$ と鏡像磁界 $H_{im}$ により決定される。従って、再生のため磁気ヘッドが磁性層の磁化に近づくと、反磁界 $H_d$ により弱められていた磁性層の磁化が鏡像磁界 $H_{im}$ の働きにより回復する。

記録再生過程を高精度に計算するためには、磁気ヘッドと記録媒体の高精度な磁化モデルの構築とともに、磁気ヘッドと記録媒体を同時に解析することにより、磁気ヘッドと記録媒体間の相互作用(鏡像磁界)の影響を正確に考慮することが望ましい<sup>〔4-9〕, 〔4-10〕</sup>。

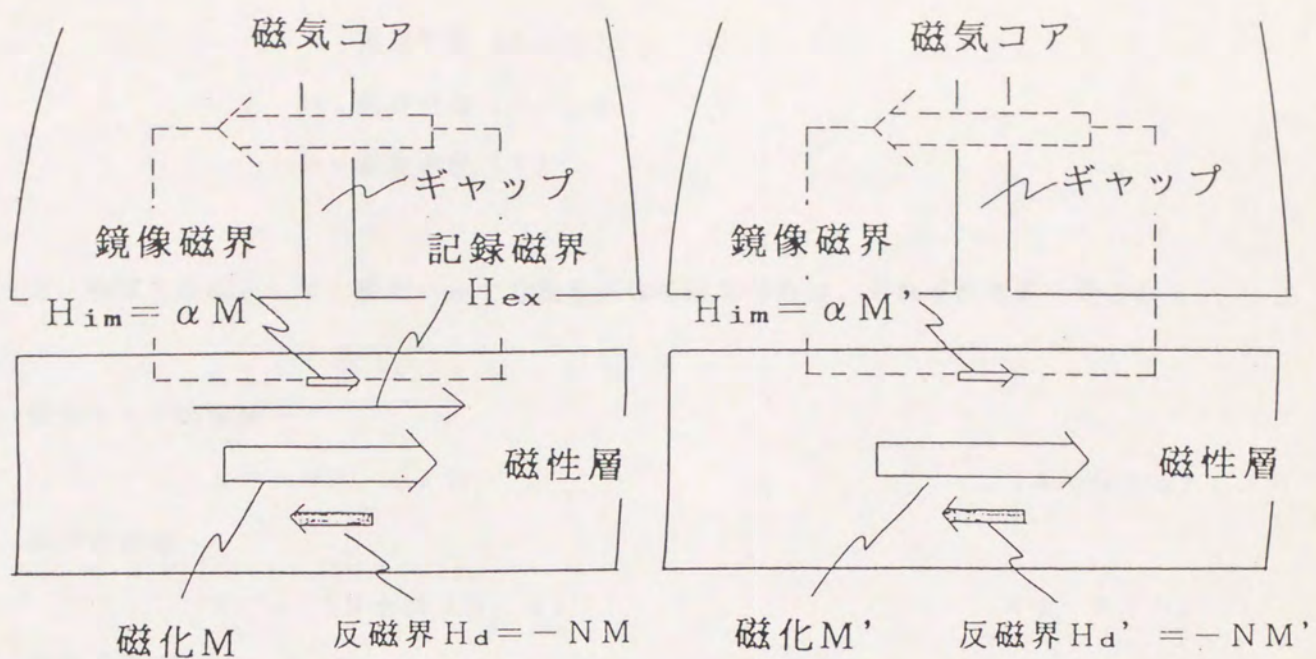
#### 4-3-2 解析手法

静磁場におけるマックスウェルの方程式は、次式で表される。

$$\text{rot } H = J \quad (4-7)$$

$$\text{div } B = 0 \quad (4-8)$$





— 記録過程 —

— 再生過程 —

図 4. 1 2 磁気記録装置の記録再生機構

$$\begin{aligned}
 H_{ex} &\rightarrow M^{(1)} \rightarrow H_d^{(1)} + H_{im}^{(1)} \\
 &\downarrow \\
 H_{ex} + H_d^{(1)} + H_{im}^{(1)} &\rightarrow M^{(2)} \rightarrow H_d^{(2)} + H_{im}^{(2)} \\
 &\downarrow \\
 \dots\dots M^{(n-1)} &\rightarrow H_d^{(n-1)} + H_{im}^{(n-1)} \\
 &\downarrow \\
 H_{ex} + H_d^{(n-1)} + H_{im}^{(n-1)} &\rightarrow M^{(n)}
 \end{aligned}$$

$$\text{収束条件: } |M^{(n)} - M^{(n-1)}| \leq \varepsilon$$

図 4. 1 3 磁化のセルフコンシステントな反復収束計算法



J : 電流密度 (A / m<sup>2</sup>)

H : 磁界強度 (A / m)

B : 磁束密度 (T)

一方、物質方程式として、磁気ヘッドと記録媒体の磁気特性は、それぞれ次式で表される。

— 磁気ヘッドの領域 —

$$B = \mu (H, \omega) H \quad (4-9-a)$$

— 媒体の領域 —

$$B = \mu_0 (H + M(H, \sigma)) \quad (4-9-b)$$

— 空気の領域 —

$$B = \mu_0 H \quad (4-9-c)$$

B : 磁束密度 (T)

$\mu_0$  : 空気の透磁率 (H / m)

M : 記録媒体の磁化の強さ (A / m)

H : 磁界強度 (A / m)

ここで、 $\mu (H, \omega)$  は磁気ヘッドの透磁率が、磁界 H と記録再生周波数  $\omega$  に依存することを意味する。また、 $M (H, \sigma)$  は、記録媒体の磁化は磁界 H と磁化の履歴  $\sigma$  に依存することを意味する。

従って、(4-7) 式と (4-9) 式より、次式が導かれる。

— 磁気ヘッドの領域 —

$$\text{rot} (1 / \mu \cdot B) = J \quad (4-10-a)$$

— 媒体の領域 —

$$\text{rot} (1 / \mu_0 \cdot B) = \text{rot} M \quad (4-10-b)$$

— 空気の領域 —

$$\text{rot} (1 / \mu_0 \cdot B) = 0 \quad (4-10-c)$$



さらに、次式で磁気ベクトルポテンシャルAを定義すると、次式の磁束密度Bは(4-8)式を満足する。

$$B = \text{rot } A \quad (4-11)$$

(4-11)式を(4-10)式に代入すると、次式が導かれる。

—磁気ヘッドの領域—

$$\text{rot } (1/\mu \cdot \text{rot } A) = J \quad (4-12-a)$$

—媒体の領域—

$$\text{rot } (1/\mu_0 \cdot \text{rot } A) = \text{rot } M \quad (4-12-b)$$

—空気の領域—

$$\text{rot } (1/\mu_0 \cdot \text{rot } A) = 0 \quad (4-12-c)$$

ところで、磁気記録装置では、円周方向への記録範囲を規定する磁気ヘッドのギャップ長に比較して、半径方向への記録範囲を規定する磁気ヘッドのトラック幅は、2桁程度広い。従って、記録再生シミュレータは、図4.14に示すように、半径方向が無限に長い2次元問題として取り扱うことにした。その場合、(4-12)式は、次式で表される。

—磁気ヘッドの領域—

$$\partial/\partial x (1/\mu_y \cdot \partial A_z/\partial x) + \partial/\partial y (1/\mu_x \cdot \partial A_z/\partial y) = -J_z \quad (4-13-a)$$

—媒体の領域—

$$\begin{aligned} \partial/\partial x (1/\mu_0 \cdot \partial A_z/\partial x) + \partial/\partial y (1/\mu_0 \cdot \partial A_z/\partial y) \\ = -(\partial M_y/\partial x - \partial M_x/\partial y) \end{aligned} \quad (4-13-b)$$

—空気の領域—

$$\partial/\partial x (1/\mu_0 \cdot \partial A_z/\partial x) + \partial/\partial y (1/\mu_0 \cdot \partial A_z/\partial y) = 0 \quad (4-13-c)$$



この式と物質方程式である、(4-9) 式をセルフコンシステントに解けば、磁気ヘッドと記録媒体間の相互作用（鏡像磁界）の影響を正確に考慮することができる。なお、

(4-13) 式は、 $A_z$ を未知数とする拡散方程式である。従って、(4-13) 式は、図4. 15に示すように磁気ヘッドと記録媒体を含む解析領域を三角形要素に分割し、有限要素法により離散化して、数値解析的に解くことができる。

ところで、記録媒体の物質方程式である(4-9-b) 式における、 $M(H, \sigma)$ を求めるための塗布媒体磁化モデルについては、前節で述べた。一方、磁気ヘッドの物質方程式である(4-9-a) 式に関する磁気ヘッドの磁化モデルは、第2章でも述べた以下の実験式を用いた<sup>4-11)</sup>。軟磁性材料のヒステリシス特性は考慮していない。

$$B = \mu_0 H + (2 B_s / \pi) \tan^{-1} \{ (\pi / 2 B_s) \cdot \mu_0 (\mu_{\max} - 1) H \} \quad (4-14)$$

$\mu_0$  : 空気の透磁率 (H/m)       $\mu_{\max}$  : ヘッドの最大比透磁率

$B_s$  : ヘッドの飽和磁束密度 (T)

図4. 16に記録再生シミュレーションの概略フローを示す。記録過程の計算では、磁気ヘッドと記録媒体の形状・寸法およびスペーシングなど磁気ヘッドと記録媒体の位置関係、さらには、磁化モデルに対応した磁気ヘッドと記録媒体の磁気特性を入力データとして与える。次に、信号電流を電流密度 $J_z$ としてコイルに与え、ヘッド磁界により媒体が記録されてゆく過程を、媒体を移動させながら計算してゆく。再生過程の計算では、記録過程と同様の入力データに加え、記録過程の最終時の媒体の磁化状態を入力データとして、記録過程と同様に媒体を移動させながらコイルに鎖交する磁束量 $\Phi$ を求めてゆく。再生出力は、媒体の移動量 $\Delta x$ に対する磁束の変化量 $\Delta \Phi$ から次式で求める。

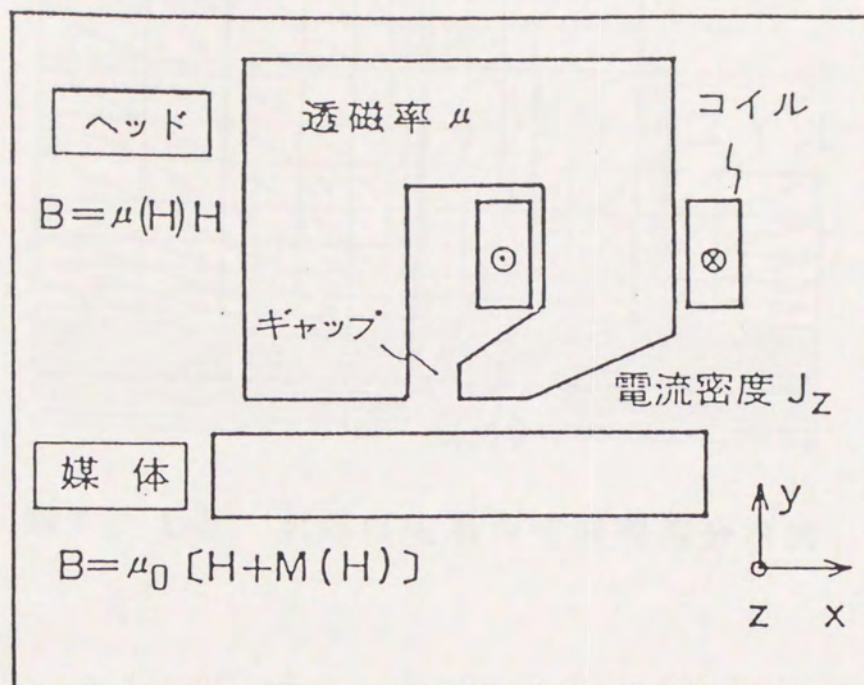
$$E = -N \cdot T_w \cdot V \cdot \Delta \Phi / \Delta x \quad (4-15)$$

$N$  : コイルの巻数       $T_w$  : トラック幅 (m)

$V$  : ヘッドと媒体の相対速度 (m/s)

$\Phi$  : 磁束 (Wb)





数値計算法：有限要素法

$J_z$ ：電流密度       $\mu$ ：透磁率  
 $B$ ：磁束密度       $M$ ：磁化の強さ

図4. 14 2次元記録再生過程シミュレータ



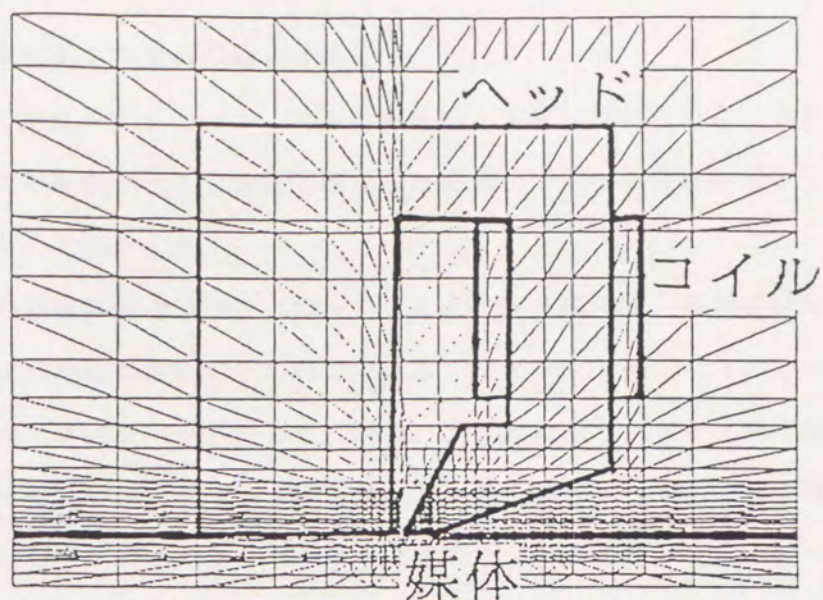


図 4. 1 5 記録再生系の有限要素分割図

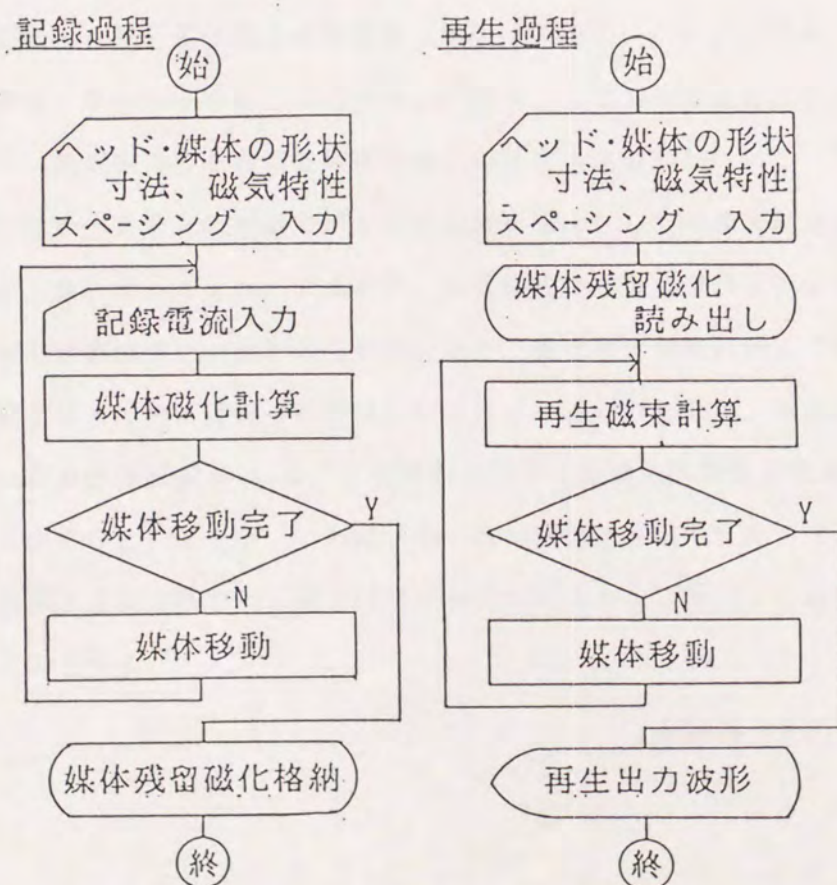


図 4. 1 6 記録再生過程シミュレーションの概略フロー



#### 4-3-3 記録再生特性の実測との比較

前節で述べた記録再生シミュレータの計算結果と実測結果の比較を、過去に製品化されて実績のある大型磁気ディスク装置で使用した磁気ヘッドと記録媒体からなる記録再生系を具体的例題として検討した。

磁気ヘッドと記録媒体の諸元を、表4.2と表4.3に示す。記録媒体は、4-2節で検討した $\gamma$ 酸化鉄塗布媒体と同一の媒体である。磁気ヘッドは、Mn-Znフェライト材料からなるリング型磁気ヘッドである。図4.17の磁気ヘッドと記録媒体の概略図に示すように、この装置で用いたリング型磁気ヘッドは、磁気ヘッドの記録効率を上げるために、ヘッド側面のコア幅をギャップ近傍では $400\mu\text{m}$ から $31\mu\text{m}$ に絞り込んでいる。この3次元的效果を考慮するために、磁気ヘッドのトラック幅（媒体対向面におけるヘッドのコア幅） $31\mu\text{m}$ を基準として、最大比透磁率 $\mu_{\text{max}}$ と飽和磁束密度 $B_s$ を、ヘッド側面のコア幅に比例して補正する手法を採用した<sup>4-12</sup>。また、磁気ヘッドと記録媒体間のスペーシングは、記録再生特性に大きく影響するため高精度な測定が要求される。本研究では、ガラスディスク上に記録再生実験で用いた磁気ヘッドを浮上させ、光学干渉縞を観察することにより求めた。図4.18に、このようにして求めた磁気ヘッドと媒体間のスペーシングと磁気ヘッドと媒体間の相対速度との関係を示す。この結果より、記録再生実験を行なった周速 $40\text{m/s}$ では、スペーシングは $0.42\mu\text{m}$ であることが分かる。

図4.19は、再生出力の記録周波数特性および孤立再生波形について、実測と計算を比較した結果である。対象とした磁気ディスク装置の製品としての最大記録周波数は、 $8\text{MHz}$ （ビット長 $=2.5\mu\text{m}$ ）であるが、低周波数から $12\text{MHz}$ の記録周波数まで、再生出力の実測と計算は良い一致がみられた。また、孤立再生波形に関しても、波形の裾の部分が若干異なるものの、実測と計算は、ほぼ良い一致が得られた。ただし、この計算では、ヘッドの最大比透磁率 $\mu_{\text{max}}$ は、低周波数での再生振幅の計算値を実測値に一致させるために、 $1000$ としている。これは、第2章の図2.4に示した、MnZnフェライトの複素透磁率の周波数依存性の測定結果を参考にすると、 $6\text{MHz}$ における複素透磁率の実部の値に相当する。

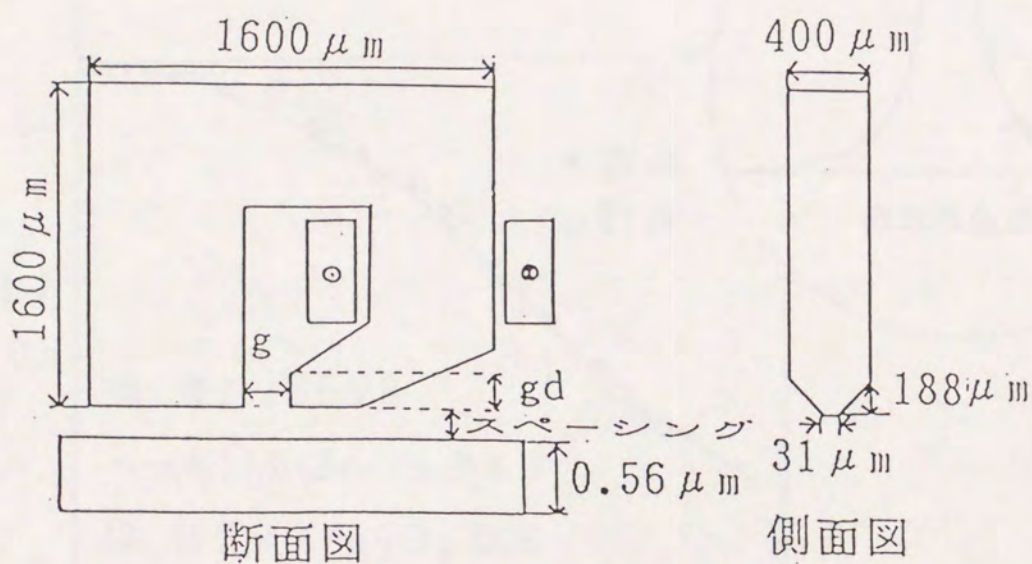


表 4. 2 磁気ヘッドの諸元

| 材質   | ギャップ長<br>( $\mu\text{m}$ ) | ギャップ深さ<br>( $\mu\text{m}$ ) | 巻 数<br>(turns) | Bs<br>(T) |
|------|----------------------------|-----------------------------|----------------|-----------|
| MnZn | 1.0                        | 15                          | 8+8            | 0.55      |

表 4. 3 記録媒体の諸元

| 材 料                           | 飽和磁化<br>Ms<br>(kA/m) | 保磁力<br>Hc( $10^3/4\pi$ A/m) |      | 角形比<br>Sq |      | 保磁力角形比<br>S* |      | 膜厚<br>$\delta$ ( $\mu\text{m}$ ) |
|-------------------------------|----------------------|-----------------------------|------|-----------|------|--------------|------|----------------------------------|
|                               |                      | 円周方向                        | 半径方向 | 円周方向      | 半径方向 | 円周方向         | 半径方向 |                                  |
| $\gamma\text{Fe}_2\text{O}_3$ | 90                   | 350                         | 200  | 0.83      | 0.39 | 0.69         | 0.17 | 0.56                             |



$g = 1.0 \mu\text{m}$   $gd = 15 \mu\text{m}$  巻数=8T+8T

図 4. 1 7 磁気ヘッドと記録媒体の概略図



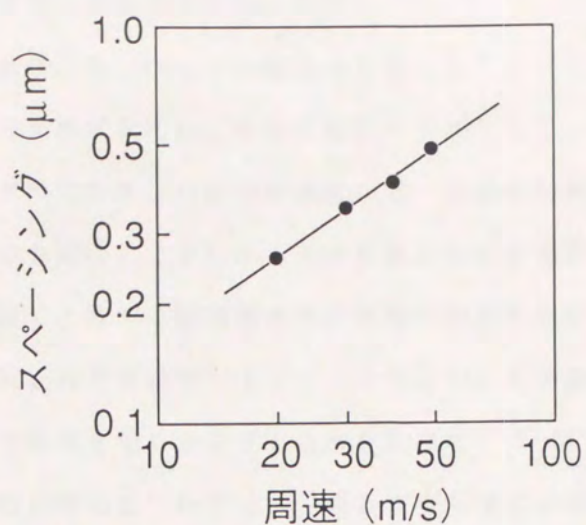
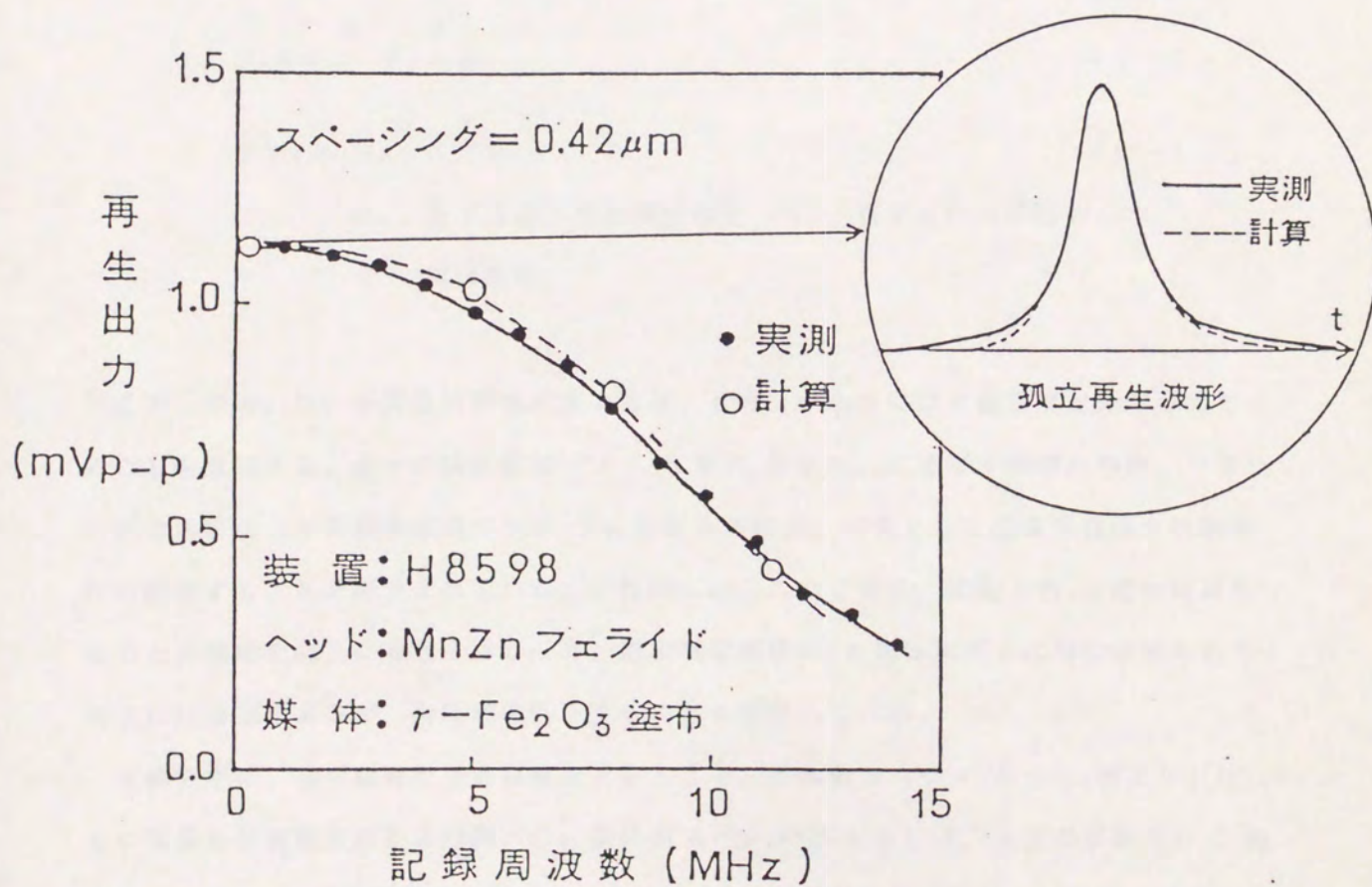


図4. 18 スレーシングの周速依存性



数値計算法: 2次元有限要素法

図4. 19 記録再生特性の実測と計算の比較



#### 4-4 媒体磁気特性と記録再生特性の関係

これまでの検討結果より、ヘッドの磁化モデルとして、(4-14)式の磁束密度Bと磁界強度Hに関する実験式を用い、媒体の磁化モデルとして、非可逆磁化過程には扁長回転楕円体カーリングモデルを、可逆磁化過程には一斉回転型磁化モデルを用い、さらに、これらの磁化モデルを図4.14に示した2次元記録再生過程シミュレータに組み込むことにより、実測と良く一致する記録再生の計算機実験が可能であることが明らかとなった。そこで、この2次元記録再生過程シミュレータにより、長手記録用塗布媒体の媒体磁気特性と記録再生特性の関係を明らかにすることを試みた<sup>(4-6) (4-13)</sup>。ところで、媒体磁気特性と記録再生特性の関係については、これまでも多くの報告がなされている。例えば、記録再生実験に基づく実験式として、低密度の再生出力 $E_L$ および再生波形(孤立再生波形)の半値幅 $PW_{50}$ と媒体磁気特性との間には、次式に示す関係が成り立つことが知られている<sup>(4-14) - (4-17)</sup>。

$$E_L \propto M_r \cdot H_c \cdot \delta \quad (4-16)$$

$$PW_{50} \propto M_r \cdot \delta / H_c \quad (4-17)$$

$M_r$ : 長手方向の飽和残留磁化  $H_c$ : 長手方向の保磁力

$\delta$ : 媒体膜厚

ここで、 $PW_{50}$ は、分解能の評価尺度であり、 $PW_{50}$ が小さいほど高密度記録が可能であることを意味する。各々の媒体磁気パラメータが $E_L$ と $PW_{50}$ に及ぼす影響の程度、つまりこの2式において各媒体磁気パラメータにかかる係数は、対象とした媒体の種類や実験条件に依存することが報告されている。定性的には、この2式は、保磁力 $H_c$ の増加は再生出力と分解能の向上に有効である一方、飽和残留磁化 $M_r$ と媒体膜厚 $\delta$ の増加は再生出力向上には有効であるが、分解能は低下することを意味している。

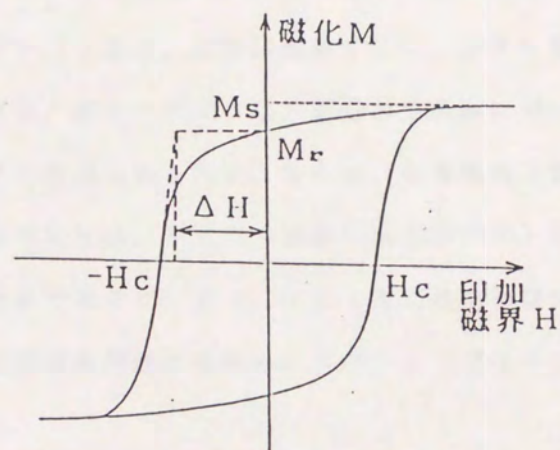
本研究では、長手記録用塗布媒体を対象として、媒体磁気パラメータと $E_L$ および $PW_{50}$ との関係を計算機実験により調べた。媒体磁気パラメータとしては、上記の保磁力 $H_c$ 、飽和残留磁化 $M_r$ 、媒体膜厚 $\delta$ に加えて、保磁力角形比 $S^*$ が記録再生特性に及ぼす影響についても検討した。保磁力角形比 $S^*$ の定義は次式で表される。



$$S^* = \Delta H / H_c$$

(4-18)

$\Delta H$ は、図4. 20に示すように、磁界軸の保磁力の位置での磁化曲線の接線と、磁化曲線の飽和残留磁化 $M_r$ の点から磁界軸に平行にひいた直線との交点の磁界強度である。従って、 $S^*$ が大きいということは、磁化曲線の保磁力近傍の傾きが急峻であることを意味している。塗布媒体の場合、 $S^*$ が大きいということは、媒体内に存在する磁性粉の磁気特性が均一で、磁化反転を起こす磁界強度のばらつきが少ないことを意味する<sup>(4-18)</sup>。



$$S^* = \Delta H / H_c$$

図4. 20 保磁力角形比の定義



#### 4-4-1 記録再生特性の実測と計算との比較

塗布媒体の媒体磁気特性と記録再生特性の関係を求める計算機実験の前に、まず、基準となる磁気ヘッドと塗布媒体で記録再生実験と計算機実験を行ない、計算機実験が記録再生特性の実験結果を精度良く再現することの確認を行なった。

基準とした、磁気ヘッドと塗布媒体の諸元を表4.4と表4.5に示す。磁気ヘッドは、現在磁気ディスク装置で主流となっている薄膜磁気ヘッドを用いた。図4.21に、この薄膜作製プロセスによって作られる薄膜ヘッドの外観を示す。磁性体は、上部磁性層と下部磁性層から構成される。対象としたヘッドでは、磁性層の材料はパーマロイである。上部磁性層と下部磁性層の間には、絶縁層を介してコイルが配置されている。諸元に示したポール長は、上部磁性層と下部磁性層の媒体対向面における膜厚の和で定義される。ポール長が厚いほどヘッド磁界強度は向上する一方、再生分解能は劣化する<sup>4-12)</sup>。ポール長、トラック幅およびギャップ長は、光学顕微鏡でこのヘッドを媒体対向面から観察することにより測長した。また、ギャップ深さは、記録再生実験に用いた薄膜ヘッド素子と同一ウェハー内の近傍素子の断面切断を行い、SEM（走査型電子顕微鏡）により測長した。さらに、塗布媒体の磁気特性は、VSM（振動試料型磁力計）により測定した。表4.5の磁性粉材料は $\gamma$ 酸化鉄であるが、表4.1の $\gamma$ 酸化鉄塗布媒体よりも高保磁力の磁性粉材料を用いている。記録再生特性の実験は、スペーシング $d = 0.2 \mu\text{m}$ 、周速 $v = 17 \text{ m/s}$ で行なった。

前節では、媒体磁化モデルとして、非可逆磁化過程に扁長回転楕円体カーリングモデルを、可逆磁化過程に一齐回転型磁化モデルを用いると、塗布媒体の磁気特性を精度良く復元できることを示した。しかし、ここでは、非可逆磁化過程の臨界磁界として、図4.7(b)に示した扁長回転楕円体カーリングモデルによる臨界磁界の替わりに、図4.22に示すように一部を直線近似した簡略化モデルを用いた<sup>4-20)</sup>。さらに、図4.22の容易軸方向の臨界磁界 $H_n$ および異方性磁界 $H_k$ の分布は、ガウス分布を仮定した。実測の磁化曲線への復元は、これらのガウス分布の標準偏差と平均値を調整することにより行なった。図4.23は、この手法により、表4.5に諸元を示した媒体の磁化曲線の復元を試みた結果である。この計算例では、容易軸方向の臨界磁界 $H_n$ の平均値を $430 \times 10^3 / 4\pi \text{ (A/m)}$ 、標準偏差を $90 \times 10^3 / 4\pi \text{ (A/m)}$ とし、異方性磁界 $H_k$ の平均値を $930 \times 10^3 / 4\pi \text{ (A/m)}$ 、標準偏差を $200 \times 10^3 / 4\pi \text{ (A/m)}$ とした。



図4. 10に示した扁長回転楕円体カーリングモデルを用いた磁化曲線の実測との対応結果に比べ、この簡略化モデルによる計算結果は、半径方向の磁化曲線の実測との不一致が目立つ。しかし、この簡略化モデルによる記録再生特性の計算結果を実測と比較してみると、図4. 24に示す低密度（記録周波数 $=0.5\text{ MHz}$ 、記録波長 $\lambda=34\text{ }\mu\text{m}$ ）の孤立再生波形、および、図4. 25に示す再生出力の記録周波数特性ともに、計算は概ね実測に一致した。なお、ヘッド磁性材料の最大比透磁率 $\mu_{\text{max}}$ は、低密度の再生出力が実測と一致するように選び、800とした。



表 4. 4 薄膜磁気ヘッドの諸元

| ポール長<br>( $\mu\text{m}$ ) | ギャップ長<br>( $\mu\text{m}$ ) | ギャップ深さ<br>( $\mu\text{m}$ ) | トラック幅<br>( $\mu\text{m}$ ) | 飽和磁束密度<br>(T) |
|---------------------------|----------------------------|-----------------------------|----------------------------|---------------|
| 3.4                       | 0.4                        | 0.8                         | 17                         | 0.98          |

表 4. 5 塗布媒体の諸元(長手方向)

| 材料                            | 飽和磁化<br>$M_s(\text{k A/m})$ | 保磁力<br>$H_c(10^3/4\pi \text{ A/m})$ | 角形比<br>$S_q$ | 保磁力角形比<br>$S^*$ | 膜厚<br>$\delta(\mu\text{m})$ |
|-------------------------------|-----------------------------|-------------------------------------|--------------|-----------------|-----------------------------|
| $\gamma\text{Fe}_2\text{O}_3$ | 90                          | 433                                 | 0.87         | 0.71            | 0.47                        |

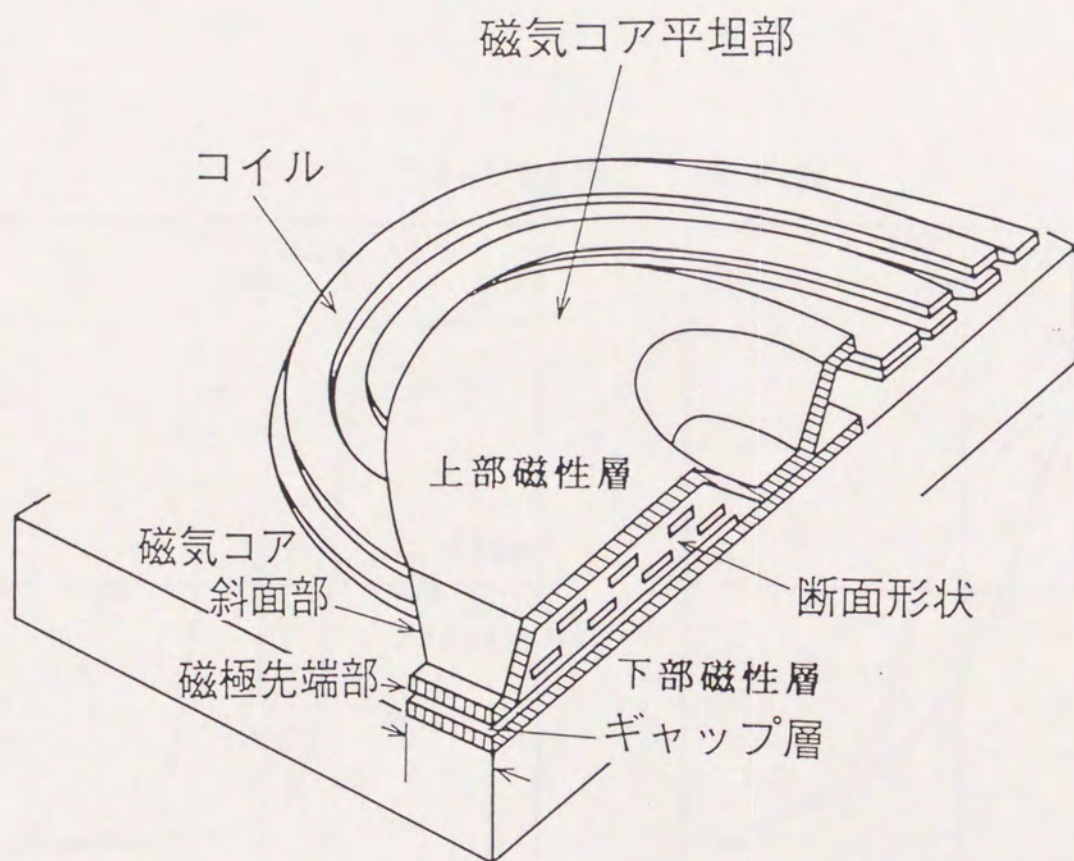


図 4. 21 薄膜磁気ヘッドの外観



図4. 23 媒体磁化曲線の実測と計算の比較

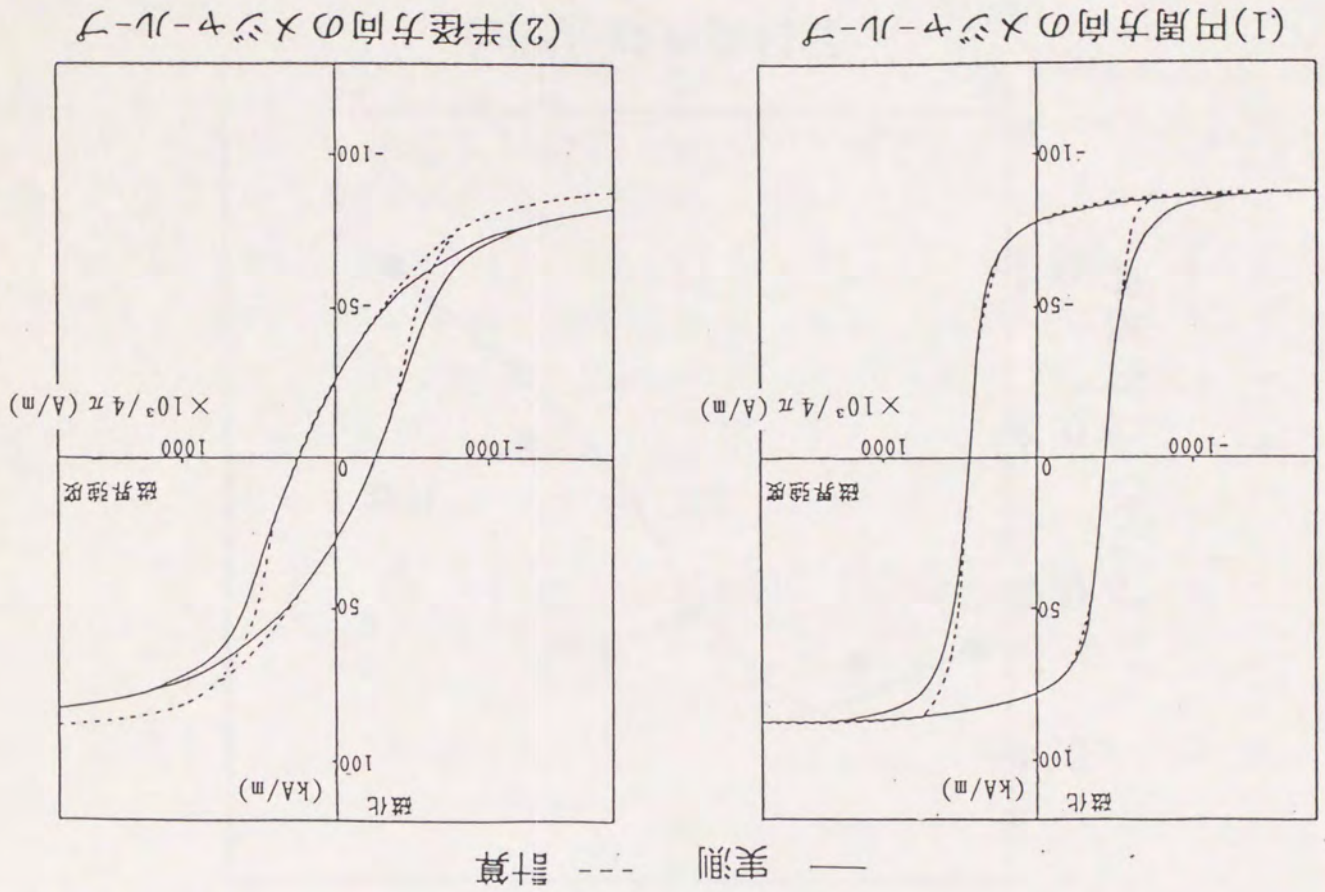
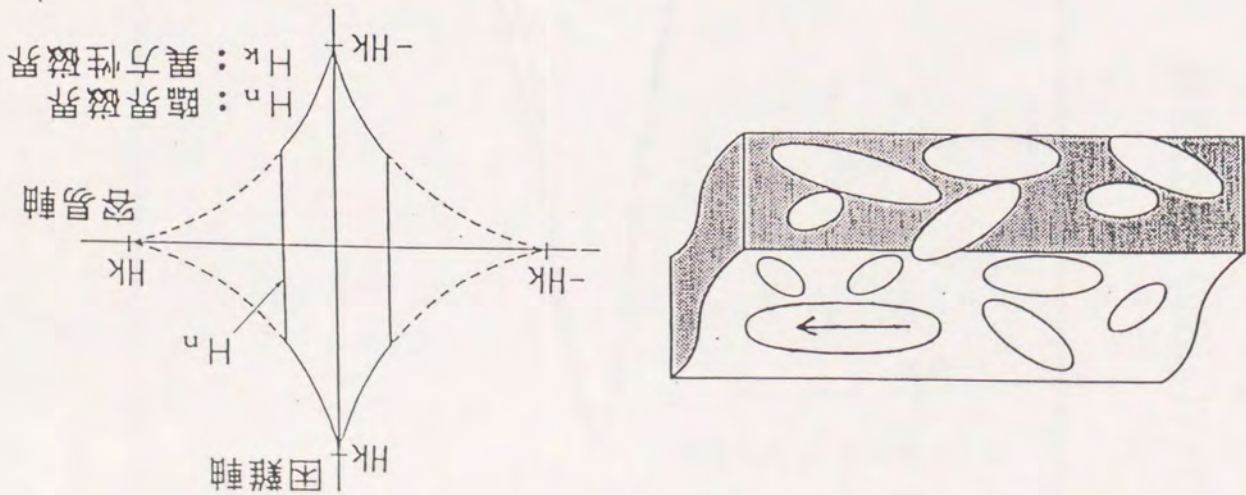


図4. 22 修正Stoner-Wohlfarth磁化反転モデル





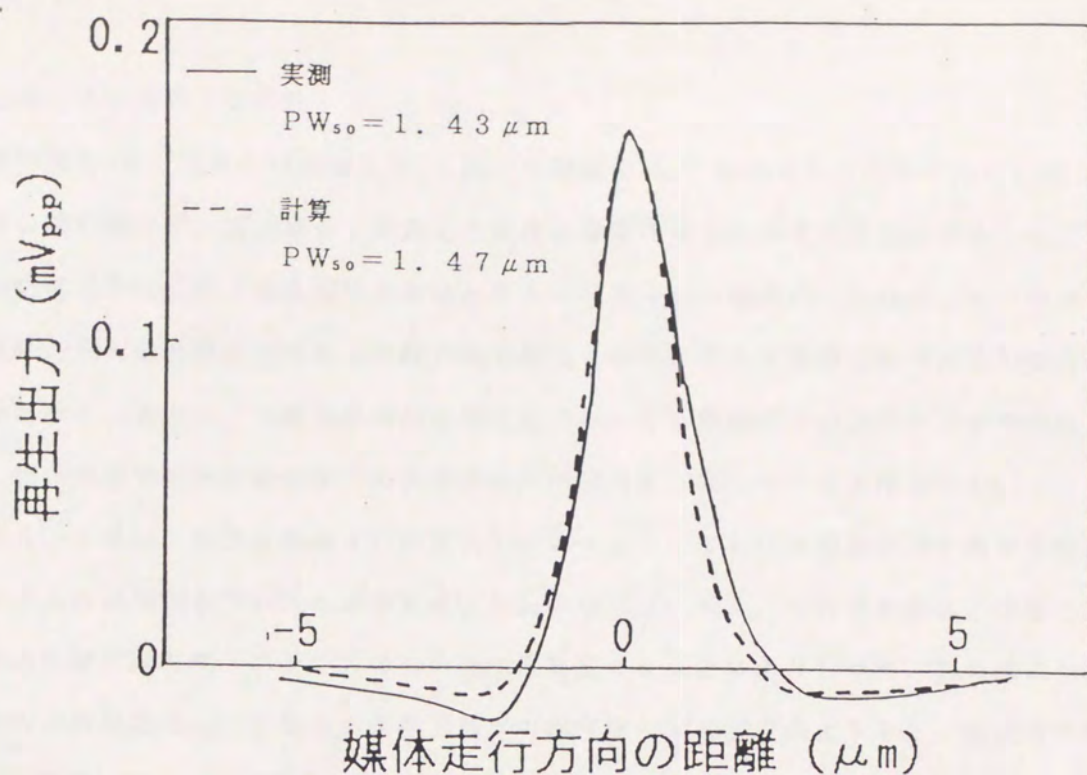


図 4. 2 4 孤立再生波形の実測と計算の比較

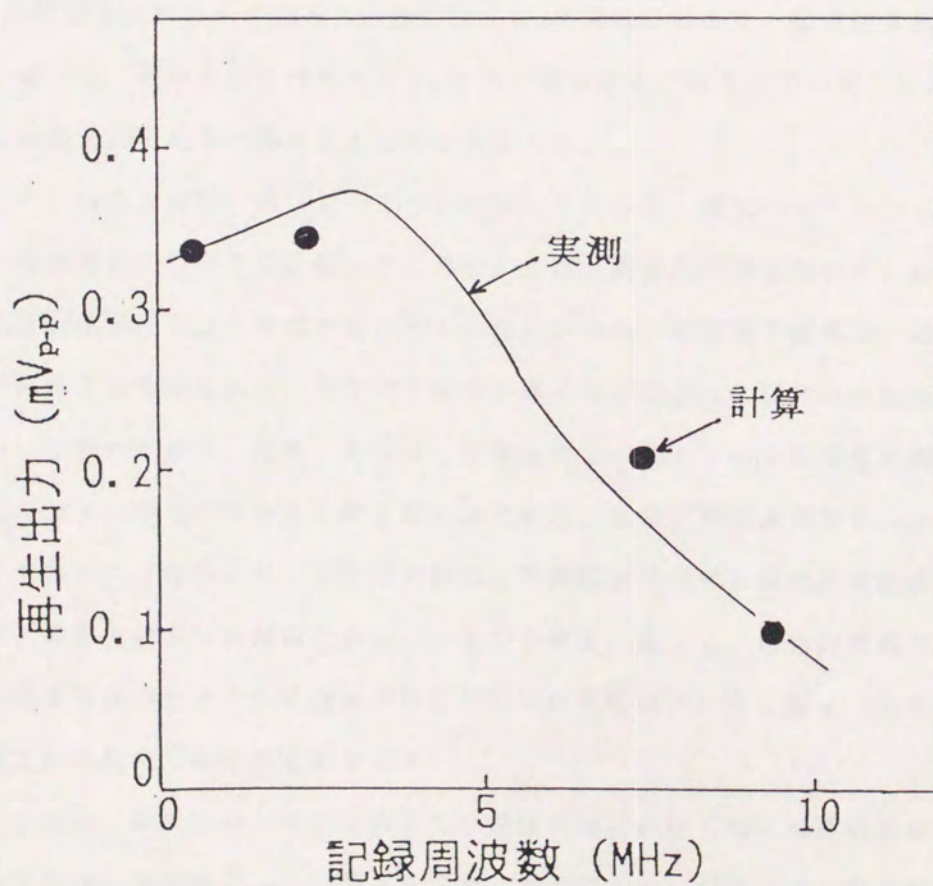


図 4. 2 5 再生出力の記録周波数特性の実測と計算の比較



#### 4-4-2 角形比依存性

角形比  $S_q$  は、媒体の飽和磁化  $M_s$  と飽和残留磁化  $M_r$  との比として定義される。従って、媒体の飽和磁化が一定の場合、角形比の変化は飽和残留磁化の変化を意味する。ところで、針状磁性粒子は長軸方向を磁化容易軸とする一軸異方性の磁性粒子であり、その単体の角形比は、磁化容易軸方向である長軸方向で最大となり、磁化困難軸方向である短軸方向で最小となる。従って、 $\gamma$  酸化鉄の針状磁性粒子からなる塗布媒体の長手方向の角形比  $S_{qx}$  は、塗布媒体中の針状磁性粒子の長手方向への配向度を向上させると増加する。

図 4. 26 は、低密度記録（記録波長  $\lambda = 3.4 \mu m$ ）における再生出力と長手方向の角形比  $S_{qx}$  との関係を求めたものである。 $S_{qx}$  の増減は、表 4. 5 の塗布媒体を基準として、媒体内の針状磁性粒子の長手方向への配向度を変えることにより行った。この図より、長手方向の角形比  $S_{qx}$ 、すなわち長手方向への磁性粉の配向度が向上すると、低密度の再生出力が改善されることが分かる。ただし、角形比  $S_{qx}$  が 0.85 を越える領域では、再生出力の改善効果は減少する。

図 4. 27 は、低密度の再生波形の半値幅（孤立波半値幅） $PW_{50}$  と長手方向の角形比  $S_{qx}$  との関係を求めたものである。角形比  $S_{qx}$  の増加とともに、孤立波半値幅  $PW_{50}$  は広がる。従って、長手方向の角形比  $S_{qx}$  を向上させると、再生出力の向上には効果がある反面、分解能の劣化の一因となることが分かった。

ところで、再生出力は、式 (4-15) に示したように、磁気ヘッドのコイルに鎖交する磁束の時間変化に依存する。従って、再生出力は、媒体内の残留磁化が大きいほど、また、磁化反転幅が狭いほど増加すると考えられる。一方、孤立波半値幅は、磁化反転幅と比例関係にあると考えられる。そこで、長手方向の角形比  $S_{qx}$  と媒体内の記録磁化状態の関係について調べてみた。図 4. 28 は、記録波長  $\lambda = 3.4 \mu m$  の低密度記録における媒体内磁化状態を、磁化ベクトルで表したものである。長手方向の角形比  $S_{qx}$  は、0.87 である。この図より、再生出力振幅と半値幅を決定する磁化反転近傍における残留磁化は、垂直方向成分を無視できないことが分かる。従って、媒体内の残留磁化状態の解析は、長手方向成分とともに垂直方向成分についても検討した。図 4. 29 に、長手方向と垂直方向の磁化反転幅の定義を示す。

図 4. 30 は、再生出力への寄与の大きい媒体表面における最大残留磁化および磁化反転幅と長手方向の角形比  $S_{qx}$  との関係を求めたものである。長手方向の最大残留磁化は、



$S_{qx}$ の増加に比例して増加するが、長手方向の磁化反転幅は若干減少する。従って、長手方向の残留磁化状態のみに着目すると、再生出力振幅は長手方向の角形比にはほぼ比例して増加し、孤立波半値幅は長手方向の角形比の向上により若干ながら狭くなることが予想され、計算機実験の結果を説明できない。一方、残留磁化の垂直方向成分を調べてみると、最大残留磁化は、 $S_{qx}$ の増加にほぼ比例して減少するが、磁化反転幅は、 $S_{qx}$ が

0.85以上になると急激に増加する。従って、 $S_{qx}$ が0.85を越える領域での再生出力の改善効果の減少には、垂直方向の磁化反転幅の拡大が影響していると推定できる。同様に、孤立波半値幅が $S_{qx}$ の増加とともに拡大すること、垂直方向の磁化反転幅と長手方向の角形比との関係を考慮することにより説明できる。

このように、長手方向の角形比 $S_{qx}$ を0.85以上にしても、再生出力の改善効果は小さく、かつ分解能は劣化することから記録再生特性上のメリットがないことが分かった。その理由として、隣合う磁化の長手成分の増加に伴う反磁界の増加により、垂直方向の磁化反転幅が急激に拡大するためであることが明らかとなった。



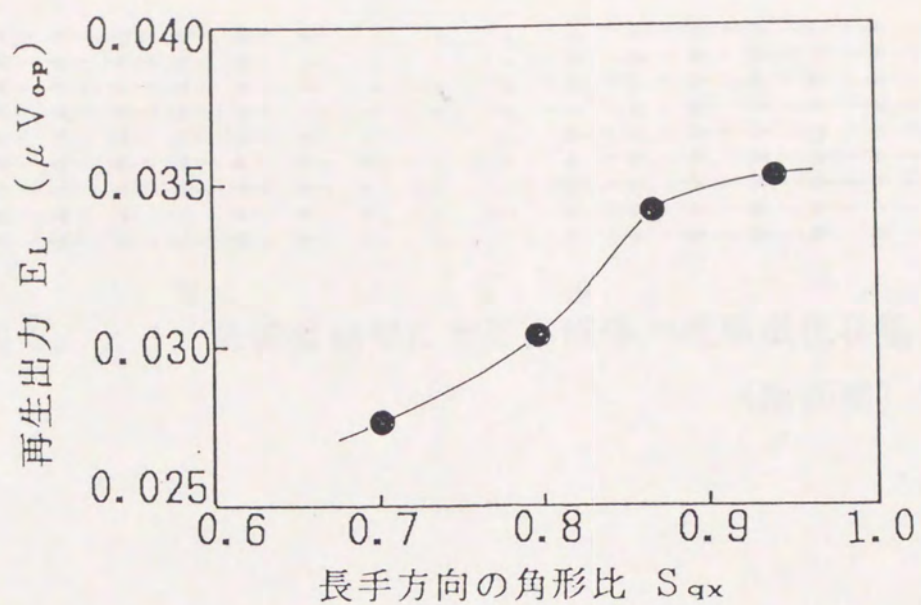


図4. 2 6 低密度再生出力の角形比依存性 (記録波長 = 3.4  $\mu m$ )

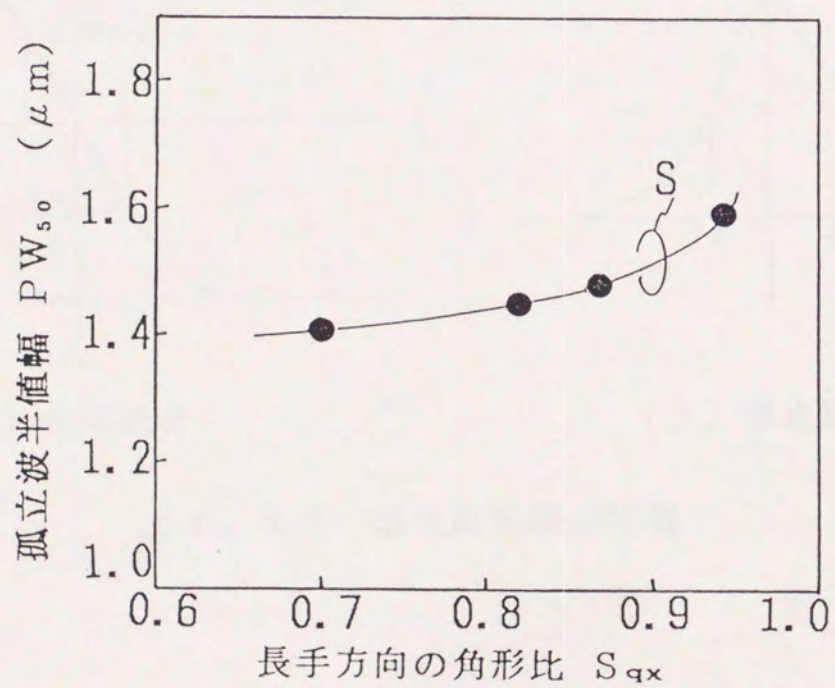


図4. 2 7 孤立波半値幅の角形比依存性



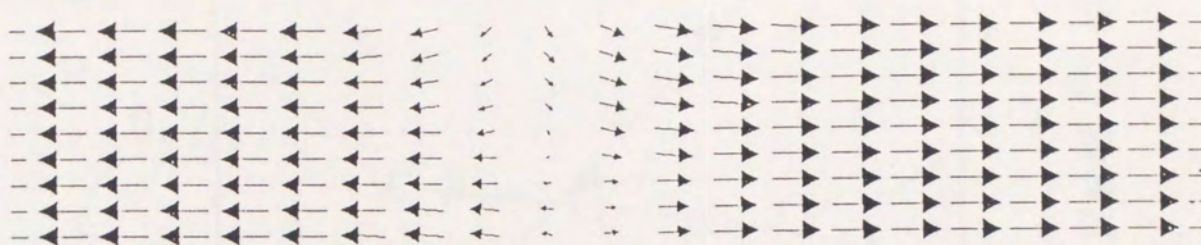
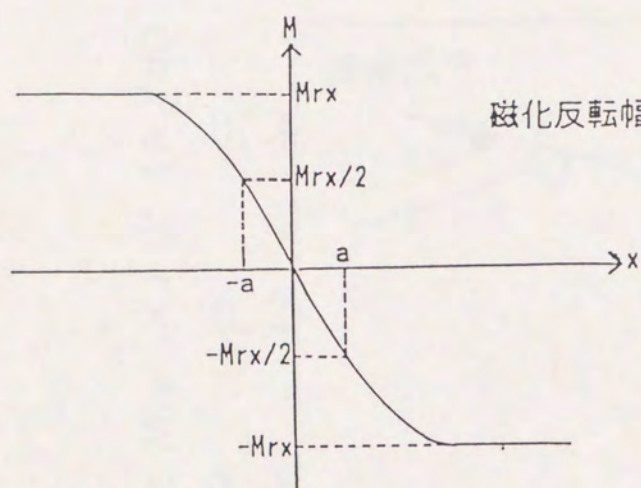
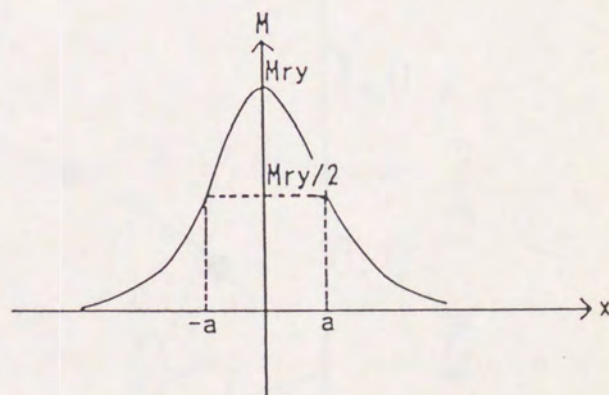


図4. 28 低密度記録における媒体内残留磁化状態  
(断面図)



(a) 長手成分



(b) 垂直成分

図4. 29 磁化反転幅の定義



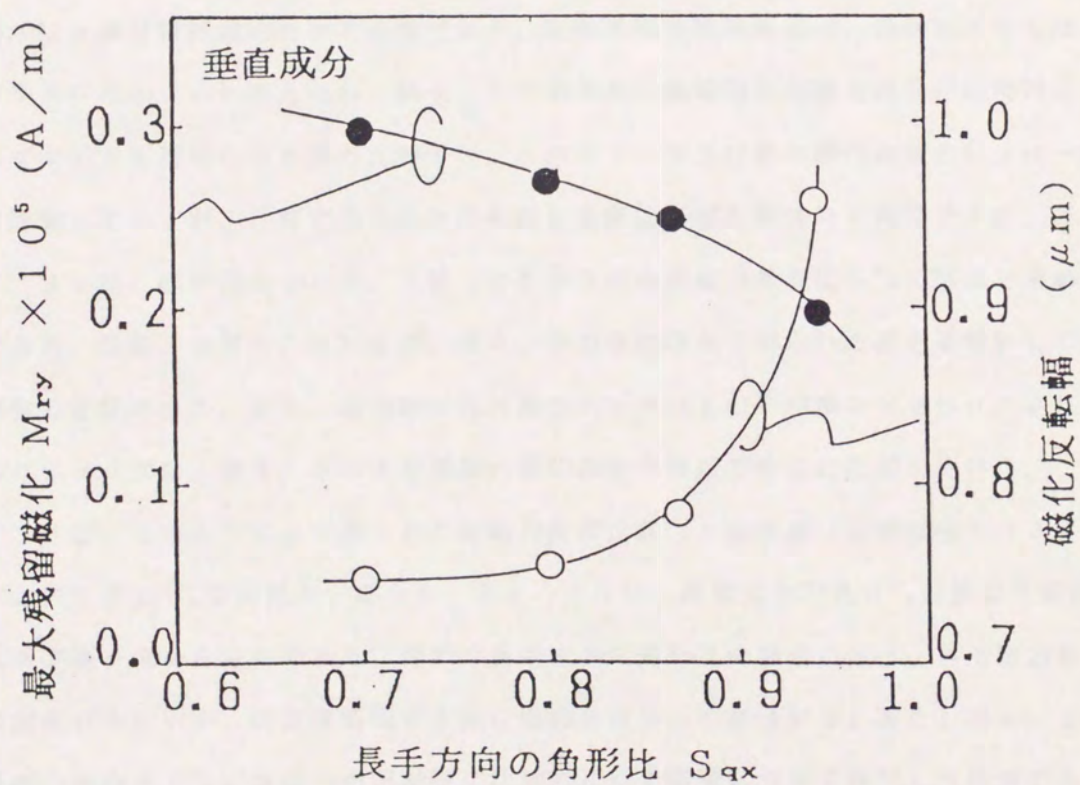
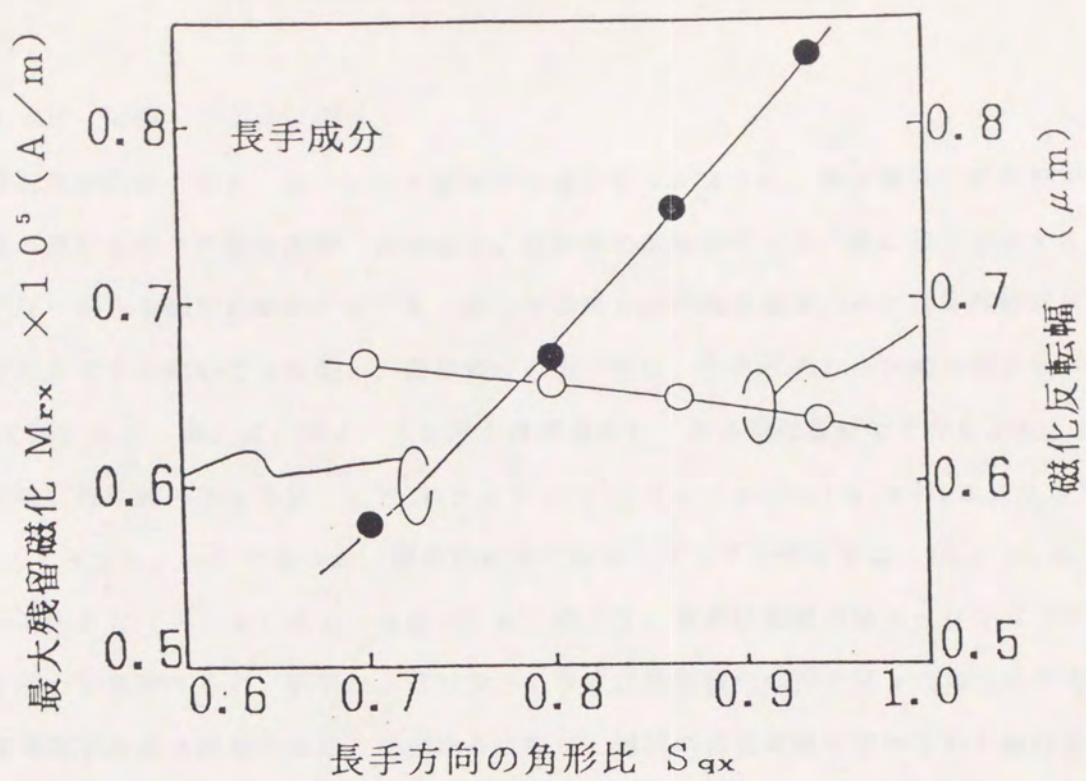


図4. 30 最大残留磁化と磁化反転幅の角形比依存性



#### 4-4-3 保磁力角形比依存性

保磁力角形比は、図4.20に示す定義の説明で述べたように、塗布媒体中に存在する磁性粉の長手方向への配向度が一定の場合、磁性粉の磁気特性の均一性に強く依存する。本節で用いている磁化反転モデルでは、磁化容易軸方向の臨界磁界 $H_n$ と異方性磁界 $H_k$ をガウス分布で近似しているため、磁気特性の均一性は、これらの分布の標準偏差 $\sigma H_n$ 、 $\sigma H_k$ で表される。例えば、表4.5に示す標準媒体に、この磁化反転モデルを適用した場合には、既に述べたように、 $\sigma H_n$ は $90 \times 10^3 / 4\pi$  (A/m)、 $\sigma H_k$ は $200 \times 10^3 / 4\pi$  (A/m)であった。扁長回転楕円体カーリングモデルでは、 $H_n$ と $H_k$ は、(4-4)式と(4-5)式より求められる。従って、扁長回転楕円体カーリングモデルに立ち戻って考察すると、針状比、Sパラメータ及び飽和磁化の強さ $M_s$ の均一性がこれらの標準偏差の値を決定することが分かる。特に、現状の塗布媒体で用いている磁性粉の針状比は、図4.3の例に示した様に、針状粉の長軸のバラツキが大きいため、磁気特性の均一性を制約する主要因と考えられる。Sパラメータは、短軸半径と材料組成、飽和磁化の強さ $M_s$ は材料組成に依存する量である。短軸半径と材料組成は、針状比よりもはるかにバラツキは小さいと考えられ、図4.10の実測の飽和磁化曲線と扁長回転楕円体カーリングモデルを適用した計算の比較でも、Sパラメータ及び飽和磁化の強さ $M_s$ は一定として計算しているが、計算で得られる飽和磁化曲線は実測を精度良く再現できた。

図4.31は、標準偏差 $\sigma H_n$ 、 $\sigma H_k$ と長手方向の保磁力角形比 $S^*_x$ の関係を求めたものである。なお、 $\sigma H_n$ 、 $\sigma H_k$ は、表4.5の塗布媒体で得られた値を基準として、同じ割合で変化させた。また、磁性粉の配向度や $H_n$ と $H_k$ の平均値など $\sigma H_n$ 、 $\sigma H_k$ 以外のパラメータは、表4.5の塗布媒体の磁化曲線の検討で得られた値を用いた。

図4.32は、このようにして得られた保磁力角形比 $S^*_x$ と低密度(記録波長 $\lambda = 34 \mu\text{m}$ )の再生出力 $E_L$ の関係を、さらに、図4.33は、保磁力角形比 $S^*_x$ と孤立半値幅 $PW_{50}$ の関係を求めたものである。前節の長手方向の角形比の場合に比べ、再生出力 $E_L$ の改善効果は小さいが、孤立半値幅が大幅に短縮されることが分かる。また、図4.34は、保磁力角形比 $S^*_x$ が媒体内の記録磁化状態に及ぼす影響について検討した結果である。この結果は、保磁力角形比 $S^*_x$ の向上により、長手方向および垂直方向の磁化反転幅が、大幅に短縮されることを示している。

以上の結果を整理すると、針状磁性粉からなる塗布媒体では、針状比のバラツキを抑え



て長手方向の保磁力角形比  $S^*_x$  を向上させることにより、長手方向および垂直方向の磁化反転幅が大幅に短縮され、特に孤立半値幅  $PW_{50}$  の短縮に効果的であることが分かった。従って、長手方向の保磁力角形比  $S^*_x$  は、高密度化を達成するための重要な磁気パラメータといえる。



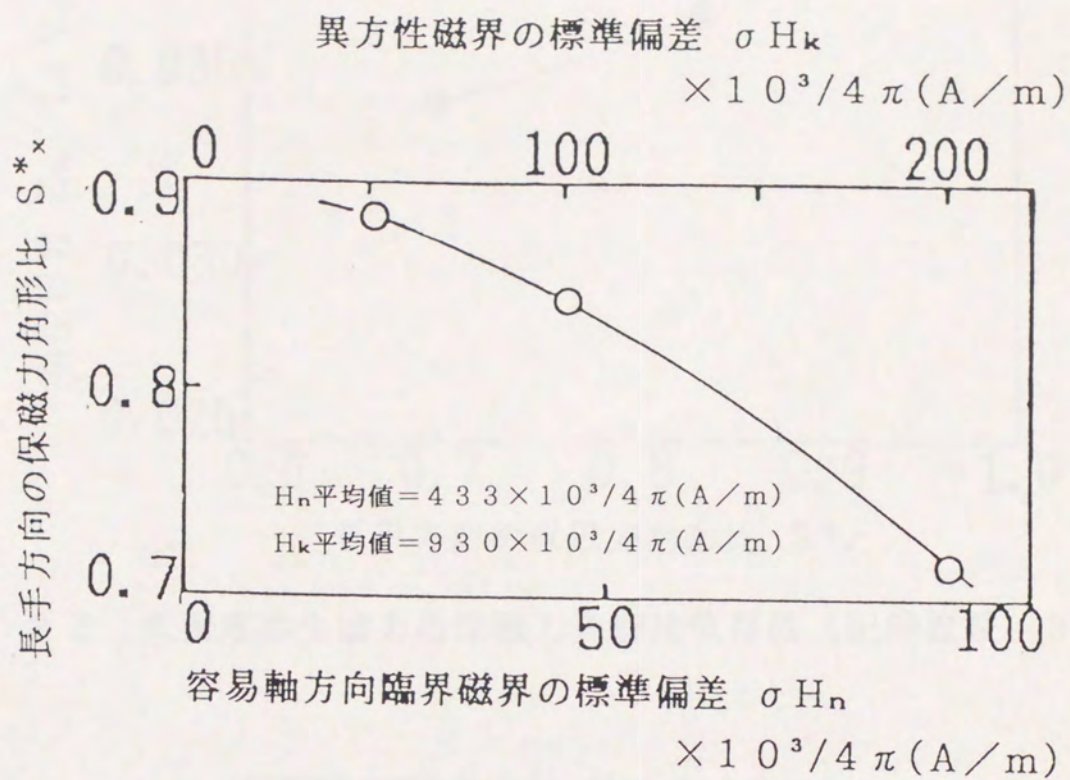


図4. 3 1 長手方向の保磁力角形比と磁性粉磁気特性の  
均一性との関係



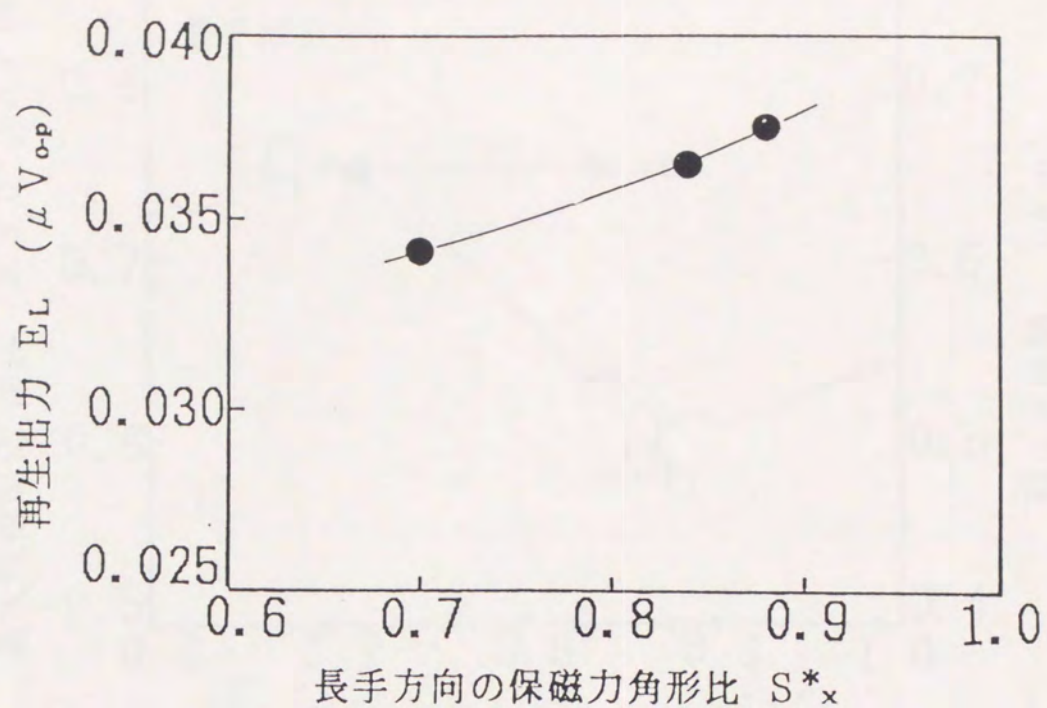


図4. 3 2 低密度再生出力の保磁力角形比依存性 (記録波長 =  $3.4 \mu m$ )

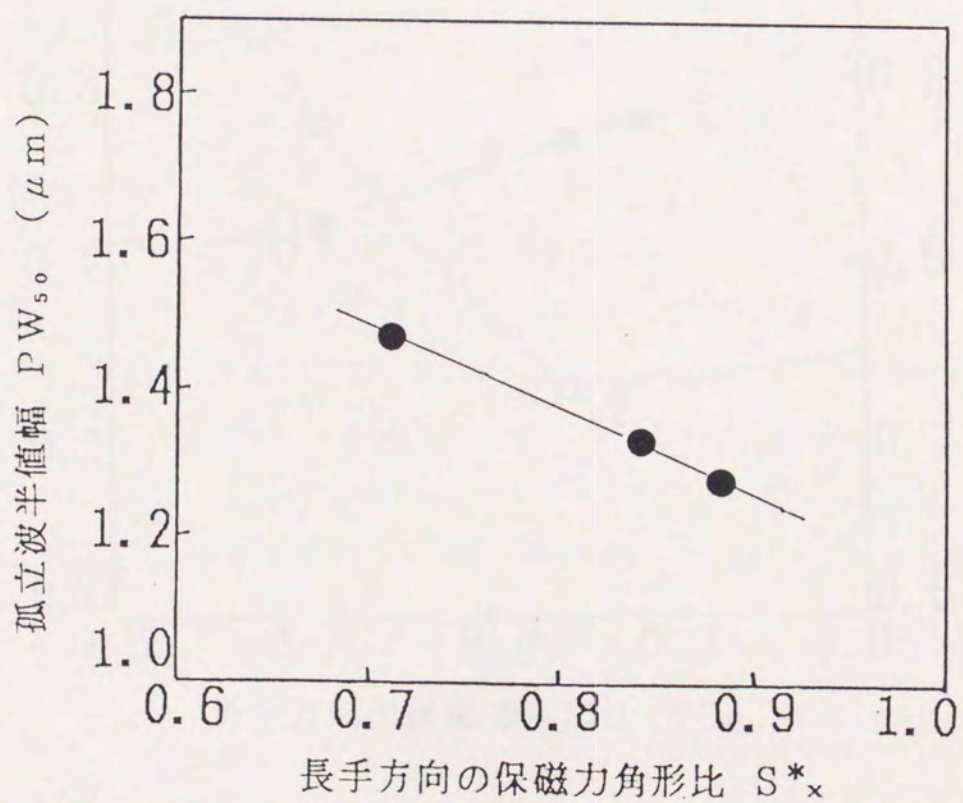


図4. 3 3 孤立波半値幅の保磁力角形比依存性



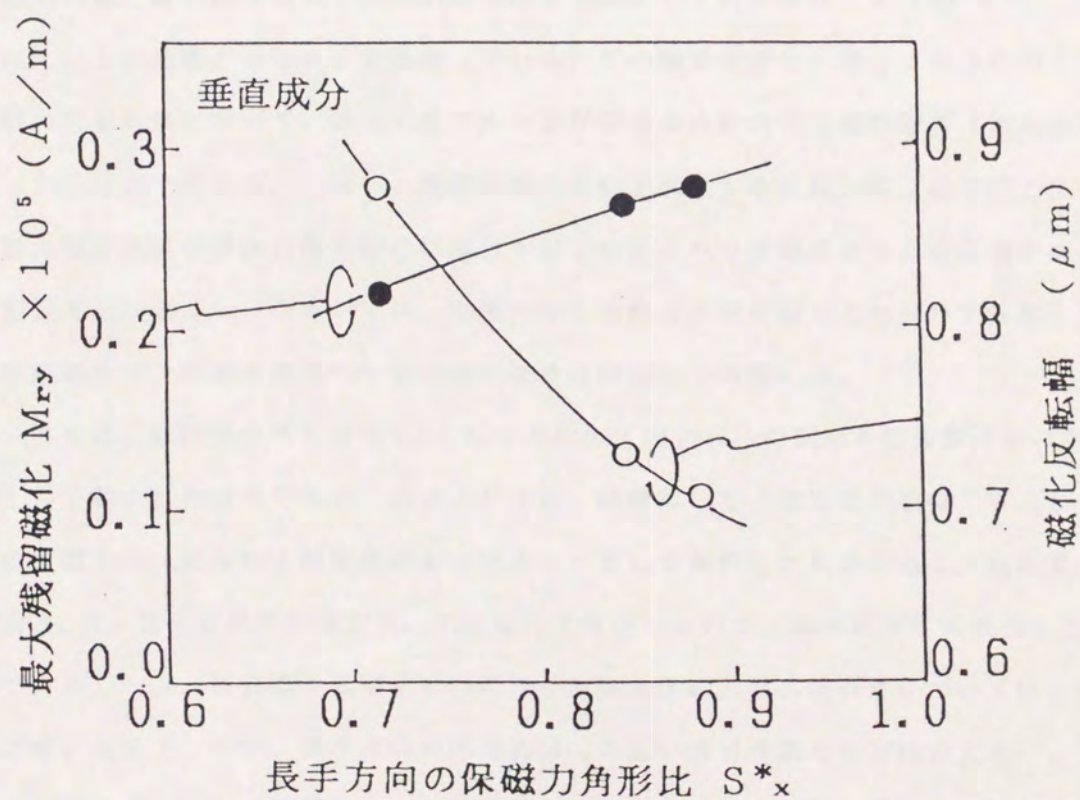
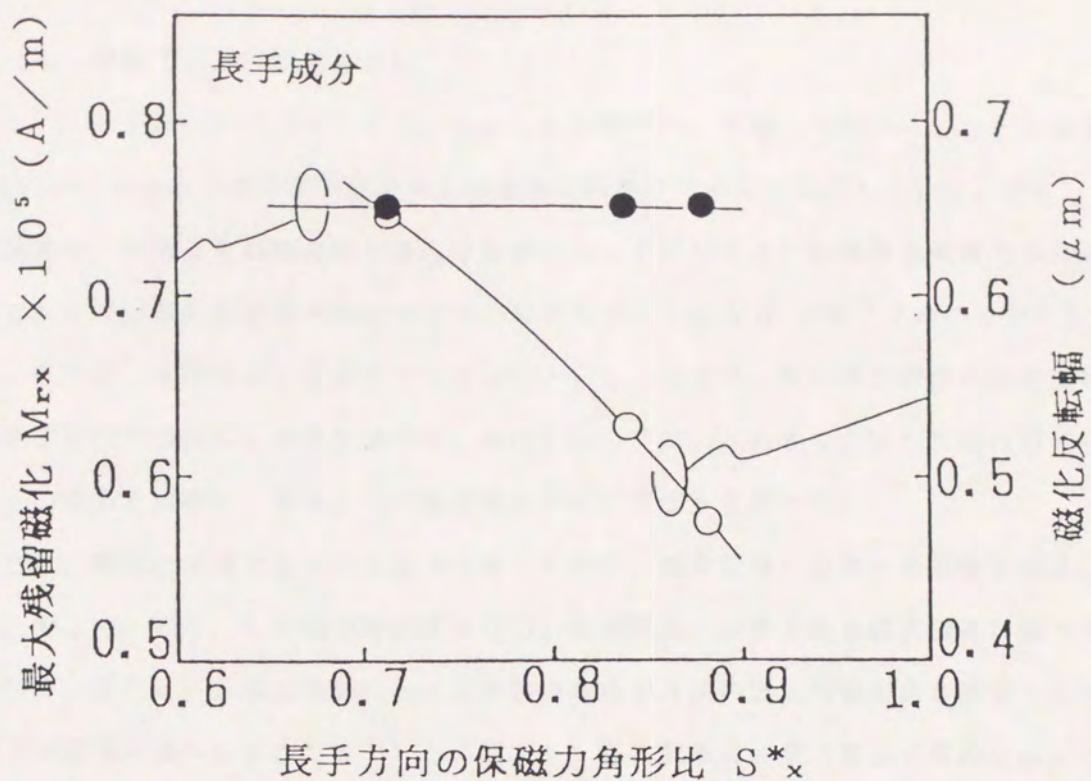


図4. 34 最大残留磁化と磁化反転幅の保磁力角形比依存性



#### 4-4-4 保磁力および膜厚依存性

式(4-16)および式(4-17)で示した実験式は、保磁力の増加により、低密度の再生出力 $E_L$ の向上と孤立半値幅 $PW_{50}$ の短縮が期待できることを示している。また、上記実験式は、高密度化の観点から孤立半値幅 $PW_{50}$ を短縮するには媒体記録層の薄膜化が有効であるが、媒体記録層を薄膜化すると低密度の再生出力 $E_L$ が低下することを示している。そこで、本節では、記録再生シミュレーションにより、記録再生特性の保磁力および膜厚依存性を検討した結果を述べる。検討に際しては、これまでに述べた他の磁気パラメータの場合と同様に、表4.5の塗布媒体の磁気特性を基準とした。

ところで、媒体の保磁力あるいは膜厚を変えた場合、飽和記録に必要な記録磁界強度は変わる。そこで、表4.5の塗布媒体の条件で、飽和記録に必要な記録磁界強度を調べてみた。図4.35は、低密度記録における媒体内の長手方向の最大残留磁化と磁気ヘッドの起磁力の関係を調べたものである。この図より、媒体記録層の最下層まで飽和記録を行うには、 $0.18 \text{ AT}$ の起磁力が必要であることが分かる。これは、飽和記録を行うには、媒体記録層の最下層における長手方向の最大磁界強度として約 $800 \times 10^3 / 4\pi$

( $\text{A/m}$ )以上が必要であることを意味している。この磁界強度は、図4.23に示した磁化曲線の計算結果において、磁化曲線のループが閉じる点における磁界強度(飽和磁界強度 $H_s$ )にほぼ一致する。つまり、飽和記録の条件を満足するには、媒体最下層の長手方向の最大磁界強度が媒体の飽和磁界強度 $H_s$ 以上となるヘッド磁界を与える必要がある。以下の記録再生シミュレーションでは、磁気ヘッドの飽和効果を取り入れないで計算を行い、飽和記録を行うための磁気ヘッドの磁界強度は起磁力で調整した。

図4.36は、低密度の再生出力 $E_L$ と長手方向の保磁力 $H_{cx}$ の関係を媒体膜厚をパラメータとして解析した結果である。図4.37は、同様にして、孤立波半値幅 $PW_{50}$ と長手方向の保磁力 $H_{cx}$ の関係を媒体膜厚をパラメータとして解析した結果である。低密度の再生出力 $E_L$ は、長手方向の保磁力 $H_{cx}$ にほとんど依存しないが、媒体膜厚には比例して増加している。一方、孤立波半値幅 $PW_{50}$ の長手方向の保磁力 $H_{cx}$ 依存性については、媒体膜厚が厚い領域で、かつ、長手方向の保磁力 $H_{cx}$ の低い領域が最も依存性が大きい。この傾向は、第2章のリング型磁気ヘッドの記録磁界の解析において、長手方向の記録磁界勾配は、磁気ヘッドとの距離および長手方向の保磁力 $H_{cx}$ に強く依存すること

(図2.16、図2.22)から説明できる



以上の検討結果を整理すると、表4. 5の塗布媒体の磁気特性を基準とした場合、式(4-16)および式(4-17)に相当する記録再生シミュレーションによる計算機実験式として次式が求まる<sup>(4-13)</sup>。

$$E_L \propto M_r^{1.1} \cdot H_c^{0.0} \cdot \delta^{0.70} \cdot S^{*0.40} \quad (4-18)$$

$$PW_{50} \propto M_r^{0.35} \cdot H_c^{-0.10} \cdot \delta^{0.30} \cdot S^{*-0.65} \quad (4-19)$$

$M_r$ 依存性については、角形比依存性の計算結果から換算して求めた。ただし、図4. 26および図4. 27における、角形比が0.9以上の計算結果は反磁界の影響を強く受けているため、 $M_r$ 依存性の解析の対象外とした。

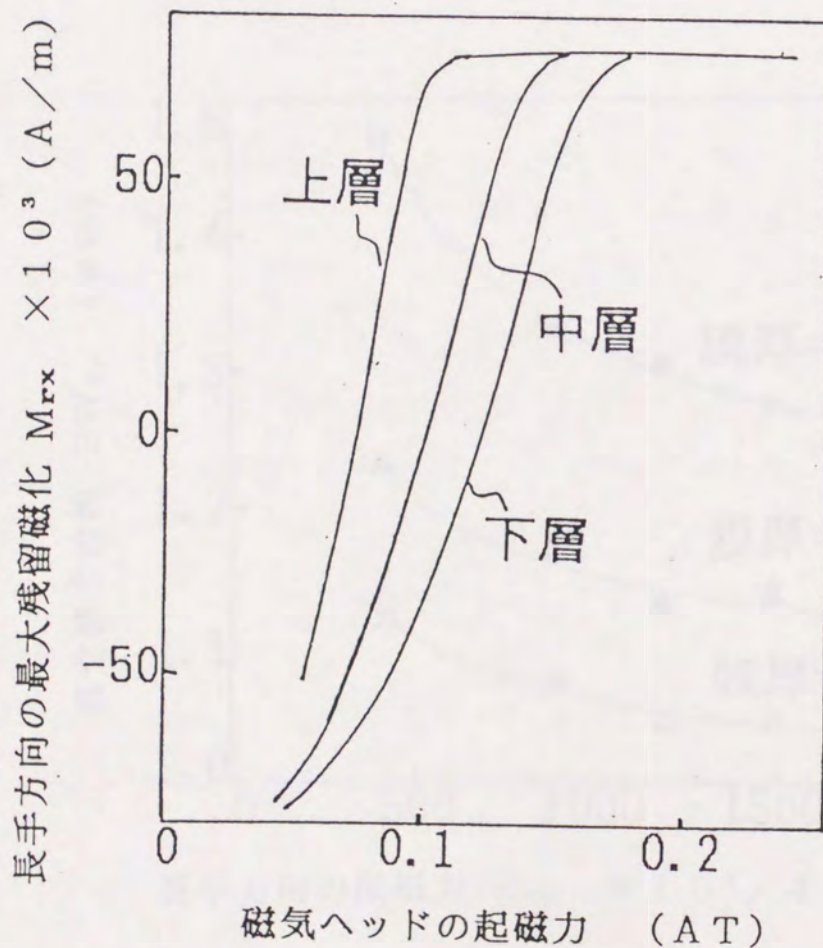
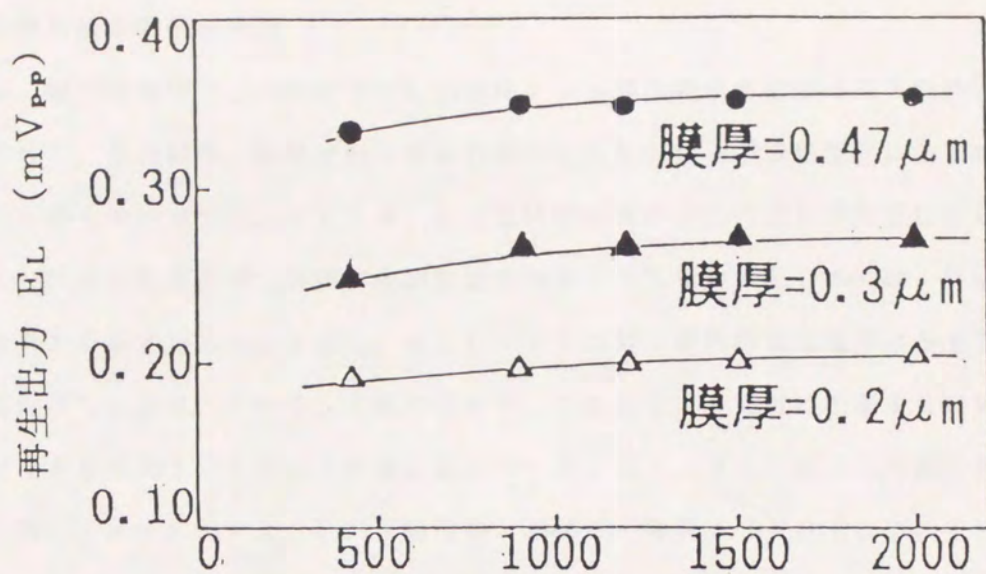


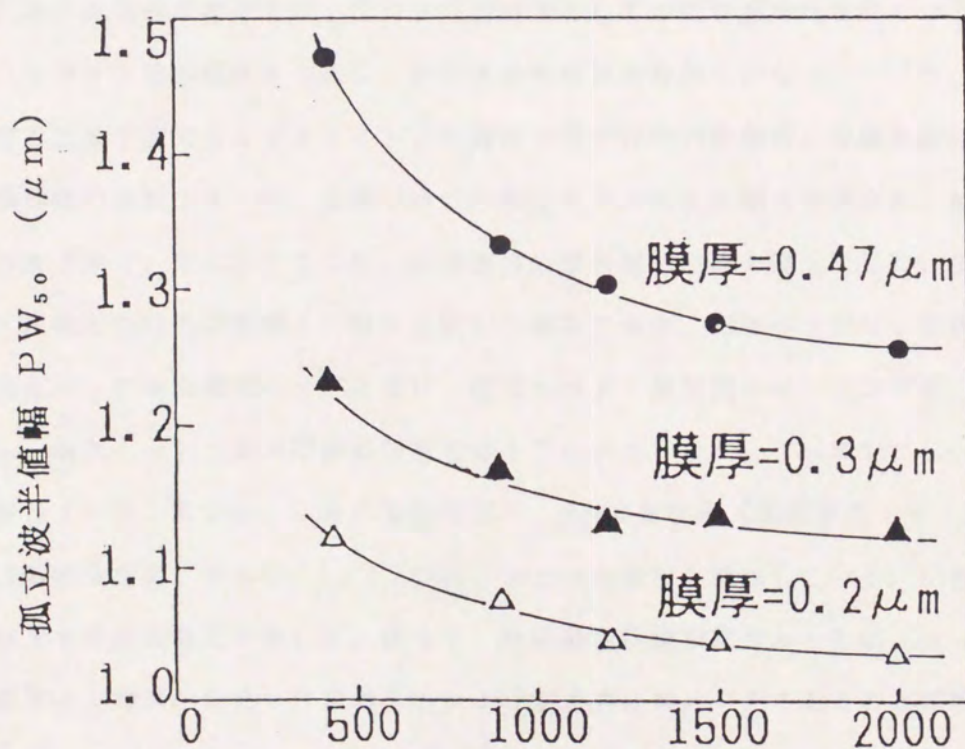
図4. 35 媒体内最大残留磁化の起磁力依存性（長手成分）





長手方向の保磁力  $H_{cx} \times 10^3 / 4\pi$  ( $\text{A/m}$ )

図4. 3 6 低密度再生出力の保磁力依存性



長手方向の保磁力  $H_{cx} \times 10^3 / 4\pi$  ( $\text{A/m}$ )

図4. 3 7 孤立波半値幅の保磁力依存性



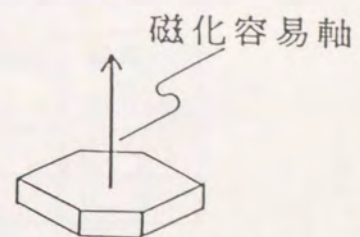
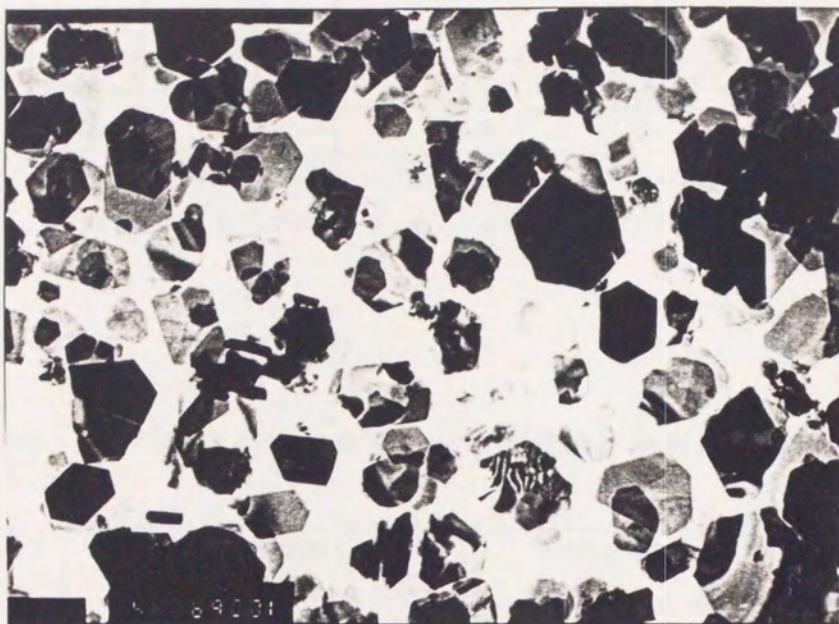
#### 4-5 高密度塗布媒体の検討

前節では、媒体磁気特性と記録再生特性の関係を、 $\gamma$ 酸化鉄塗布媒体の磁気特性を基準として検討した。その結果、長手方向の保磁力角形比  $S^*_x$  の向上が高密度化に非常に有効であることが明らかとなった。ところで、針状磁性粉の場合、その磁氣的性質は形状磁気異方性により決定されるため、長手方向の保磁力角形比  $S^*_x$  を向上させるには、針状比のバラツキを抑える必要がある。しかし、現在レベルでは針状磁性粉塗布媒体の長手方向の保磁力角形比  $S^*_x$  は、0.7~0.8程度であり、これを0.9程度に改善するには針状比のバラツキを現状の1/4にする必要がある。一方、図4.38に示す六角板状のBaフェライト粉は、図中に示すように針状磁性粉と同様に一軸異方性を有するが、その磁氣的性質は結晶磁気異方性により決定される。従って、磁気特性の均一性は針状磁性粉よりも勝っていると考えられる。事実、長手配向したBaフェライト塗布媒体は、針状磁性粉塗布媒体よりも、はるかに高い長手方向の保磁力角形比  $S^*_x$  を有することが報告されている<sup>〔4-19〕</sup>。従って、前節で導いた計算機実験式(4-18)、(4-19)より明らかなように優れた高密度特性が期待でき、フロッピ用媒体としては既に実用化されている。そこで、Baフェライト塗布媒体を中心に、高密度塗布媒体の検討を行なった<sup>〔4-18〕</sup>。

まず、試作した長手配向Baフェライト塗布媒体の長手方向の飽和磁化曲線を測定し、次に、この飽和磁化曲線の4-4-1節で述べた磁化モデルによる復元を試みた。結果は図4.39および表4.6に示すように、ほぼ実測の飽和磁化曲線を復元できた。また、表4.7は、記録再生特性の実測と計算を比較した結果である。磁気ヘッドは、前節の表4.4に諸元を示した薄膜磁気ヘッドを用い、磁気ヘッド・媒体間スペーシングは0.15  $\mu\text{m}$ 、磁気ヘッド・媒体間の相対速度は17 m/sとした。この表で、 $E_L$ は低密度(記録波長 $\lambda = 5.6 \mu\text{m}$ )における再生出力、 $E_H$ は高密度(記録波長 $\lambda = 1.4 \mu\text{m}$ )における再生出力、 $R_e$ は $E_H$ と $E_L$ の比、つまり分解能を意味している。記録再生特性の計算結果もほぼ実測と一致した。従って、針状磁性粉塗布媒体とともに、Baフェライト塗布媒体の記録再生特性も計算機実験により定量的に検討可能であることが明らかとなった。

最初に、Baフェライト塗布媒体と既に大型磁気ディスク装置で採用されているCo被着 $\gamma$ 酸化鉄塗布媒体の記録再生特性の比較を行った。記録再生計算に用いた両媒体の長手方向の磁気特性を表4.8に示す。これらの磁気特性は、実際に試作した媒体の磁気特性





( 倍率  $\times 100,000$  )

図4. 38 バリウムフェライト粉の走査型電子顕微鏡写真

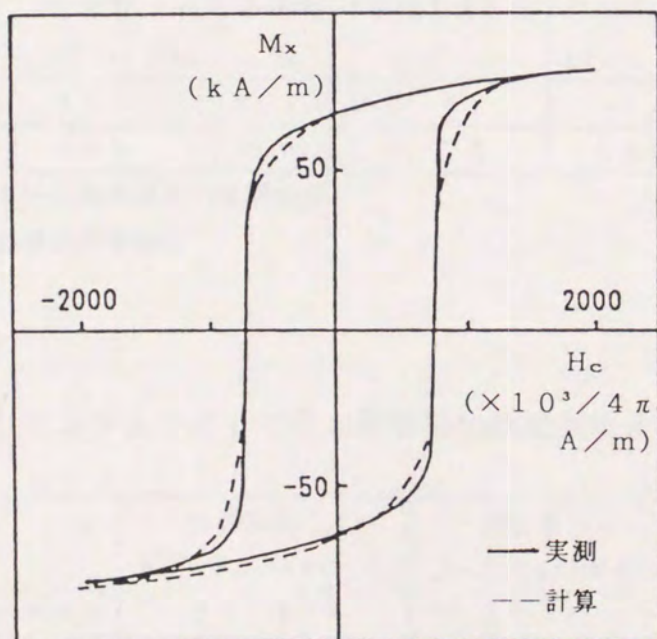


図4. 39 磁化曲線の実測と計算の比較 (長手方向)



表4. 6 バリウムフェライト塗布媒体の磁気特性の実測と計算の比較(長手方向)

|        | 飽和磁化<br>$M_s(\text{k A/m})$ | 保磁力<br>$H_c(10^3/4\pi \text{ A/m})$ | 角形比<br>$S_q$ | 保磁力角形比<br>$S^*$ | 膜厚<br>$\delta(\mu\text{m})$ |
|--------|-----------------------------|-------------------------------------|--------------|-----------------|-----------------------------|
| 実測     | 85                          | 725                                 | 0.78         | 0.97            | 0.31                        |
| 計算 (注) | 85                          | 758                                 | 0.80         | 0.92            | 0.31                        |

$$(注) H_n = 725 (10^3/4\pi \text{ A/m}) \quad H_k = 2070 (10^3/4\pi \text{ A/m})$$

$$\sigma H_n = 15 (10^3/4\pi \text{ A/m}) \quad \sigma H_k = 350 (10^3/4\pi \text{ A/m})$$

表4. 7 バリウムフェライト塗布媒体の記録再生特性の実測と計算の比較

|    | 低密度出力<br>$E_L(\text{nV}_{PP}/\mu\text{m}\cdot\text{T}\cdot\text{m/s})$ | 高密度出力<br>$E_L(\text{nV}_{PP}/\mu\text{m}\cdot\text{T}\cdot\text{m/s})$ | 分解能<br>$\text{Re}(\%)$ |
|----|------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|------------------------|
| 実測 | 64.2                                                                   | 36.0                                                                   | 56.1                   |
| 計算 | 59.7                                                                   | 33.9                                                                   | 56.6                   |

表4. 8 バリウムフェライトとCo被着酸化鉄塗布媒体の磁気特性(計算)

|           | 飽和磁化<br>$M_s(\text{kA/m})$ | 保磁力<br>$H_c(10^3/4\pi \text{ A/m})$ | 角形比<br>$S_q$ | 保磁力角形比<br>$S^*$ | $\sigma H_n$<br>$(10^3/4\pi \text{ A/m})$ | $\sigma H_k$<br>$(10^3/4\pi \text{ A/m})$ | 膜厚<br>$\delta(\mu\text{m})$ |
|-----------|----------------------------|-------------------------------------|--------------|-----------------|-------------------------------------------|-------------------------------------------|-----------------------------|
| バリウムフェライト | 110                        | 945                                 | 0.80         | 0.92            | 19                                        | 445                                       | 0.30                        |
| Co被着酸化鉄   | 110                        | 895                                 | 0.80         | 0.78            | 190                                       | 415                                       | 0.30                        |

(注)  $\sigma H_n$  : 容易軸方向の臨界磁界の標準偏差

$\sigma H_k$  : 異方性磁界の標準偏差

表4. 9 バリウムフェライトとCo被着酸化鉄塗布媒体の記録再生特性(計算)

|           | 低密度出力<br>$E_L(\text{nV}_{PP}/\mu\text{m}\cdot\text{T}\cdot\text{m/s})$ | 高密度出力<br>$E_L(\text{nV}_{PP}/\mu\text{m}\cdot\text{T}\cdot\text{m/s})$ | 分解能<br>$\text{Re}(\%)$ |
|-----------|------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|------------------------|
| バリウムフェライト | 85.9                                                                   | 49.0                                                                   | 57.0                   |
| Co被着酸化鉄   | 78.7                                                                   | 34.2                                                                   | 43.4                   |



を測定した結果に基づいて決定した。両媒体の磁気特性で大きく異なるのは、保磁力角形比  $S^*$  と磁化容易軸方向の臨界磁界の標準偏差  $\sigma H_n$  である。表 4. 9 に記録再生特性の計算結果を示す。磁気ヘッドなどの記録再生条件は、表 4. 7 の記録再生計算と同一の条件とした。この結果から、保磁力角形比  $S^*$  の差を反映して、Ba フェライト塗布媒体は Co 被着  $\gamma$  酸化鉄塗布媒体に比べ高密度特性が優れていることが分かる。

次に、Ba フェライト塗布媒体と鉄粉塗布媒体の記録再生特性の比較を行った。鉄粉は、高飽和磁化および高保磁力の針状磁性粉として、音声や画像記録用の磁気テープで既に実用化されている。記録再生計算に用いた両媒体の長手方向の磁気特性を表 4. 10 に示す。この表で、BAF-1 と BAF-2 は、Ba フェライト塗布媒体である。BAF-1 は、現状の Ba フェライト塗布媒体の磁気特性に基づいている。一方、BAF-2 は、異方性磁界  $H_k$  の標準偏差  $\sigma H_k$  を現状の  $1/10$  に改良した場合を仮定している。MP は、鉄粉塗布媒体の磁気特性である。角形比および保磁力角形比は、Co 被着  $\gamma$  酸化鉄塗布媒体と同一とした。また、媒体膜厚は、低記録密度における再生出力がほぼ一定となる膜厚とした。記録再生計算における磁気ヘッドなどの記録再生条件は、表 4. 7 の記録再生計算と同一の条件である。図 4. 40 は、高密度（記録波長  $\lambda = 1.4 \mu m$ ）における再生出力と磁化容易軸方向の臨界磁界の平均値  $H_n$  との関係求めたものである。また、図 4. 41 は、分解能と磁化容易軸方向の臨界磁界の平均値  $H_n$  との関係求めたものである。表 4. 10 は、 $H_n$  が  $900 \times 10^3 / 4\pi$  (A/m) の場合であり、これらの記録再生特性の  $H_n$  依存性を調べる場合は、 $H_n$  の変化と同じ割合で  $H_k$ 、 $\sigma H_n$ 、 $\sigma H_k$  を変化させた。なお、長手配向媒体の  $H_n$  は、ほぼ長手方向の保磁力と考えてよい。これらの図は、磁化容易軸方向の臨界磁界の平均値  $H_n$  が  $1500 \times 10^3 / 4\pi$  (A/m)、つまり長手方向の保磁力  $H_c$  が  $1500 \times 10^3 / 4\pi$  (A/m) 以下では、現状の Ba フェライト塗布媒体 (BAF-1) は、鉄粉塗布媒体 (MP) よりも高密度特性が優れていることを示している。さらに、Ba フェライト塗布媒体の  $\sigma H_k$  を現状の  $1/10$  に改良した場合 (BAF-2)、現状の Ba フェライト塗布媒体 (BAF-1) に比べ、特に再生出力が大きく改善されることが分かった。また、Ba フェライト塗布媒体は、高保磁力領域では、保磁力向上による記録再生特性の改善効果は鉄粉塗布媒体に比べ少ない。これは、鉄粉塗布媒体と同等の低密度再生出力を得るために、鉄粉塗布媒体に比べ記録膜厚が厚いことに起因していると考えられる。この点を改良するには、Ba フェライト粉の飽和磁化を



さらに向上させ、再生出力を低下させることなく媒体の薄膜化を図る必要がある。一方、鉄粉塗布媒体の場合の今後の改良方向としては、保磁力角形比  $S^*$  の向上、つまり磁性粉の形状寸法の均一化を図ることが記録再生特性の改善に有効であることは、これまでの検討結果より明らかである。

表4. 10 バリウムフェライトと鉄粉塗布媒体の磁気特性(計算)

|       | 飽和磁化<br>$M_s$ (kA/m) | 保磁力<br>$H_c$ ( $10^3/4\pi$ A/m) | 角形比<br>$S_q$ | 保磁力角形比<br>$S^*$ | $\sigma H_n$<br>( $10^3/4\pi$ A/m) | $\sigma H_k$<br>( $10^3/4\pi$ A/m) | 膜厚<br>$\delta$ ( $\mu$ m) |
|-------|----------------------|---------------------------------|--------------|-----------------|------------------------------------|------------------------------------|---------------------------|
| BAF-1 | 132                  | 945                             | 0.80         | 0.92            | 19                                 | 445                                | 0.25                      |
| BAF-2 | 132                  | 955                             | 0.80         | 0.95            | 19                                 | 45                                 | 0.25                      |
| MP    | 220                  | 895                             | 0.80         | 0.78            | 190                                | 415                                | 0.15                      |

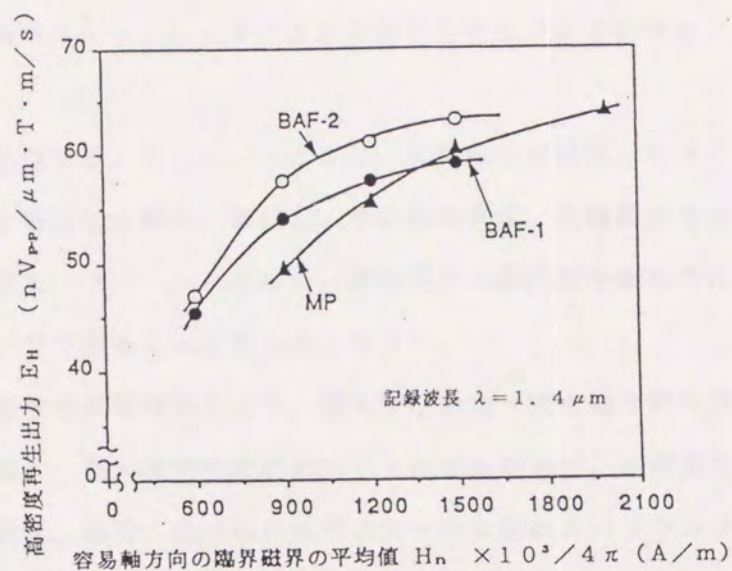


図4. 40 高密度再生出力と容易軸方向の臨界磁界との関係

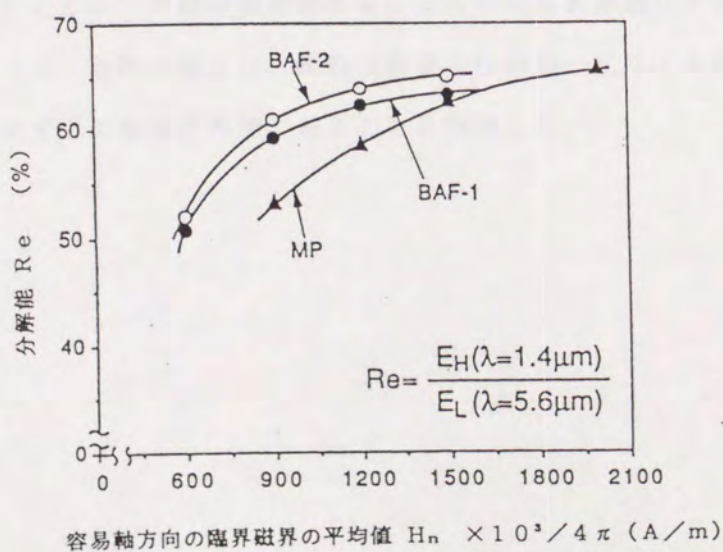


図4. 41 分解能と容易軸方向の臨界磁界との関係



#### 4-6 まとめ

リング型磁気ヘッドと塗布媒体からなる長手記録系について、記録再生特性の定量的検討が可能となる高精度な記録再生シミュレータの開発を行うとともに、この記録再生シミュレータにより、塗布媒体の高密度化の条件について検討し、以下の結論を得た。

- (1) 記録再生シミュレータに用いる塗布媒体の磁化モデルとして、従来の磁化曲線の実測結果に基づく現象論的磁化モデルではなく、塗布媒体を構成する磁性粒子の集合体として捉える磁化モデルの構築を試みた。その結果、磁性粒子単体の磁化反転モデルとして扁長回転楕円体カーリングモデルを用いることにより、実測を概ね再現する磁化曲線を得ることができた。さらに、この磁化モデルを組み込んだ記録再生シミュレータによる記録再生特性の計算結果は、実測結果によく一致した。
- (2) 上記記録再生シミュレータにより、塗布媒体の磁気パラメータと記録再生特性の関係を解析した結果、保磁力、飽和磁束密度、記録膜厚等の従来から着目されている磁気パラメータとともに、磁性粒子の配向性や磁気特性の均一性が重要なパラメータであることが明らかとなった。
- (3) 将来の塗布媒体材料として、磁気特性の均一性の観点からバリウムフェライト、高保磁力、飽和磁束密度の観点から鉄粉を取上げ、高密度特性を比較検討した。その結果、鉄粉に比べ磁気特性の均一性に優れたバリウムフェライトは、比較的低保磁力で鉄粉と同等の高密度特性が得られることが分かった。また、バリウムフェライト塗布媒体のより一層の高密度化を図るためには、磁気特性のさらなる均一化とともに、高飽和磁束密度化による記録膜の薄膜化が重要であることを示した。一方、鉄粉の場合は、鉄粉の形状寸法の均一化による磁気特性の均一性向上が高密度化の最重要課題であることを指摘した。



4-7 参考文献

- (4-1) S.Hasegawa, T.Kawasaki, J.Endo, A.Tonomura, Y.Honda, M.Futamoto,  
K.Yoshida, F.Kugiya, and M.Koizumi : J. Appl. Phys., Vol.65,  
p.2000 (1989)
- (4-2) A.Aharoni : J. Appl. Phys., Vol.30, Supplement, p.70 (1959)
- (4-3) A.Aharoni : IEEE Trans. Magn., Vol.MAG-22, No.5, p.478 (1986)
- (4-4) M.Tsutsumi, F.Kugiya, S.Hasegawa and A.Tonomura : IEEE Trans. Magn.,  
Vol.MAG-25, No.5, p.3665 (1989)
- (4-5) E.C.Stoner and E.P.Wohlfarth : Phil. Trans. Roy. Soc. (London),  
Vol. A240, p.599 (1948)
- (4-6) M.Tsutsumi, F.Kugiya, F.Akagi and I.Matsuyama : IEEE Trans. Magn.,  
Vol.MAG-26, No.5, p.2113 (1990)
- (4-7) 近角 : 強磁性体の物理 裳華房 (1984)
- (4-8) 岩崎、中村、鈴木 : 信学技報、MR67-15 (1967)
- (4-9) 釘屋、菅野、堤 : 信学技報、MR88-34 (1988)
- (4-10) 品川 共著 : 「磁気記録最新技術と装置・機器」 総合技術出版 p391 (1984)
- (4-11) 鈴木、岩崎 : 信学技報、MR73-4 (1973)
- (4-12) H.Aoki, M.Saito, T.Tamura, H.Tsuchiya and M.Hayashi : IEEE Trans. Magn.,  
Vol.MAG-18, No.6, p.1137 (1982)
- (4-13) 赤城、釘屋、堤 : 信学技報、MR92-6 (1992)
- (4-14) 西川 : 「磁気記録の理論」 朝倉書店 p.158 (1985)
- (4-15) D.E.Speliotis, J.R.Morrison and J.S.Judge : IEEE Trans. Magn.,  
Vol.MAG-2, p.208 (1966)
- (4-16) M.Nishikawa : IEEE Trans. Magn., Vol.MAG-4, p.286 (1968)
- (4-17) 安田、岩崎 : 信学技報、MR70-5 (1970)
- (4-18) M.Tsutsumi, F.Kugiya and F.Akagi : J. Appl. Phys., Vol.69(8), p.4493(1991)
- (4-19) D.E.Speliotis : IEEE Trans. Magn., Vol.MAG-26, p.1891 (1990)
- (4-20) I.A.Beardsley : J. Appl. Phys., Vol.53, p.53, p.2582 (1982)



## 第5章 リングヘッドとCo-Cr媒体からなる垂直記録系による高密度記録

### 5-1 はじめに

図5.1は、理想的に記録された場合の記録媒体の残留磁化分布について、垂直磁気記録方式と長手磁気記録方式を比較したものである。(a)に示すような理想的な孤立磁化反転を仮定すると、両方式における媒体内の反磁界の分布は(b)となる。垂直磁気記録方式では逆極性の隣り合う磁化が相吸引するように作用し磁化遷移領域での反磁界は0となる。一方、長手磁気記録方式では逆極性の隣り合う磁化が相反発するように作用し反磁界は磁化遷移領域で最大となる。従って、反磁界による残留磁化の減少を考慮すると、最終的な残留磁化分布は(c)となり、垂直磁気記録方式は長手磁気記録方式に比較して、磁化遷移領域の狭い残留磁化分布となる。この両方式の原理的な差は高記録密度領域でより顕著となり、垂直磁気記録では記録密度は高くなる程、残留磁化に対する反磁界は減少するが、長手磁気記録方式では逆に増加する。そのため、(d)に示すように高密度領域の残留磁化の強さに大きな差が生ずることになり、垂直磁気記録方式は長手記録方式に比べ、原理的には高密度記録に適した記録方式といえる。

垂直磁気記録方式の記録再生系としては、第2章の図2.3に示したように、単磁極型磁気ヘッドと垂直2層膜媒体からなる系とリング型磁気ヘッドと垂直単層膜媒体からなる系で研究が行われている<sup>(5-1)</sup>。本研究では、1)従来の磁気ヘッドを利用できること、2)媒体の構造が簡単であること、等から実用化の上でメリットの大きいリング型磁気ヘッドと垂直単層膜媒体からなる垂直記録系を研究の対象とした。

リング型磁気ヘッドの垂直方向の記録磁界は、第2章の記録磁界の解析で示したように、単磁極型磁気ヘッドの垂直方向の記録磁界に比べ、記録磁界勾配はブロードであるとともに、媒体膜厚方向での記録磁界強度および勾配の劣化も大きい。従って、リング型磁気ヘッドによる垂直記録系で垂直記録の原理的なメリットを生かして高密度記録を実現するためには、垂直異方性の良好な記録媒体を開発する必要があると考えられる<sup>(5-2) (5-3)</sup>。上記観点から、本研究の記録媒体として用いたCo-Cr単層膜媒体の磁化容易軸の垂直配向度と磁化反転機構の関係について明らかにすることを試みた<sup>(5-4) (5-5)</sup>。その結果、



Co-Cr 単層膜媒体の磁化反転機構は媒体の磁化容易軸の垂直配向度に強く依存すること、さらに、リング型磁気ヘッドと Co-Cr 単層膜媒体からなる垂直記録系の高密度化には、磁化容易軸の垂直配向度の良好な Co-Cr 単層膜媒体が必須であることが分かった。そこで、高垂直配向 Co-Cr 単層膜媒体に焦点を絞り、ヘッド・媒体パラメータと記録再生特性の関係を詳細に調べ、その検討結果に基づき、5.25 インチ垂直フロッピーディスク装置を試作した<sup>(5-6) (5-7)</sup>。

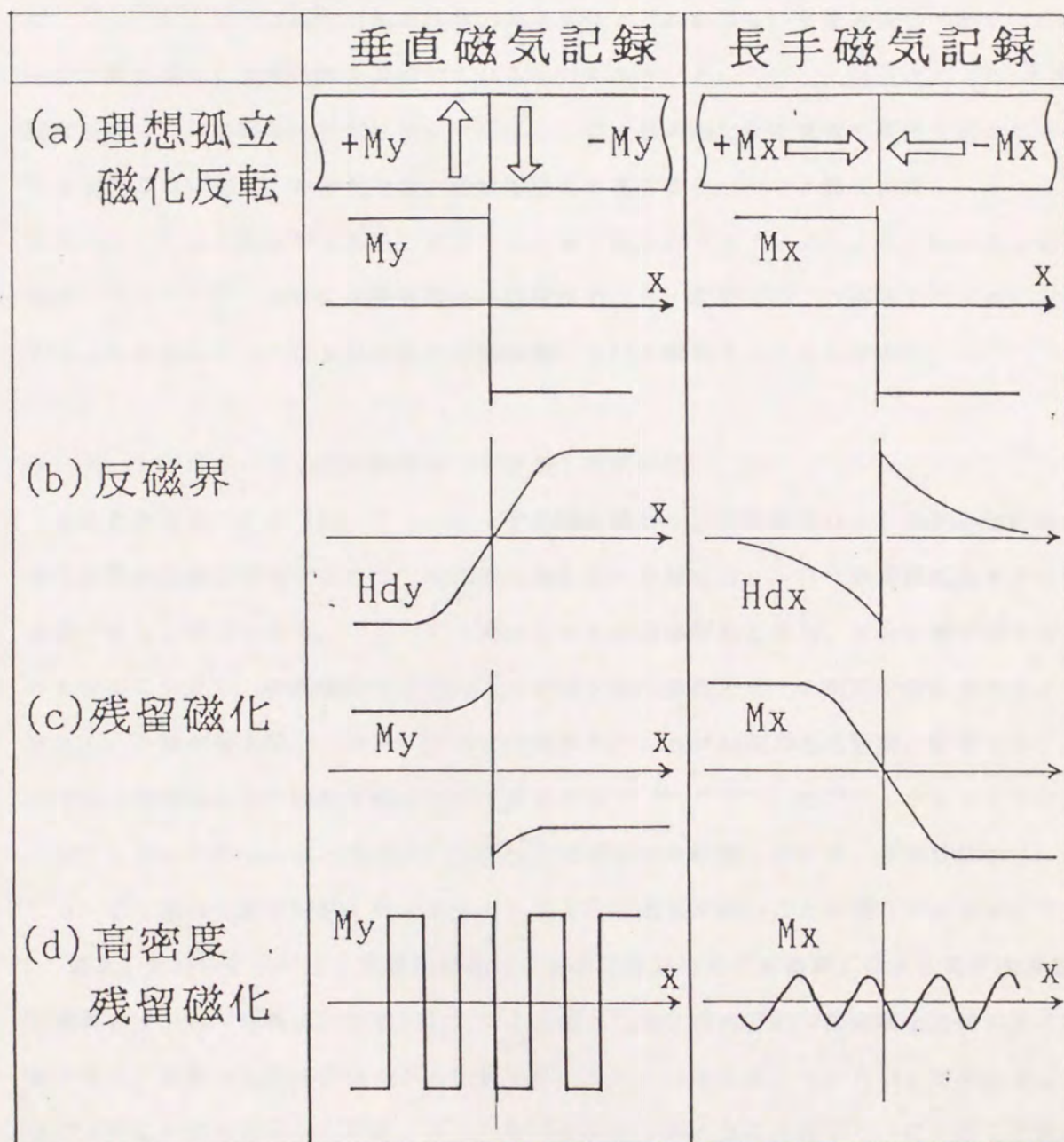


図 5. 1 垂直磁気記録方式と長手磁気記録方式の比較



## 5-2 Co-Cr 単層膜媒体の磁化反転機構

垂直磁気記録に用いる Co-Cr 膜の磁化反転機構の解析例としては、保磁力とヒステリシス損失の角度依存性からの解析がある<sup>(5-8)</sup>。その結果によれば、Co-Cr 膜の初期成長層とその上に形成される柱状層では磁氣的性質が大きく異なるが、磁化反転機構としては、概ね非一斉回転のカーリングモデル<sup>(5-9)</sup>で説明できるとしている。また、保磁力と回転ヒステリシス損失からの解析によると、初期成長層は磁壁移動型、その上の柱状層は一斉回転型または非一斉回転型の磁化反転機構であるとしている<sup>(5-10)</sup>。以上の結果は、Co-Cr 膜では磁化反転が柱状の結晶単位で行われ得ることを意味しており、Co-Cr 膜の優れた記録特性を裏付けているといえよう。ところで、これらのアプローチは記録膜のマクロな磁氣的性質の解析から Co-Cr 膜の磁化反転機構の解明を試みたものである。これに対し、本研究では、垂直配向度の異なる Co-Cr 膜を作成し、リング型磁気ヘッドによる記録再生実験とピッタ法や電子線ホログラフィ法による記録磁化状態の観察<sup>(5-11)</sup><sup>(5-12)</sup>、さらに記録磁界の計算機解析から、実際にリング型磁気ヘッドで記録を行った場合の Co-Cr 膜の磁化反転機構について解明することを試みた。

### 5-2-1 Co-Cr 単層膜媒体の膜構造と磁気特性

まえがきで述べたように、Co-Cr 単層膜媒体とリング型磁気ヘッドを組み合わせた系で高密度記録を実現するには、垂直磁気異方性の良好な Co-Cr 単層膜媒体を用いる必要があると考えられる。Co-Cr 膜は hcp の結晶構造を持ち、その c 軸が磁化容易軸となることから、垂直磁気異方性の大きさは c 軸の垂直方向への配向状態に大きく左右される。c 軸の配向度は、特に、膜の初期成長段階における核の生成状態に影響され、この段階での結晶配向を制御することが重要となる<sup>(5-13)</sup><sup>(5-14)</sup>。そこで、ポリイミドのベースフィルムと Co-Cr 膜の間に設ける下地層材料を探索した結果、非晶質状の Ge が Co-Cr 膜の垂直配向度を向上させる上で大きな効果を持つことが明らかとなった<sup>(5-3)</sup>。図 5. 2 は、Co-Cr 単層膜媒体の TEM (透過型電子顕微鏡) による膜断面構造の観察と VSM (振動試料型磁力計) による垂直方向と面内方向の飽和磁化曲線の測定結果である。試料は真空蒸着法により作製した。(a) は厚さ 30 nm の Ge 層を蒸着した後 Co-Cr 膜を形成した場合、(b) はベースフィルム上に直接 Co-Cr 膜を形成した場合である。両者とも粒径 50 nm の柱状の結晶粒により膜が構成されていることが分



かる。しかし、Ge下地層が無い試料では、ベースフィルムとの界面において結晶の成長に乱れが存在している。また、ベースフィルム面に並行に積層欠陥と思われる横縞が多数観察される。一方、Ge下地層を設けた試料では、ベースフィルム界面から結晶粒が一様に成長しており、積層欠陥も(b)に比較すると少ない。以上の膜断面構造の観察結果から、Ge下地層はCo-Cr膜の成長初期段階において、c軸方向がベースフィルム面に垂直方向に向いた結晶核を優先的に生成させる効果を持つことを知ることができる。また、両試料のCo-Cr膜の結晶配向度を比較するために、X線回折法によるCo-Cr (002) 回折ピークに関するロックング曲線の半値幅 $\Delta\theta_{50}$ を測定した結果、Ge下地膜が有る場合は $4.7^\circ$ 、Ge下地膜が無い場合は $10.0^\circ$ であった。さらに、飽和磁化曲線を両試料で比較すると、垂直方向に磁界を印加した場合の飽和磁化曲線は両試料で大きな差は見られないが、面内方向の飽和磁化曲線は明らかな違いが見られる。Ge下地膜が有る場合には、面内方向の保磁力、角形比ともに低い値を示すのに対し、Ge下地膜が無い場合には、磁化容易軸の分散が大きいことを反映して面内方向の保磁力、角形比ともに大きな値を示す。さらに、面内方向の飽和磁化曲線の原点近傍において、磁化の大きさが急激に変化する(jumping)現象が見られる。これは、ベースフィルム界面に形成されたCo-Cr膜の初期成長層は上層のCo-Cr膜とは異なり、軟磁性膜に近い性質を持つ膜が形成されているためと考えられる。以上の分析結果から、Ge下地膜はCo-Cr膜の垂直磁気異方性を高めるために非常に有効であることが分かった。

#### 5-2-2 Co-Cr単層膜媒体の記録磁化状態の観察による磁化機構の検討

本節では、リング型磁気ヘッドにより記録したCo-Cr単層膜媒体の記録磁化状態をBitter法により観察し、記録再生実験と記録磁界の計算機解析結果と合わせて、リング型磁気ヘッドによるCo-Cr単層膜媒体の磁化反転条件について検討した結果を述べる。

Bitter法は、磁性流体を記録媒体上に滴下した場合、磁束密度の勾配の急な部分すなわち磁化反転の位置に磁性微粒子が集まる性質を利用した観察法である。

図5.3は、表5.1に示す高配向と低配向の各々3種類の膜厚のCo-Cr単層膜媒体について、リング型磁気ヘッドで記録密度20kFCIの記録を行い、その記録状態をBitter法により観察した結果である。媒体の構造を図5.4に示す。記録再生実験



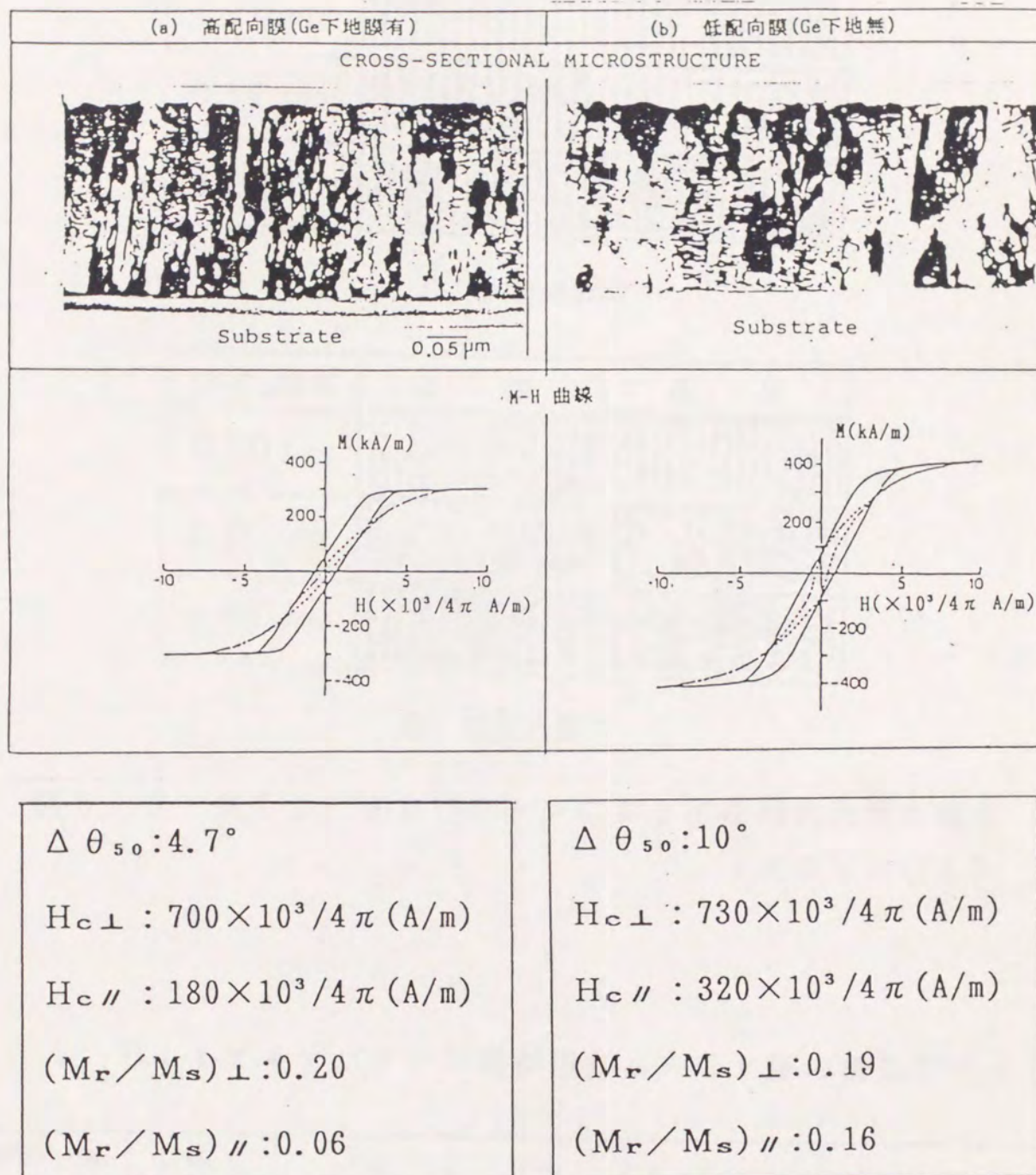


図 5. 2 Co-Cr 膜の断面組織と磁化曲線



| CoCr膜厚             | 表 面 | 裏 面 |
|--------------------|-----|-----|
| 0.20 $\mu\text{m}$ |     |     |
| 0.35 $\mu\text{m}$ |     |     |
| 0.50 $\mu\text{m}$ |     |     |

(a) 高配向媒体

| CoCr膜厚             | 表 面 | 裏 面 |
|--------------------|-----|-----|
| 0.20 $\mu\text{m}$ |     |     |
| 0.35 $\mu\text{m}$ |     |     |
| 0.50 $\mu\text{m}$ |     |     |

(b) 低配向媒体

図 5. 3 B i t t e r パターンによる記録磁化状態の観察  
(20 k F C I)

表 5. 1 B i t t e r パターン観察用 C o - C r 膜の磁気特性 (1)

| CoCr膜厚<br>( $\mu\text{m}$ ) | $\Delta\theta_{50}$<br>(deg.) | $M_s$<br>( $\times 10^3 \text{ A/m}$ ) | $H_{c\perp}$<br>( $\times 10^3/4\pi \text{ A/m}$ ) | $H_{c\parallel}$<br>( $\times 10^3/4\pi \text{ A/m}$ ) | $(M_r/M_s)_\perp$ | $(M_r/M_s)_\parallel$ | 備 考                        |
|-----------------------------|-------------------------------|----------------------------------------|----------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|-------------------|-----------------------|----------------------------|
| 0.20                        | 6.2                           | 340                                    | 860                                                | 280                                                    | 0.27              | 0.16                  | 高配向媒体<br>CoCr/Ge/Polyimide |
| 0.35                        | 5.7                           | 310                                    | 850                                                | 240                                                    | 0.29              | 0.10                  |                            |
| 0.50                        | 5.6                           | 340                                    | 820                                                | 234                                                    | 0.24              | 0.12                  |                            |
| 0.20                        | 9.8                           | 280                                    | 630                                                | 290                                                    | 0.18              | 0.15                  | 低配向媒体<br>CoCr/Polyimide    |
| 0.35                        | 10.0                          | 420                                    | 730                                                | 320                                                    | 0.19              | 0.16                  |                            |
| 0.50                        | 11.2                          | 280                                    | 690                                                | 290                                                    | 0.20              | 0.17                  |                            |



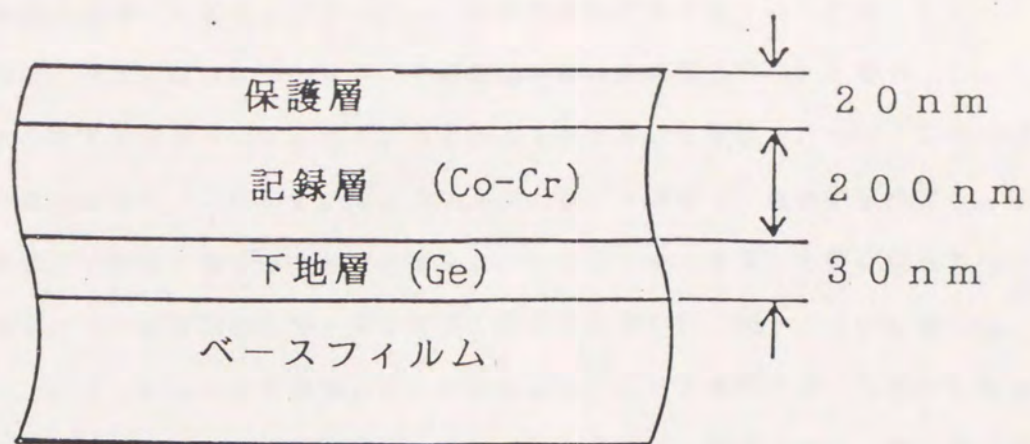


図5.4 Co-Cr単層膜媒体の構造

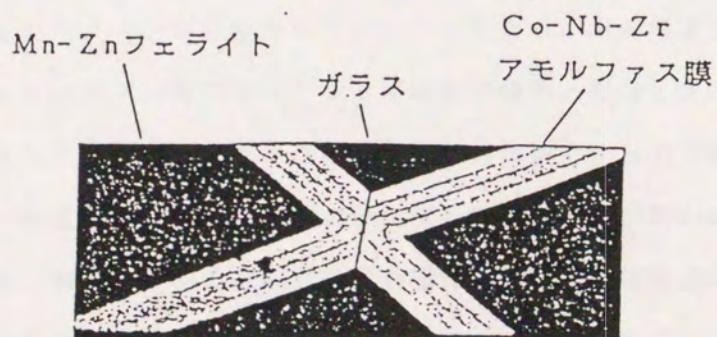
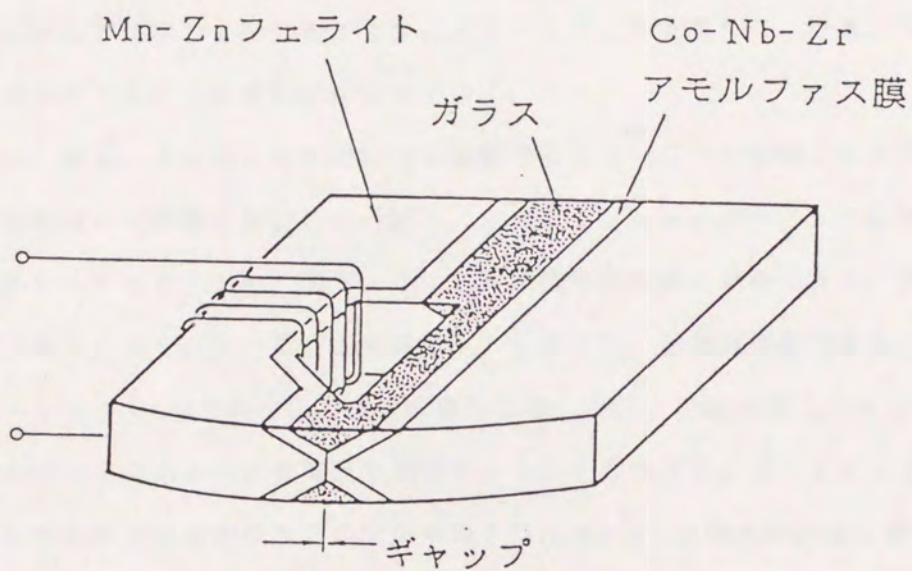


図5.5 複合型磁気ヘッドの構造



において記録膜が破壊されるのを防ぐために、B保護膜が付加されている。Bitter法による記録磁化状態の観察は、Co-Cr膜表面からは保護膜の付いた状態で、Co-Cr膜裏面からはヒドラジンによりベースフィルムを取り除いた状態で行った。記録に用いたヘッドの構造を図5.5に示す。Mn-Znフェライト基板上に飽和磁束密度0.9~1.0 TのCo-Nb-Zr系非晶質合金をスパッタ法により形成した複合型磁気ヘッドをフロッピディスク装置用のスライダに実装したものをを用いた。図5.3の記録には、ギャップ長0.25  $\mu\text{m}$ のヘッドを用いた。この図より、Ge下地膜を用いた高配向媒体の方が低配向媒体よりもBitterパターンのコントラストは鮮明であり、特に裏面においてその差が顕著である。従って、高配向媒体は低配向媒体よりも膜厚方向に磁化され易くなっていることが分かる。これは、垂直記録においては記録密度の向上に有効な性質といえる。ただし、高配向媒体でも膜厚を厚くしてゆくと、リング型磁気ヘッドの膜厚方向での記録磁界強度および分布が急激に劣化することを反映して、次第にBitterパターンのコントラストは不鮮明になってゆく。

つぎに、表5.2に示す高配向媒体に記録密度5 k F C Iで記録した場合の記録磁化状態と記録電流との関係を検討した。図5.6はBitterパターンの記録電流依存性を観察したものである。また、図5.7は記録電流特性の測定結果である。記録ヘッドには、ギャップ長0.19  $\mu\text{m}$ の複合型磁気ヘッドを用いた。記録電流特性から、記録電流7.5~10 mA<sub>o-p</sub>で再生出力は最大値をとる。なお、記録電流10 mA<sub>o-p</sub>は、0レベルを中心に $\pm 10$  mAの記録電流で記録することを意味する。Bitterパターンを観察すると再生出力が最大値をとる記録電流10 mA<sub>o-p</sub>では媒体の表面と裏面のコントラストがほぼ等しく、かつ最も鮮明である。興味深い点は、記録電流特性における最適記録電流の1/4の記録電流2.5 mA<sub>o-p</sub>で、既に媒体の裏面から磁化反転に対応するBitterパターンが観察されていることである。記録電流3.0 mA<sub>o-p</sub>になると、Bitterパターンのコントラストが媒体の表面と裏面でほぼ等しく、かつ非常に鮮明となる。以上の結果から、膜厚方向で一様な柱状構造をとる高配向Co-Cr媒体では、柱状構造の結晶単位で一斉回転型の磁化反転により記録が行われていると推定される。図5.8は、測定ヘッドの垂直方向記録磁界強度の記録電流依存性を、Co-Cr膜の最上層と最下層について、計算機シミュレーションにより求めたものである。最適記録電流10 mA<sub>o-p</sub>では、Co-Cr膜の最下層で $950 \times 4\pi / 10^3$  (A/m)の磁界強度が



表 5. 2 B i t t e r パターン観察用 C o - C r 膜の磁気特性 ( 2 )

| CoCr膜厚<br>( $\mu\text{m}$ ) | $\Delta\theta_{50}$<br>(deg.) | $M_s$<br>( $\times 10^3 \text{ A/m}$ ) | $H_{c\perp}$<br>( $\times 10^3/4\pi \text{ A/m}$ ) | $H_{c\parallel}$<br>( $\times 10^3/4\pi \text{ A/m}$ ) | $(M_r/M_s)_{\perp}$ | $(M_r/M_s)_{\parallel}$ |
|-----------------------------|-------------------------------|----------------------------------------|----------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|---------------------|-------------------------|
| 0.20                        | —                             | 270                                    | 740                                                | 200                                                    | 0.20                | 0.08                    |

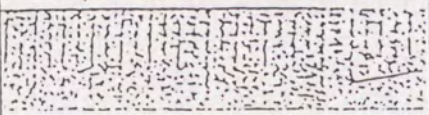
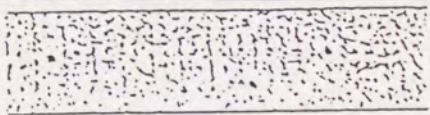
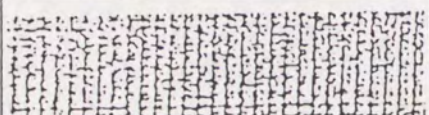
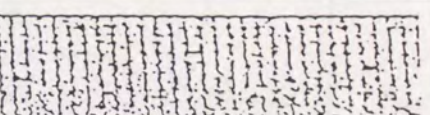
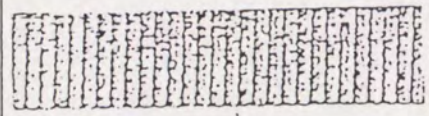
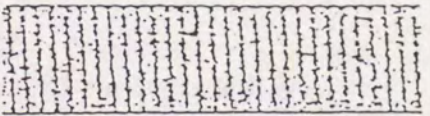
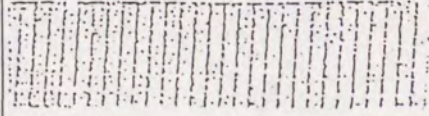
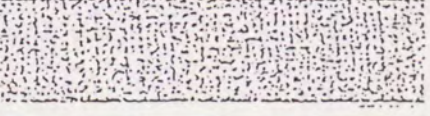
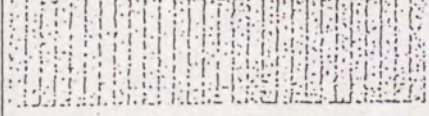
| 記録電流            | 表 面                                                                                 | 裏 面                                                                                  |
|-----------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| 2.5<br>(mA o-p) |  |  |
| 3.0             |  |  |
| 10.0            |  |  |
| 40.0            |  |  |
| 90.0            |  |  |

図 5. 6 B i t t e r パターンによる記録磁化状態の  
記録電流依存性の観察 ( 5 k F C I )



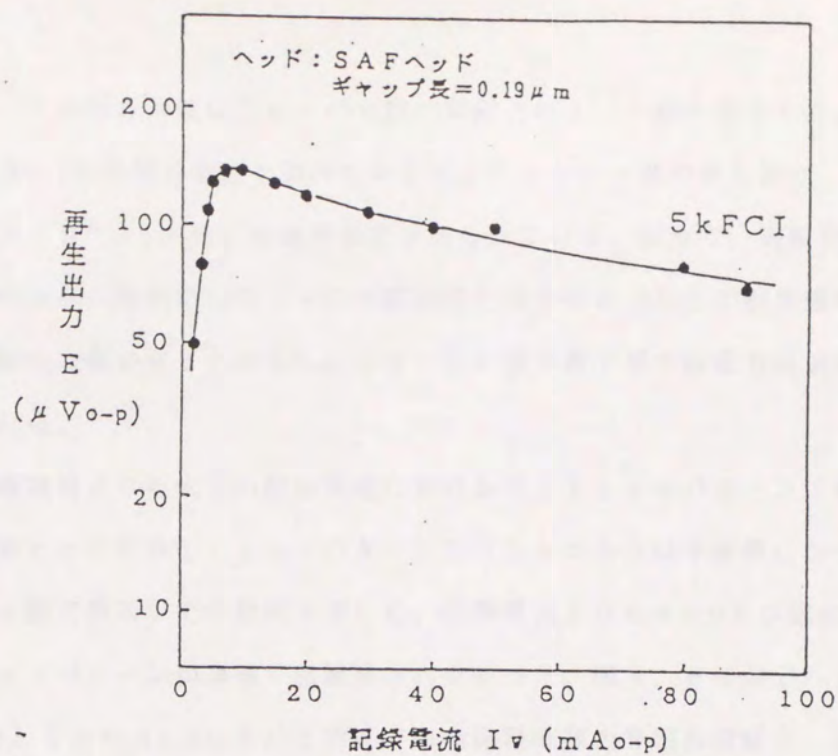


図5.7 5kFCI再生出力の記録電流依存性

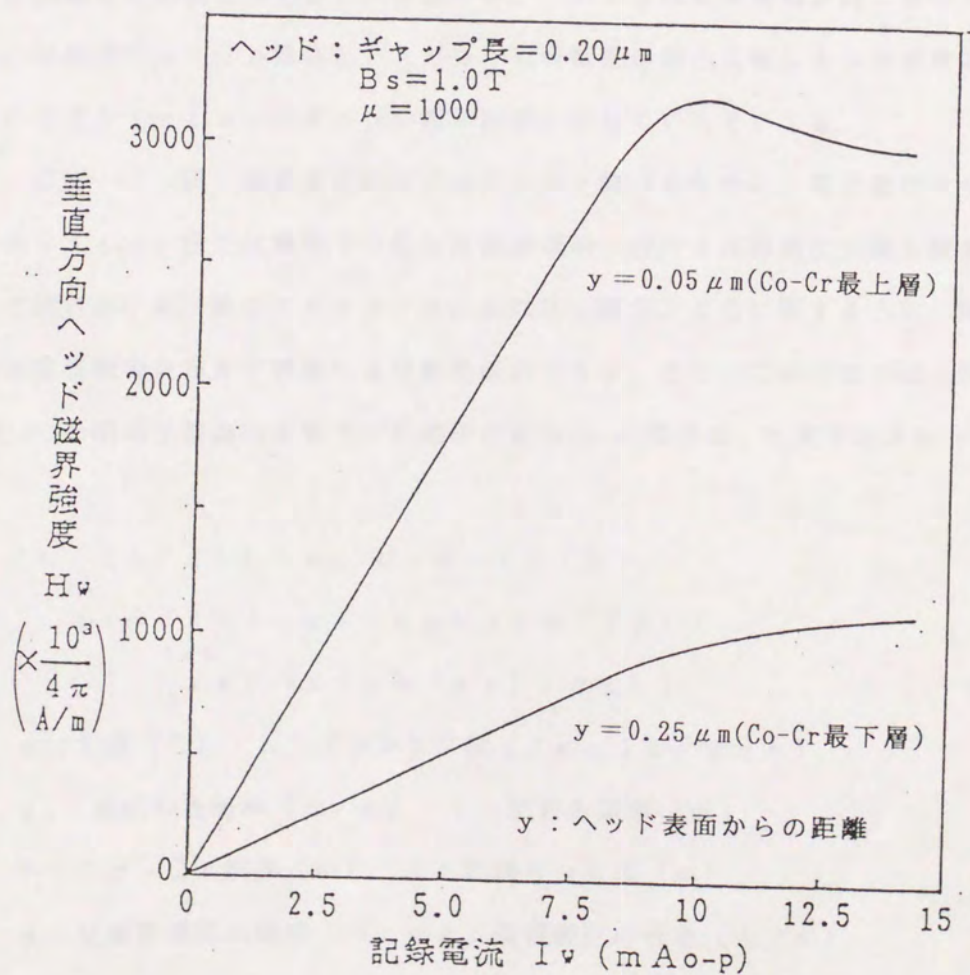


図5.8 垂直方向記録磁界強度の記録電流依存性



得られており、この磁界強度はCo-Cr膜の保磁力の1.3倍に相当する。また、記録電流2.5mA<sub>o-p</sub>での磁界強度を調べてみると、Co-Cr膜の最上層で $900 \times 4\pi / 10^3$  (A/m)の磁界強度が得られている。従って、高配向Co-Cr媒体では、磁化反転の開始にはCo-Cr膜の最上層で保磁力以上の磁界強度が、Co-Cr膜全体の磁化反転の完了させるにはCo-Cr膜の最下層で保磁力以上の磁界強度が必要と考えられる。

一方、最適記録電流よりも大きい記録電流におけるBitterパターンに注目すると、記録電流の増加とともにBitterパターンのコントラストは不鮮明になってゆく。特に、Co-Cr膜の裏面でその傾向が著しく、記録電流90mA<sub>o-p</sub>では磁化反転に対応するBitterパターンは裏面では観察されなかった。図5.9は測定ヘッドの記録電流10mA<sub>o-p</sub>と20mA<sub>o-p</sub>における垂直方向の記録磁界の等磁界曲線を、記録磁界シミュレーションを用いて計算し、比較したものである。これより、記録電流20mA<sub>o-p</sub>では記録電流10mA<sub>o-p</sub>の場合に比べ、ヘッド飽和の影響で磁界分布が著しくブロードになり等磁界曲線は記録膜を横切る方向に広がる。このような記録減磁が起こりやすい記録条件では、高配向Co-Cr媒体といえども一斉回転型の磁化反転による高密度記録が困難になることをBitterパターンの観察結果は示しているといえる。

最後に、Co-Cr膜の高密度化のポテンシャルを調べるために、電子線ホログラフィ法によりBitter法では観察不可能な高密度領域における記録磁化状態を観察した結果について述べる。電子線ホログラフィ法によれば、図5.10に示すように、媒体の表面と裏面の空間磁場分布を干渉縞により直接観察できる。また、この方法では、図中に示したP<sub>0</sub>とP<sub>1</sub>の間の干渉縞の本数Nと記録磁化量M<sub>rec</sub>の関係は、次式で表される<sup>〔5-12〕</sup>。

$$N = [n \cdot (e / \pi h) \cdot \mu_0 \cdot M_{rec} \cdot t \cdot \ell \cdot \{ (\delta / \ell) \log | \tanh (\pi \delta / 2 \ell) | - \int_0^{\delta / \ell} \pi x / (\sinh (\pi x)) dx \} ] \quad (5-1)$$

e: 電荷 (C)    h: プランク定数 (Joule · sec)

$\mu_0$ : 真空の透磁率 (H/m)    t: 試料の膜厚 (m)

$\delta$ : Co-Cr膜厚 (m)     $\ell$ : 記録ビット長 (m)

n: 位相差増幅の倍率    M<sub>rec</sub>: 残留磁化の強さ (A/m)



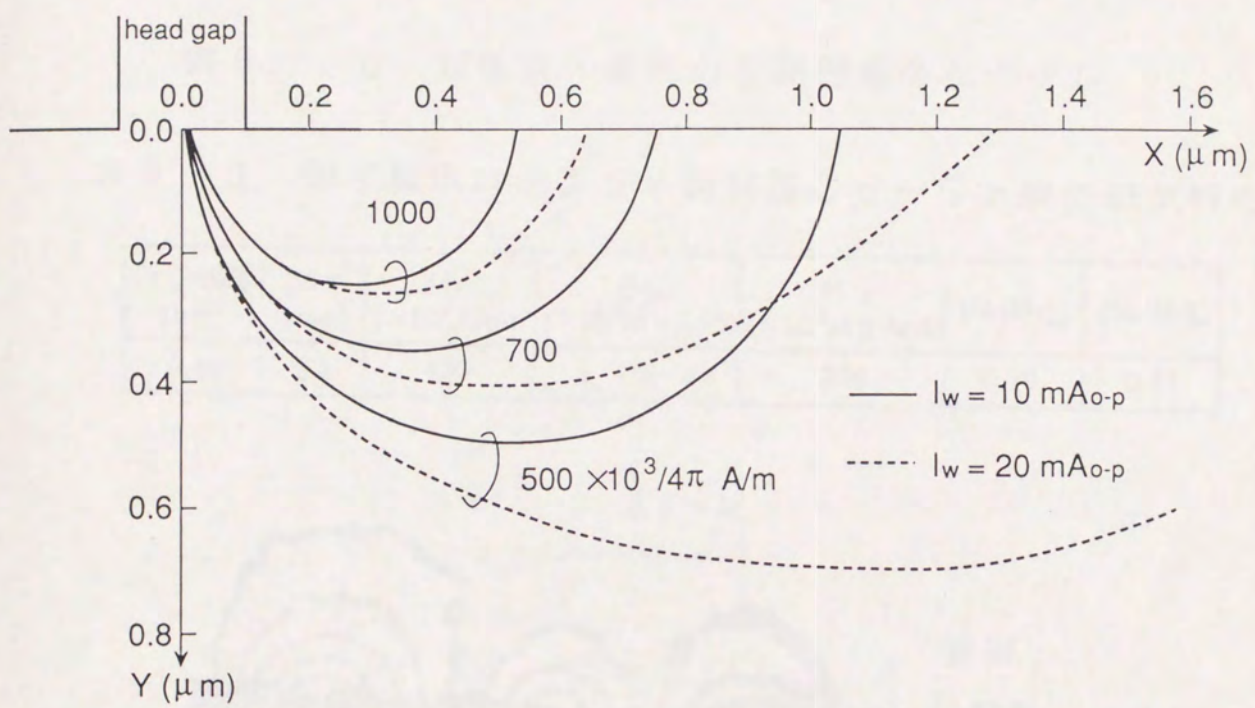
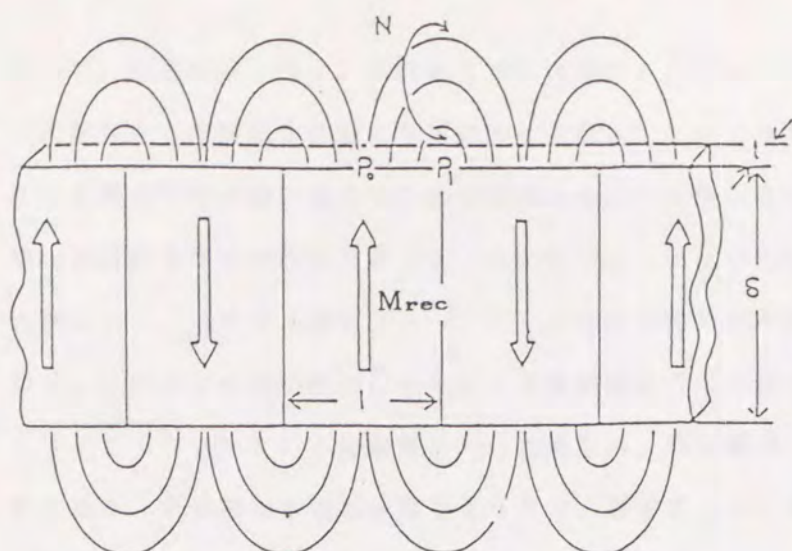


図 5. 9 複合型磁気ヘッドの垂直方向の等磁界曲線



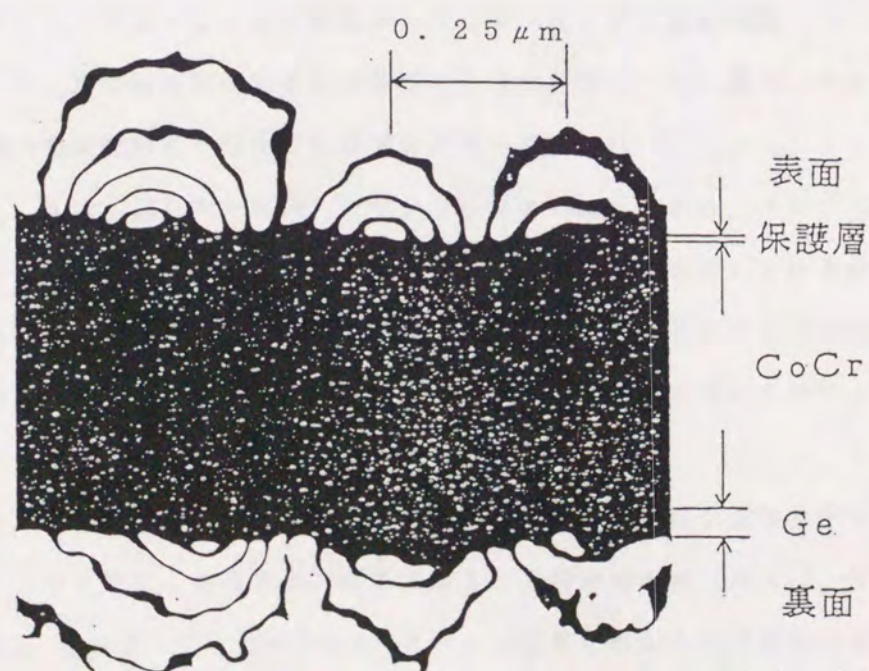


$N$  : 干渉縞本数  
 $M_{rec}$  : 残留磁化の強さ  
 $\delta$  : CoCr膜厚  
 $t$  : スライス厚さ  
 $l$  : ビット長

図 5. 10 媒体表・裏面の空間磁場分布モデル

表 5. 3 電子線ホログラフィ観察用 Co-Cr 膜の磁気特性

| CoCr膜厚<br>( $\mu\text{m}$ ) | $\Delta\theta_{50}$<br>(deg.) | $M_s$<br>( $\times 10^3 \text{ A/m}$ ) | $H_{c\perp}$<br>( $\times 10^3 / 4\pi \text{ A/m}$ ) | $H_{c\parallel}$<br>( $\times 10^3 / 4\pi \text{ A/m}$ ) | $(M_r/M_s)_\perp$ | $(M_r/M_s)_\parallel$ |
|-----------------------------|-------------------------------|----------------------------------------|------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|-------------------|-----------------------|
| 0.35                        | 5.9                           | 430                                    | 700                                                  | 230                                                      | 0.15              | 0.11                  |



記録密度 : 100 k FCI

図 5. 11 電子線ホログラフィ法による干渉顕微鏡像



従って、記録ビット長 $l$ 、試料のスライス厚さ $t$ 、Co-Cr膜厚 $\delta$ がわかれば、干渉縞の本数 $N$ から残留磁化の強さを定量的に求めることができる。電子線ホログラフィ顕微鏡による磁気記録状態の観察のための高品位のホログラムを得るためには、スライス厚さの均一な試料を作成する必要がある。本研究では、ダイヤモンドナイフを用いたマイクローム法により、スライス厚さ70~150 nmの条件で切片試料を作成した。図5.11は、表5.3に示す磁気特性のCo-Cr単層膜媒体にギャップ長0.25  $\mu\text{m}$ の複合型磁気ヘッドで100 k FCIの記録を行った場合の、電子線ホログラフィ法による干渉顕微鏡像である。干渉縞の本数は表面で3~5本、裏面で3~4本であり、100 k FCIの記録密度でもほぼ裏側まで記録磁化は到達していることがわかる。また、この試料では、 $l = 0.25$  ( $\mu\text{m}$ )、 $t = 0.08$  ( $\mu\text{m}$ )、 $\delta = 0.35$  ( $\mu\text{m}$ )であるので、 $N = 5$ として残留磁化の強さ $M_{\text{rec}}$ を算出すると、 $M_{\text{rec}} = 200 \pm 20$  k (A/m)となる。つまり、 $M_{\text{rec}}$ は飽和磁化 $M_s$ の約1/2となり、VSMで測定した残留磁化 $M_r = 0.15 \cdot M_s$ の約3倍である。この残留磁化の強さ $M_{\text{rec}}$ は反磁界補正をするとほぼ飽和残留磁化の強さに一致することが分かった<sup>(5-12)</sup>。従って、この記録再生系では記録減磁の無い理想的な記録が行われていると考えられる。

#### 5-2-3 Co-Cr単層膜媒体の垂直配向度と磁化反転機構

Co-Cr膜の垂直配向度が記録特性に及ぼす影響について調べ、その結果からCo-Cr膜の垂直配向度と磁化反転機構の関係を考察した<sup>(5-15)</sup>。

表5.4は上記目的で準備したサンプル媒体の諸元である。サンプルAはGe下地膜を用いた高配向媒体である。サンプルB、CはGe下地膜を用いているが、Co-Cr膜作製時に不純物ガスとして酸素を導入しており、その導入量はサンプルBで1 cc/分、サンプルCで5 cc/分である。サンプルDはCr下地膜を用いており、表5.3より明らかなように面内磁化膜である。

図5.12に、サンプル媒体の10 k FCIにおける再生波形を示す。記録電流値としては、10 k FCIの再生出力が最大値をとる最適電流値（例えば、サンプルA：7.5 mA o-p, サンプルC：5 mA o-p）とヘッド磁界分布がヘッド飽和の影響で著しくブロードになる20 mA o-pを選んだ。まず、最適電流値での再生波形を比較すると、サンプルAからサンプルDにむけて次第に上下非対称なダイパルス波形となっていく。波形の上下



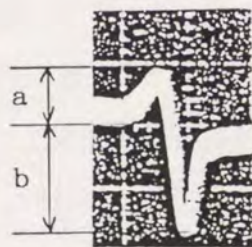
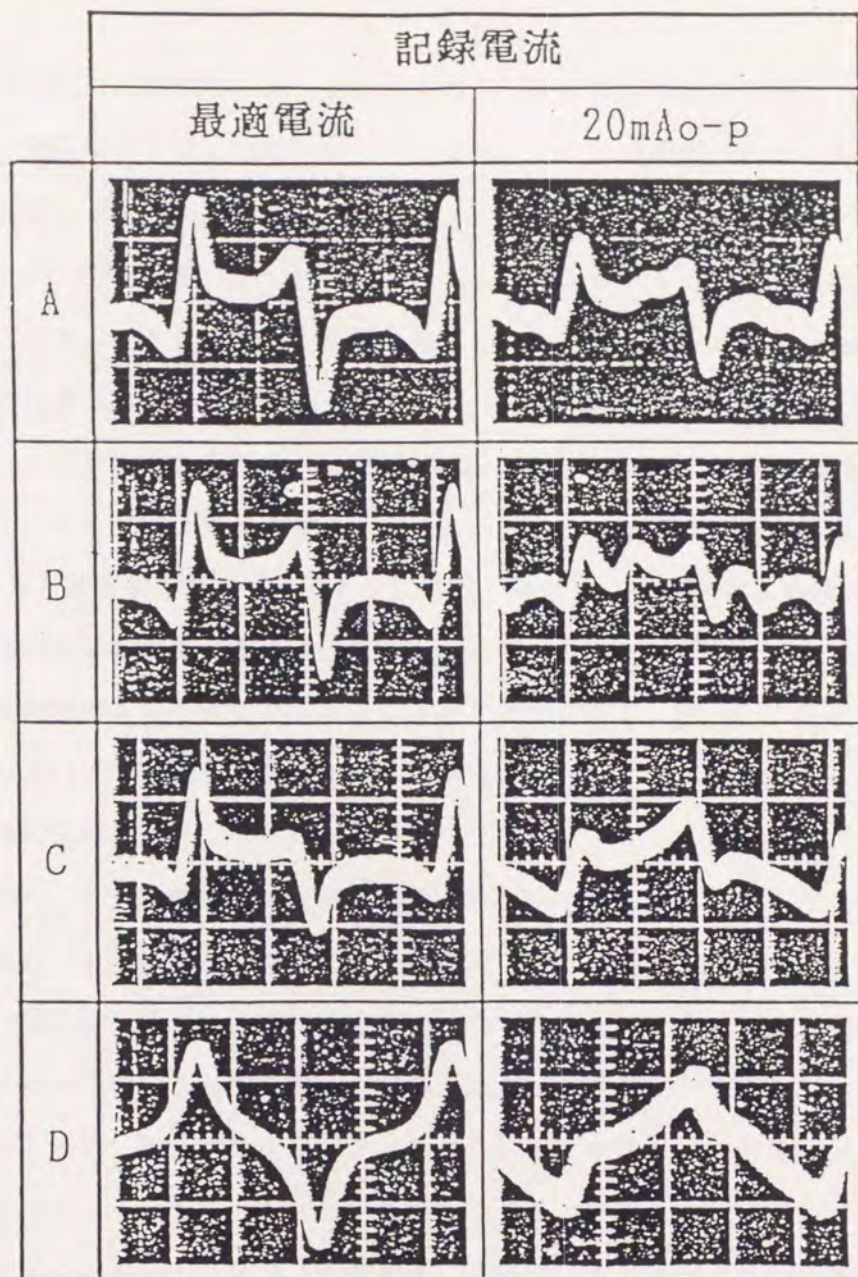
表 5. 4 サンプル媒体の諸元

|                                           | sample number |      |      |      |
|-------------------------------------------|---------------|------|------|------|
|                                           | A             | B    | C    | D    |
| $M_s$<br>(kA/m)                           | 320           | 315  | 290  | 320  |
| $H_c \perp$<br>$\times 10^3 / 4\pi$       | 780           | 600  | 600  | 350  |
| (A/m) //                                  | 300           | 300  | 416  | 400  |
| $M_r/M_s \perp$                           | 0.20          | 0.21 | 0.18 | 0.07 |
| //                                        | 0.10          | 0.11 | 0.31 | 0.62 |
| $\Delta \theta_{50}$<br>(degree)          | 8.0           | 8.0  | 10.5 | —    |
| $H_k \perp$<br>$\times 10^3 / 4\pi$ (A/m) | 6000          | 6000 | 2800 | -800 |

Co-Cr膜厚 : 200 nm

(注)膜面垂直方向の反磁界補正なし





波形の上下対称比 =  $(a/b) \times 100 (\%)$

図 5. 1 2 10 k F C I における再生波形



対称比を図中の定義で表すと、サンプルAで50%、サンプルCで30%である。媒体磁化が理想的に垂直磁化として記録されている場合、リング型磁気ヘッドで再生した波形は完全に上下対称なダイパルス波形となる。従って、サンプルAの方がサンプルCよりも理想的な垂直記録に近い記録がなされているといえる。また、サンプルDの再生波形は完全な単峰波形となり、サンプルDでは長手記録が行われていることが確認された。次に、各サンプルの最適電流値と記録電流値20mA<sub>o-p</sub>での再生波形の違いを比較すると、サンプルAでは、記録電流値20mA<sub>o-p</sub>の再生波形は、最適電流値での再生波形よりも振幅が小さくなるものの波形の差は小さい。しかし、他のサンプルでは、記録電流値20mA<sub>o-p</sub>にすると再生波形が大きく歪む。これは、Co-Cr膜の垂直配向性が劣化すると記録磁化状態は記録磁界分布の影響を受け易くなることを意味しており、高密度記録においては記録減磁による特性劣化が大きくなると予想される。図5.13は、サンプルA～Dの記録密度特性を比較したものである。予想どおり、Co-Cr膜の垂直配向性の劣化とともに高密度特性が劣化している。

次に、媒体のノイズ特性から磁化反転機構を明らかにすることを試みた。媒体ノイズの測定手順を図5.14に示す。まず、システムノイズを含めたトータルノイズスペクトラムを測定し、信号記録時には、信号成分をスペクトラム上でカットする。次に、システムノイズのノイズスペクトラムを測定し、トータルノイズスペクトラムから、システムノイズスペクトラムを差し引いて、媒体ノイズスペクトラムを得る。媒体ノイズのrms値は、媒体ノイズスペクトラムの4.5MHzまでのノイズパワーを積分して求めた。ノイズ測定は2.54m/sで行ったので、周波数4.5MHzのノイズ成分の波長は0.56μmに相当する。図5.15はサンプルA～Dについて未飽和直流消去ノイズ特性を測定した結果である。未飽和直流消去ノイズ特性の測定では、まず一方向に大電流で直流消去し、次に逆方向に印加する直流消去電流値 $I_r$ を変えて媒体ノイズ $N_d$ を測定し、 $I_r$ と $N_d$ の関係を求めたものである。垂直配向性の良好なサンプルAおよびサンプルBでは、媒体ノイズ $N_d$ は極小値を持つ。一方、垂直配向性の悪いサンプルCと面内配向のサンプルDでは、媒体ノイズ $N_d$ は極大値を持つ。ところで、同様の測定を塗布媒体と長手記録用の薄膜媒体で行った場合、塗布媒体の未飽和直流消去ノイズ特性は極小値を持ち、長手記録用の薄膜媒体では極大値を持つことが分かっている<sup>(5-16)</sup>。塗布媒体では、交流消磁状態の方が直流消磁状態よりも媒体の表面性や磁気特性の不均一性に起因するノイズ成分



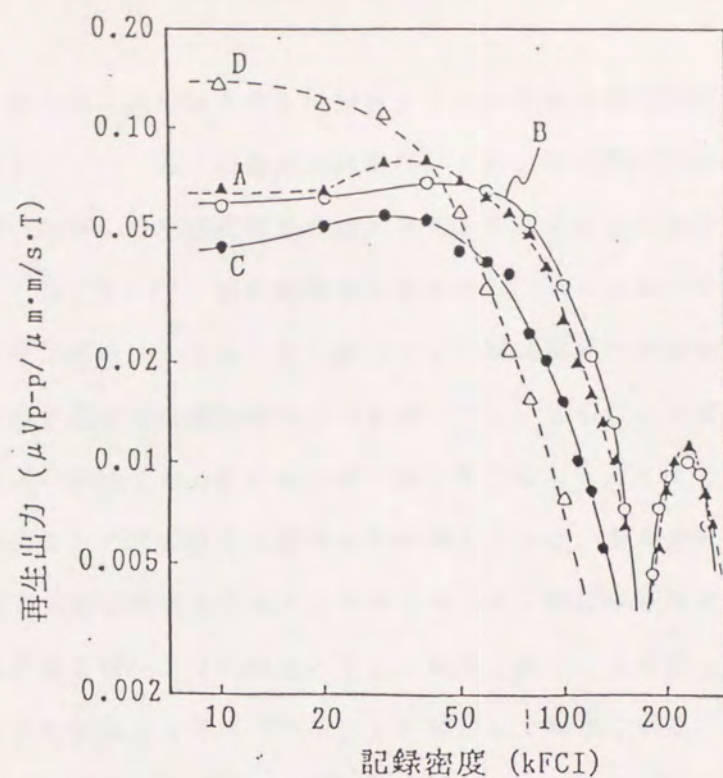


図 5. 1 3 記録密度特性

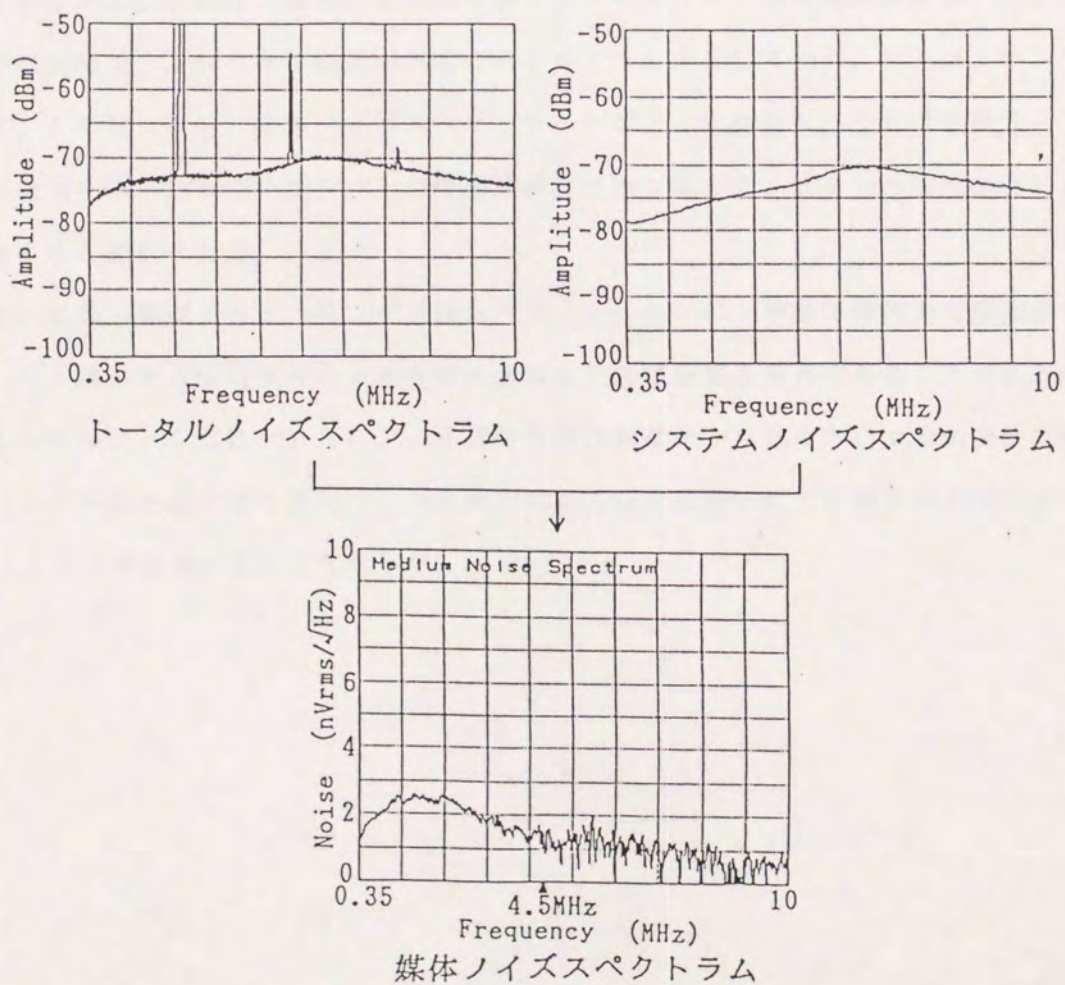


図 5. 1 4 媒体ノイズの測定手順



を抑圧できるため、逆方向への印加電流を増加させていき交流消磁状態になった時、極小値をとると考えられる。一方、長手記録用の薄膜媒体では、結晶粒子間の磁氣的結合による交換相互作用が強いため、交流消磁状態では大きく不均一な磁区が発生して媒体ノイズが増加する。図5. 15において、垂直配向性の良好なCo-Cr膜の未飽和直流消去ノイズ特性が極小値を持つ理由は、Co-Cr膜はCrの結晶粒界への偏析により、結晶粒子間の磁氣的結合は長手記録用の薄膜媒体よりも弱いこと、さらに、垂直磁化膜は交流消磁状態では微小な磁区を形成する方がエネルギー的に安定なこと等によると推定される。一方、垂直配向度が劣化して残留磁化の面内成分が増加すると、長手記録用の薄膜媒体と同様に交流消磁状態で大きな磁区を形成する方がエネルギー的に安定なため、未飽和直流消去ノイズ特性が極大値を持つようになると考えられる。図5. 16は、サンプルA～Dの交流消磁状態における媒体ノイズスペクトラムを測定した結果である。回転するサンプル媒体からバルクイレーザを次第に離してゆくことにより、交流消磁を行った。この図から、垂直配向度が劣化につれて、媒体ノイズスペクトラムのピークが低周波数側に移動することが分かる。これは、図5. 13の考察で述べたように、垂直配向度が劣化すると、交流消磁状態で、より大きな磁区が形成されてゆくことを示している。例えば、サンプルDでは、1 MHz付近に媒体ノイズスペクトラムのピークが存在し、これは波長2.5  $\mu\text{m}$ に相当する。従って、サンプルDの交流消磁状態では、1.25  $\mu\text{m}$ 程度の磁区が多く存在すると推定される。

以上の結果を整理すると、リング型磁気ヘッドとCo-Cr単層膜媒体からなる系では、Co-Cr膜の垂直配向度の向上が高密度記録のための重要な条件であることが記録再生実験より明らかとなった。さらに、ノイズ特性の比較結果よりCo-Cr膜の垂直配向度によりノイズ特性は大きく異なり、垂直配向度の劣化とともに巨大な磁区が形成され易くなり、ノイズが増加することを示した。



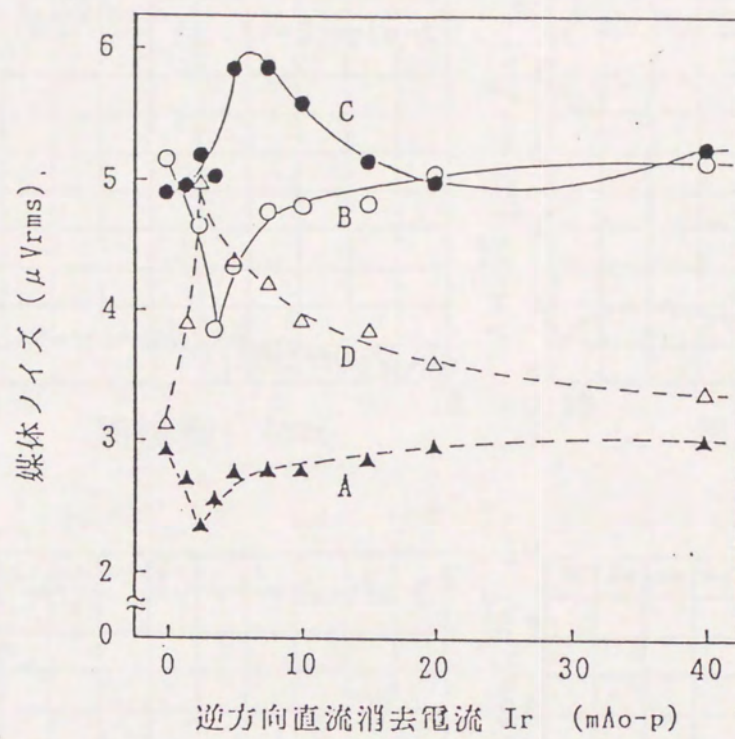


図 5. 1 5 未飽和直流消去ノイズ特性



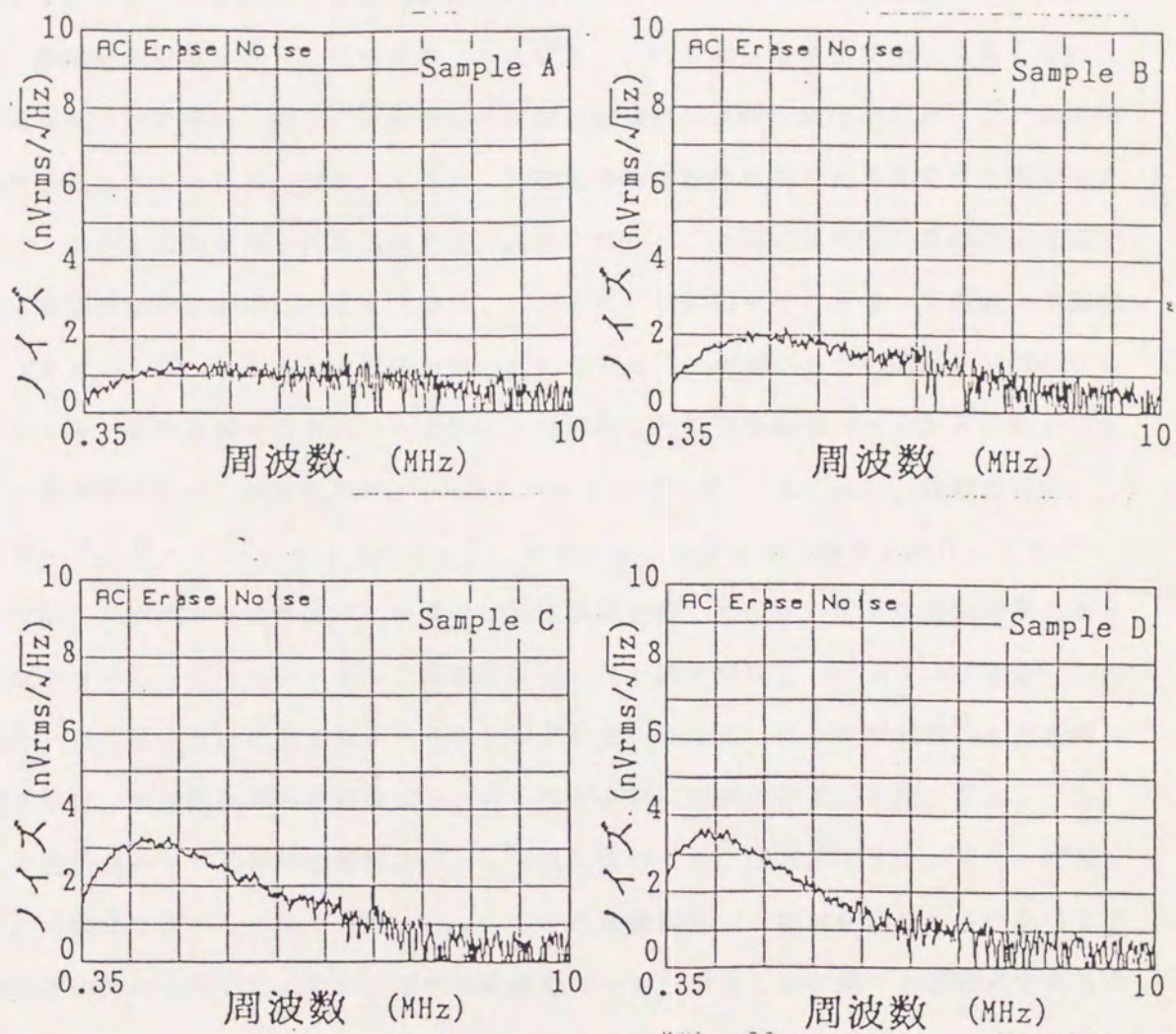


図 5. 1 6 交流消去ノイズスペクトラム



### 5-3 高配向Co-Cr単層膜媒体の記録再生特性

#### 5-3-1 高密度特性

リング型磁気ヘッドは長手磁気記録向けに開発されたヘッドであり、垂直方向の磁界分布は、単磁極型磁気ヘッドに比べブロードになる。これを補って高密度化を実現するには、垂直磁気異方性の強い、従って垂直方向への結晶配向性の良好な高配向Co-Cr単層膜媒体が必須と考えられる。図5.17は、高密度特性の評価尺度である低密度の再生出力の1/2の再生出力が得られる記録密度 $D_{50}$ と、Co-Cr膜の垂直配向度の評価尺度であるX線回折法によるCo-Cr(002)回折ピークに関するロッキング曲線の半値幅 $\Delta\theta_{50}$ を用い、 $D_{50}$ と $\Delta\theta_{50}$ の関係を求めたものである。測定ヘッドは前節と同様のCo-Nb-Zr系非晶質合金をスパッタ法により形成した複合型磁気ヘッドを用いた。Co-Cr単層膜媒体は、飽和磁化 $M_s = 300 \sim 450 \times 10^3$  (A/m)、保磁力 $H_c = 500 \sim 700 \times 10^3 / 4\pi$  (A/m)、膜厚 $\approx 0.35 \mu\text{m}$ の媒体を試作して測定した。なお、この図で白抜きで示した点はGe下地膜を用いたCo-Cr単層膜媒体であり、黒点はポリイミドベースフィルム上に直接Co-Cr膜を形成したサンプルである。この図より、 $D_{50}$ は $\Delta\theta_{50}$ に強く依存することが分かる。従って、リング型磁気ヘッドを用いる場合には、垂直配向度の良好なCo-Cr膜が高密度記録の必須の条件となる。一方、リング型磁気ヘッドの再生分解能はギャップ長に依存する。図5.18は、ギャップ長 $g$ と $D_{50}$ の関係を調べたものである。Co-Cr単層膜媒体は、垂直配向度の良好なGe下地膜付きのものを用いた。また、図中の破線はギャップ損失 $L_g$ に関する理論式である次式から、 $D_{50}$ をギャップ損失 $L_g$ が-6dBとなる記録密度として求めた結果である。

$$L_g = -20 \log \left[ \frac{\{\sin(\pi \cdot g / \lambda)\}}{\{\pi \cdot g / \lambda\}} \right] \quad (5-2)$$

$g$ : ギャップ長 ( $\mu\text{m}$ )     $\lambda$ : 記録波長 ( $\mu\text{m}$ )

実測結果の傾向が破線とほぼ一致することから、実測したギャップ長の範囲では高配向Co-Cr膜の高密度特性は十分であり、 $D_{50}$ はギャップ損失により決定されているといえる。ちなみに、ギャップ長 $0.17 \mu\text{m}$ のヘッドにより $D_{50} = 230 \text{ kFCI}$ の高密度記録特性が得られた。



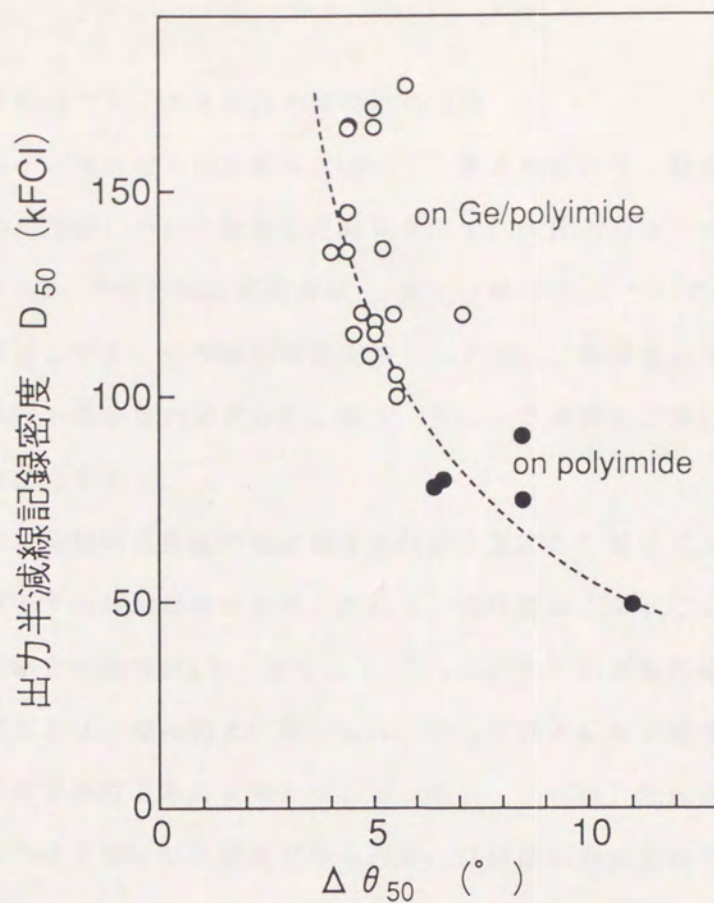


図 5. 17 Co-Cr 垂直配向度向上の効果

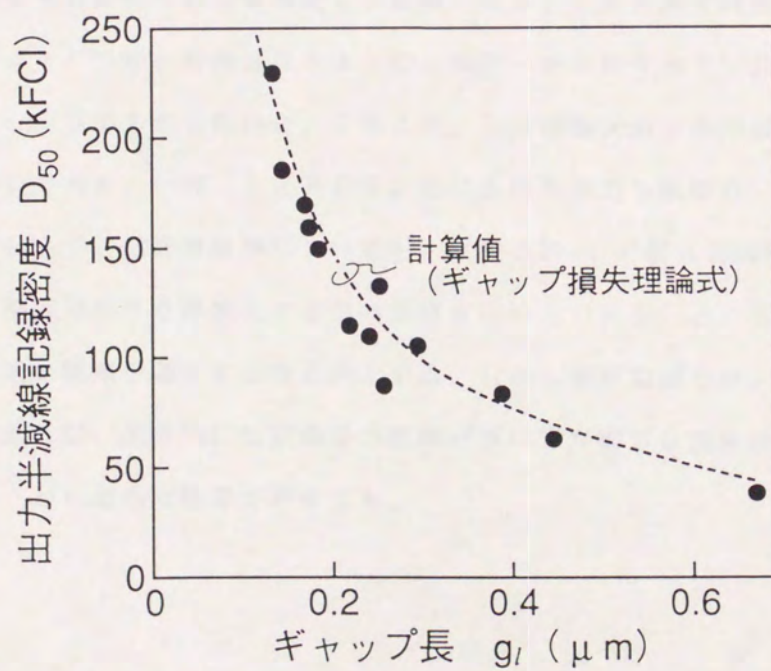


図 5. 18  $D_{50}$  のギャップ長依存性



### 5-3-2 媒体パラメータと記録再生特性の関係

本節では、Ge下地膜付きの高配向Co-Cr膜の範囲内で、媒体のマクロな磁気特性と記録再生特性の関係について検討した結果を示す。媒体のマクロな磁気特性としては、飽和磁化の強さ $M_s$ 、垂直方向の保磁力 $H_{c\perp}$ および膜厚 $\delta_r$ について検討した。記録再生特性の評価尺度としては、分解能の評価尺度として $D_{50}$ 、信号出力の評価尺度として1kFCIにおける再生出力を用いた。表5.5に、この検討で用いたCo-Cr単層膜媒体とヘッドの諸元を示す。

図5.19は、記録再生特性の飽和磁化依存性を測定した結果である。高飽和磁化の媒体では $D_{50}$ が低下する傾向がみられる。ただし、低密度の1kFCIにおける再生出力に関しては、飽和磁化の強さ $M_s$ が $350 \times 10^3$  (A/m)の高飽和磁化の媒体が最も高い値を示した。これより、飽和磁化に関しては、 $D_{50}$ が低下しない範囲で、高飽和磁化のものが記録再生特性が良好であると考えられる。図5.20は、記録再生特性の垂直方向の保磁力依存性について測定した結果である。 $D_{50}$ は媒体の垂直方向の保磁力 $H_{c\perp}$ にはほとんど依存しないが、1kFCIにおける再生出力は $H_{c\perp}$ に大きく依存する。従って、高い再生出力振幅を得るためには、ヘッドの記録能力を勘案して飽和記録の可能な範囲で垂直方向の保磁力 $H_{c\perp}$ はできるだけ大きな値の媒体のほうが望ましい。図5.21は、記録再生特性の記録層膜厚依存性を測定した結果である。この実験では記録層膜厚の厚い媒体でも十分なオーバーライト特性となるように、測定ヘッドのギャップ長は $0.23 \mu\text{m}$ と、やや広ギャップ長のものを用いた。これより、 $D_{50}$ が極大値を持つ最適な膜厚は $0.30 \mu\text{m}$ 近辺である。一方、1kFCIにおける再生出力も膜厚 $0.30 \mu\text{m}$ 近辺で飽和している。従って、記録層膜厚についても、保磁力 $H_{c\perp}$ の場合と同様に、飽和記録の可能な範囲で記録層膜厚を厚膜化する方向が望ましいといえる。ところで、長手記録では、 $D_{50}$ は記録層の膜厚を薄くするほど向上する。しかし垂直記録では、記録ヘッドに十分な記録能力があれば、原理的には記録層の膜厚が厚い方が安定な記録状態であるため、高密度特性の観点から最適な膜厚が存在する。



表 5. 5 測定媒体およびヘッドの諸元

|    |    | 飽和磁化<br>(kA/m) | 保磁力( $\times 10^3 / 4\pi$ A/m) |             | 角形比     |             | 膜厚<br>( $\mu\text{m}$ ) | ヘッドギャップ長<br>( $\mu\text{m}$ ) |
|----|----|----------------|--------------------------------|-------------|---------|-------------|-------------------------|-------------------------------|
|    |    |                | $\perp$                        | $\parallel$ | $\perp$ | $\parallel$ |                         |                               |
| #1 | Ms | 210            | 700                            | 200         | 0.27    | 0.07        | 0.20                    | 0.21                          |
| #2 | 依  | 280            | 720                            | 220         | 0.29    | 0.10        | 0.20                    | 0.19                          |
| #3 | 存  | 350            | 680                            | 290         | 0.16    | 0.13        | 0.20                    | 0.21                          |
| #4 | Hc | 280            | 580                            | 250         | 0.20    | 0.10        | 0.20                    | 0.19                          |
| #5 | 依  | 280            | 720                            | 220         | 0.29    | 0.10        | 0.20                    | 0.19                          |
| #6 | 存  | 300            | 900                            | 360         | 0.26    | 0.10        | 0.20                    | 0.19                          |
| #7 | tm | 310            | 690                            | 330         | 0.23    | 0.09        | 0.22                    | 0.23                          |
| #8 | 依  | 310            | 690                            | 300         | 0.21    | 0.09        | 0.31                    | 0.23                          |
| #9 | 存  | 300            | 720                            | 270         | 0.23    | 0.09        | 0.39                    | 0.23                          |

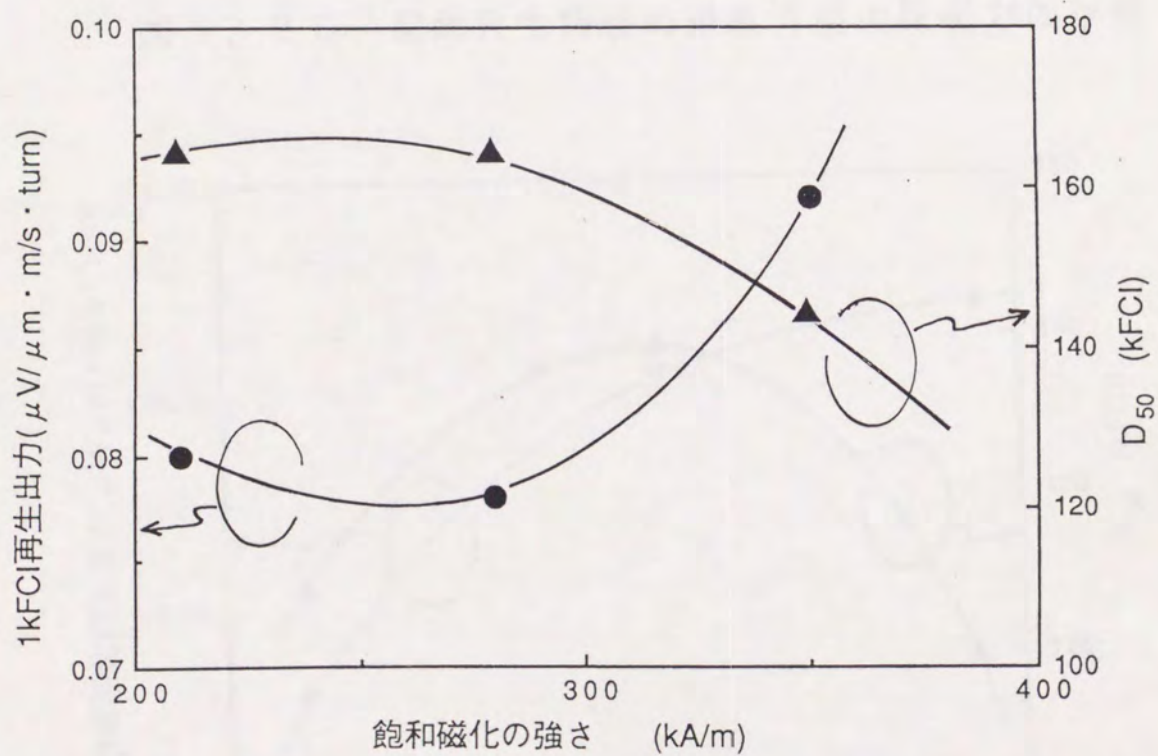


図 5. 1 9 記録再生特性の飽和磁化依存性



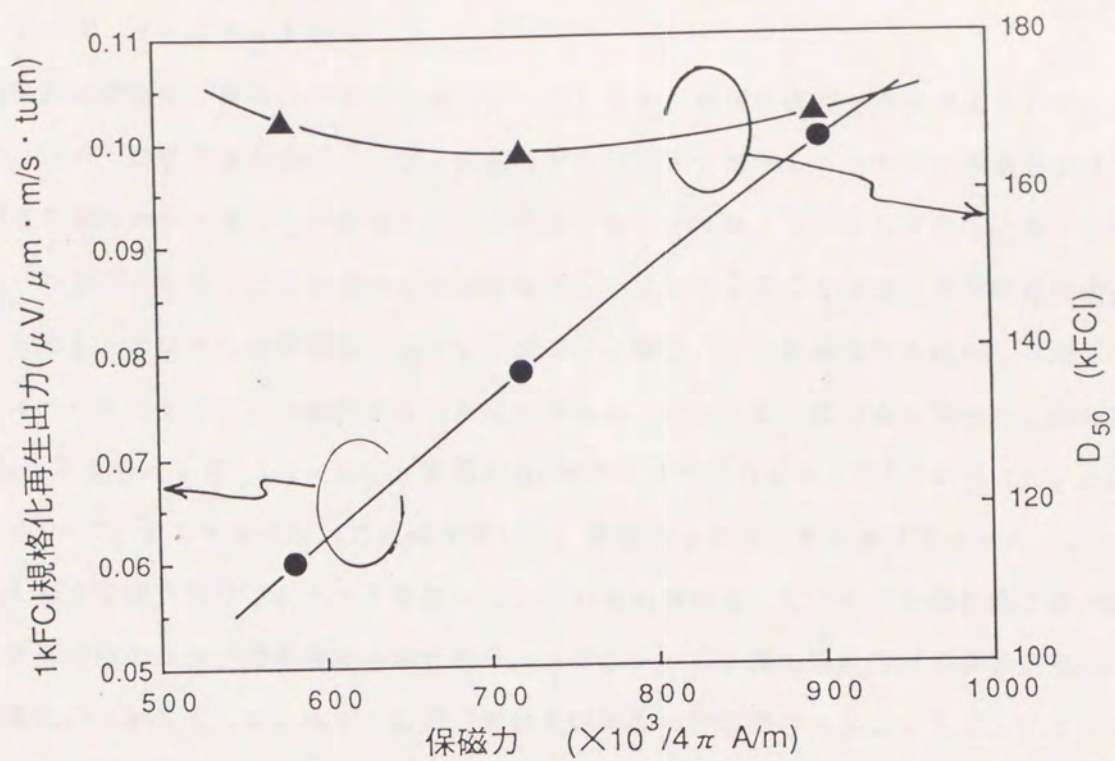


図 5. 2 0 記録再生特性の垂直方向の保磁力依存性

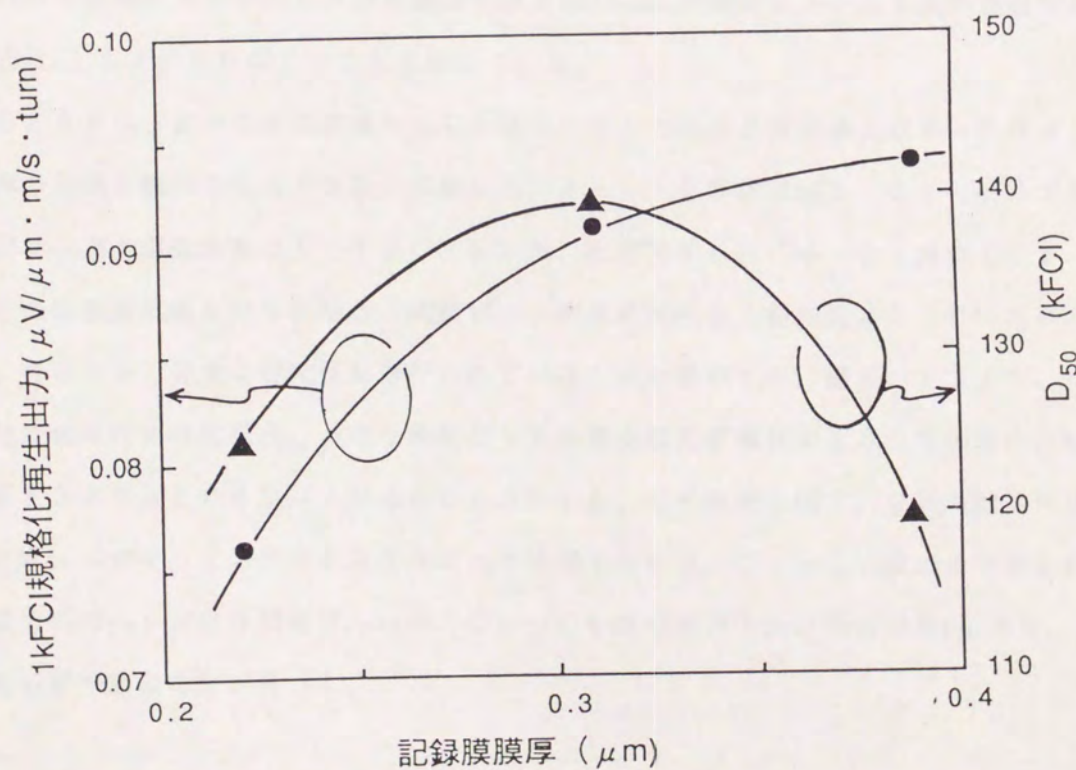


図 5. 2 1 記録再生特性のCo-Cr膜膜厚依存性



### 5-3-3 オーバライト特性

磁気記録装置は、情報の再書き込み（オーバライト）を行う機能を通常備えている。そこで、Ge下地膜付高配向Co-Cr媒体のオーバライト特性とヘッドの記録磁界強度との関係を明らかにすることを試みた。オーバライトS/Nは、100kFCIの信号を書き込んだ後、48kFCIの信号を再書き込みし、100kFCIの消え残り信号振幅に対する48kFCIの信号振幅の比として求めた。図5.22は垂直方向のヘッド磁界強度とオーバライトS/Nの関係を求めたものである。Co-Cr膜の磁気特性は、飽和磁化 $M_s = 300 \times 10^3$  (A/m)、保磁力 $H_c = 600 \sim 900 \times 10^3 / 4\pi$  (A/m)、膜厚 $\delta_r = 0.15 \sim 2.5 \mu\text{m}$ の媒体を用いた。測定ヘッドは、ギャップ長 $g = 0.15 \sim 2.5 \mu\text{m}$ の複合型リングヘッドを用いた。この図の横軸は、Co-Cr膜の最下層における垂直方向のヘッド磁界強度の最大値 $H_{y\max}$ をCo-Cr膜の垂直方向の保磁力 $H_{c\perp}$ で規格化して示している。ヘッド磁界強度は記録磁界の計算機シミュレーションにより求めた。オーバライトS/Nの装置仕様としては、通常26dB以上とされている。これは消え残りの信号振幅が記録されている信号振幅の5%以下であることを意味する。

図5.22の結果は、オーバライトS/Nを26dB以上にするには、Co-Cr膜の最下層における垂直方向のヘッド磁界強度の最大値 $H_{y\max}$ が概ねCo-Cr膜の垂直方向の保磁力 $H_{c\perp}$ 以上であればよいことを示している。

図5.23は、図中にその定義を示した隣接ビットの再生出力振幅比とオーバライトS/Nの関係を調べたものである。実験に用いたヘッドと媒体は図5.23と同一である。隣接ビット間の記録密度は10kFCIとした。直流消去したCo-Cr膜に10kFCIの低密度記録を行った場合、隣接ビット相互の再生出力振幅比が100%ということは、各ビットで完全な磁化反転が行われていることを意味する。図5.23より、完全な磁化反転が行われた場合、つまり隣接ビットの再生出力振幅比が100%の場合、オーバライトS/Nは30dB以上であることが分かる。この結果と図5.22の結果を合わせるとオーバライトS/Nが30dB以上を達成するには、Co-Cr膜の最下層における垂直方向のヘッド磁界強度 $H_{y\max}$ が、Co-Cr膜の垂直方向の保磁力 $H_{c\perp}$ の1.2倍以上必要であることが分った。



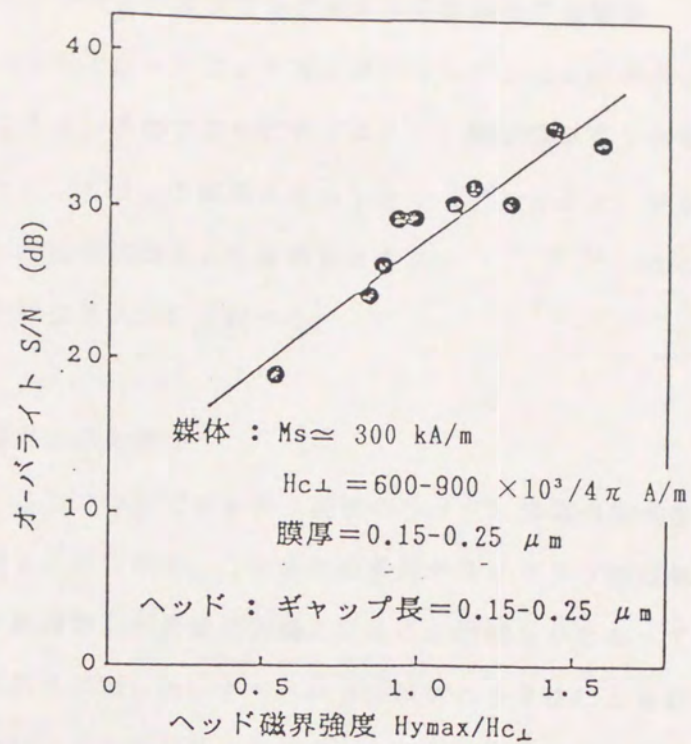


図 5. 2 2 垂直方向記録磁界強度と  
オーバーライト S / N の関係

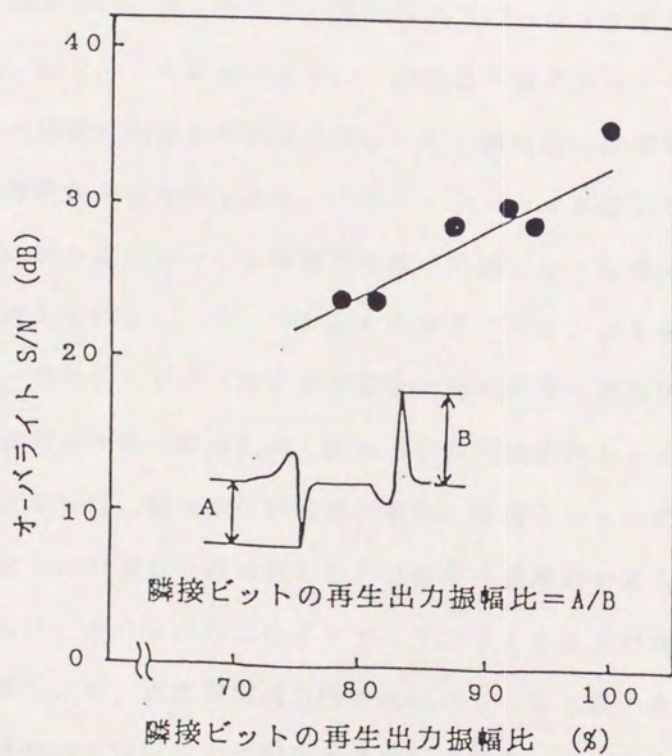


図 5. 2 3 隣接ビットの再生出力振幅比と  
オーバーライト S / N の関係



#### 5-4 5. 25インチ大容量フロッピ装置の記録再生系の検討

リング型磁気ヘッドとCo-Cr単層膜媒体からなる垂直記録系により、表5. 6に示すように、5. 25インチのフロッピディスクで、線記録密度100k BPI (Bit Per Inch)、トラック密度200 TPI (Track Per Inch)、記憶容量34 MB/片面を目標とした装置を試作した<sup>(5-6)</sup> <sup>(5-7)</sup>。ここでは、この試作装置の記録再生系の検討結果について述べる。

##### 5-4-1 記録再生系の概要

図5. 24に、このフロッピディスク装置のヘッドと媒体の構成を示す。また、ヘッドと媒体の仕様を表5. 7に示す。これまでの検討から、リング型磁気ヘッドによる垂直記録系ではヘッドの記録能力が最重要課題となることが明らかとなっており、この点に特に留意して記録再生系を構築した。まず、ヘッドはスパッタ法により形成したCo-Nb-Zr非晶質薄膜をMnZnフェライトブロックで挟み込んだ複合型磁気ヘッドとした。ギャップ近傍を高飽和磁束密度（飽和磁束密度 $B_s \approx 1.0\text{ T}$ ）とすることにより、ヘッド記録磁界強度の向上を図っている。また、リング型磁気ヘッドの垂直方向の記録磁界はスペーシング依存性が大きいので、ヘッド・媒体間のスペーシングを狭くかつ安定に保つ必要がある。そこで、図5. 25に示すように、従来は平坦であったヘッドチップを埋め込むヘッドスライダの媒体対向面を楕円面形状とした。楕円面の曲率半径は、円周方向が300 mm、半径方向が90 mmである。このヘッドスライダにより、従来の塗布型記録媒体と機械的性質の異なるCo-Cr単層膜媒体で問題となった媒体のミクロな変形によるスペーシングの増大を抑圧し、0.05  $\mu\text{m}$ の狭スペーシングを安定に保つことが可能となった。しかし一方で、ヘッドスライダの媒体対向面を楕円面形状とすることによりヘッド・媒体の接触面積が小さくなるため、媒体の耐摩耗性の向上を狙った保護膜および潤滑膜の開発が必要となった。種々の材料探索の結果、膜厚20 nmの非晶質B保護膜をCo-Cr記録膜の上に形成し、潤滑剤としては高分子潤滑剤であるフオンブリンを用いることとした。媒体は、50  $\mu\text{m}$ のポリイミドベースフィルム上に真空蒸着法を用いて作成した。記録膜に関しては、垂直磁気異方性の高いCo-Cr膜であること、さらに記録磁界強度と記録膜膜厚および保磁力の関係を考慮して表5. 7に示す仕様のCo-Cr膜をGe下地膜の上に形成した。



表 5. 6 5. 25 インチ大容量フロッピ装置の仕様

|                 |       |
|-----------------|-------|
| 記憶容量 (MB)       | 3 4   |
| 線記録密度 (k B P I) | 1 0 0 |
| トラック密度 (T P I)  | 2 0 0 |
| 変調方式            | M F M |
| 転送速度 (k B / s)  | 6 2 5 |
| 回転数 (r p m)     | 3 0 0 |
| 平均アクセス時間 (m s)  | 9 5   |

M F M : Modified Frequency Modulation

表 5. 7 試作フロッピディスク装置のヘッドおよび媒体の仕様

(a) ヘッドの仕様

| 材料                   | ギャップ長<br>( $\mu\text{m}$ ) | トラック幅<br>( $\mu\text{m}$ ) | 巻線数<br>(turn) | 飽和磁束密度<br>(T) | 比透磁率    |
|----------------------|----------------------------|----------------------------|---------------|---------------|---------|
| CoNbZr+<br>MnZnフェライト | 0. 2 2                     | 7 4                        | 3 5 + 3 5     | 1. 0          | 1 0 0 0 |

(b) 媒体の仕様

| 飽和磁化<br>(kA/m) | 保磁力<br>( $\times 10^3 / 4\pi$ A/m) | 角形比     |      | CoCr膜厚<br>( $\mu\text{m}$ ) | Ge膜厚<br>( $\mu\text{m}$ ) | B保護膜厚<br>( $\mu\text{m}$ ) |
|----------------|------------------------------------|---------|------|-----------------------------|---------------------------|----------------------------|
|                |                                    | $\perp$ | //   |                             |                           |                            |
| 310            | 820                                | 0.21    | 0.08 | 0.22                        | 0.03                      | 0.02                       |



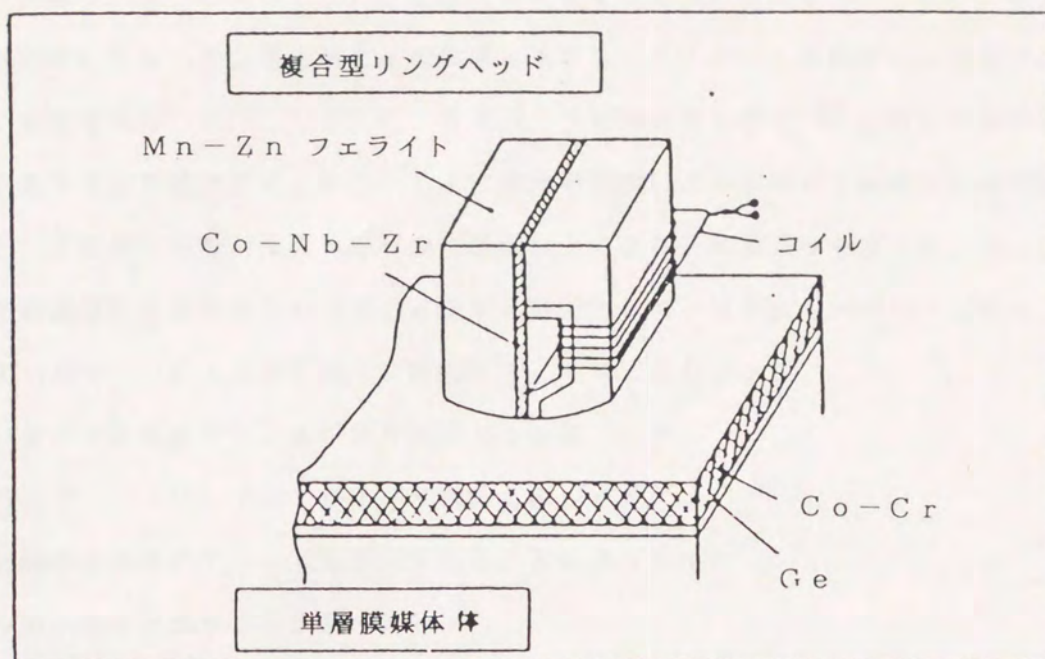


図5. 24 フロッピディスク用ヘッド・媒体構造

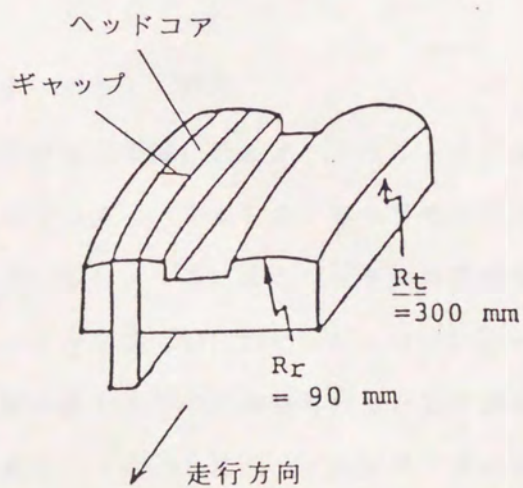


図5. 25 ヘッドスライダの構造



#### 5-4-2 記録再生特性

リング型磁気ヘッドとCo-Cr単層膜媒体からなる垂直記録系を用いた試作装置では、再生信号のゼロクロスの位置を磁化反転位置とみなし、ゼロクロスの位置から再生パルスを作る。記録情報の"1"、"0"は、再生パルスが弁別窓と呼ぶ一定の時間間隔のなかに含まれるか否かで判定する。再生パルスは種々の要因により本来の位置から位相ずれを生じる。この位相ずれ量が大きくなり弁別窓幅以上になると弁別誤りを起こす。デジタル磁気記録装置における再生パルスの位相ずれ要因として、以下のものが挙げられる。

- 1) オーバライトによる消し残りに起因するノイズによるジッタ
- 2) パターンを記録することにより発生する位相シフト
- 3) ヘッド・アンプ・ディスクのノイズによるジッタ
- 4) 記録時と再生時でヘッド位置がずれることによるジッタ
- 5) 弁別回路に起因する弁別窓のジッタ

このうち、1)～3)は記録再生特性が直接関係する。そこで、1)に対応してオーバライト特性、2)に対応して位相シフト特性、3)に対応して、信号振幅 $S$ とヘッド・アンプ・ディスクのノイズ $N$ との関係、いわゆる $S/N$ について検討した結果について述べる。なお、以下で述べる記録再生特性の検討は、装置動作マージンの最も厳しいディスク最内周の条件で行った。従って、媒体の周速は $1.2\text{ m/s}$ である。

##### 5-4-2-1 オーバライト特性

デジタル磁気記録装置では、通常オーバライト $S/N$ は $26\text{ dB}$ 以上を要求されており、今回の試作装置でもオーバライト $S/N$ の目標は $26\text{ dB}$ とした。この目標値は、オーバライトによる消し残りノイズによるジッタが弁別窓幅の $3.2\%$ であることを意味する。ところで、5-3-3節で明らかにしたように、オーバライト $S/N$ を $26\text{ dB}$ 以上とするには、記録膜の最下層での記録磁界強度が記録膜の保磁力以上とする必要がある。

図5.26は、表5.7に示したヘッドの条件で垂直方向の最大磁界強度とヘッド表面からの距離の関係を計算機シミュレーションにより解析した結果である。ヘッドのギャップ長は $0.20\text{ }\mu\text{m}$ で計算した。なお、ヘッドへ印加した起磁力はヘッド飽和が開始する点での起磁力を選んだ。試作装置では、ヘッド・媒体間のスペーシングは $0.05\text{ }\mu\text{m}$ である。従って、この図から、B保護膜厚を $0.02\text{ }\mu\text{m}$ として、膜厚 $0.22\text{ }\mu\text{m}$ のCo



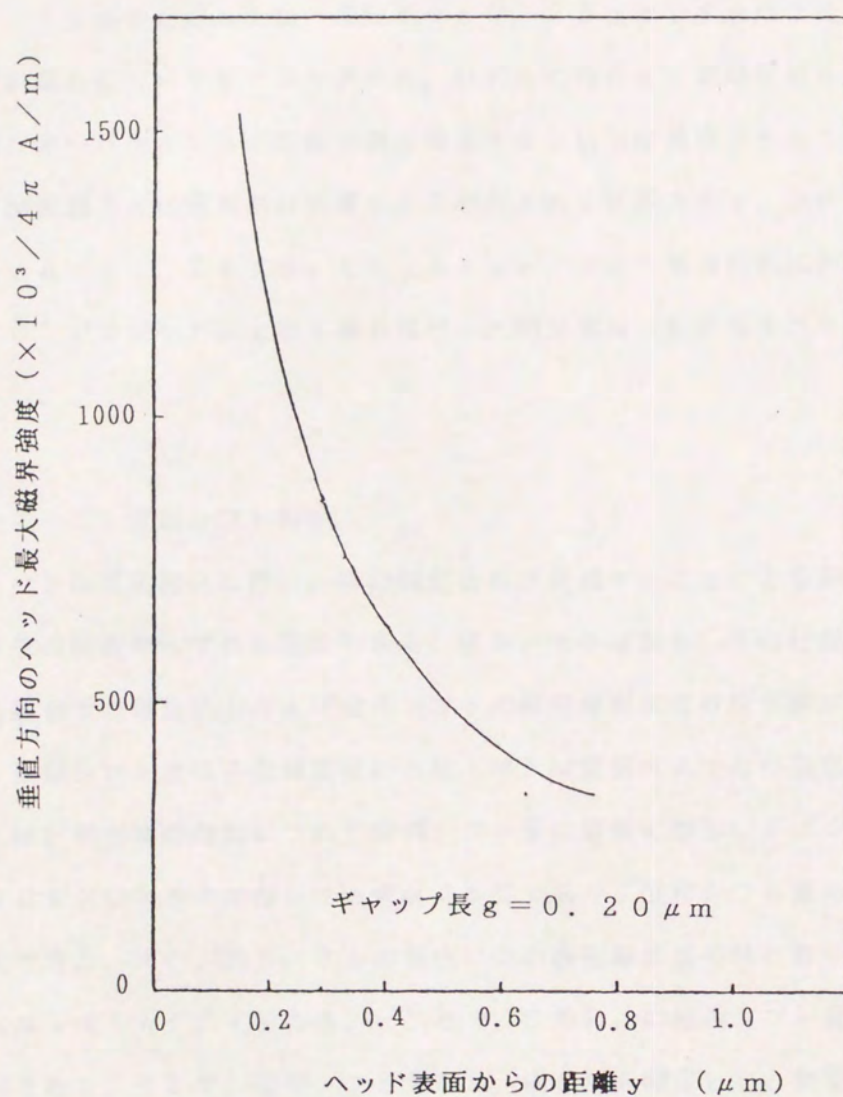


図 5. 26 垂直方向記録磁界強度と  
ヘッド表面からの距離の関係



—Cr 記録膜の最下層での最大磁界強度は約  $850 \times 10^3 / 4\pi$  (A/m) であり、Co—Cr 記録膜の保磁力以上の磁界強度が得られることがわかる。

図5. 27に表5. 7の仕様を満足するヘッドと媒体の組合せでオーバーライト特性を測定した結果を示す。具体的なオーバーライトS/Nの測定は、試作装置で採用したMFM変調方式 (Modified Frequency Modulation) での最長ビット長  $0.5 \mu\text{m}$  で記録した後、最短ビット  $0.25 \mu\text{m}$  でオーバーライトした場合、およびその逆の場合についてS/Nを求めた。いずれの場合も、記録電流  $6 \text{ mA}_{\text{op}}$  以上を印加すれば、オーバーライトS/Nの目標仕様  $26 \text{ dB}$  以上は達成できることがわかった。なお、MFM変調方式は磁気記録装置でよく利用される変調方式で、NRZ—I (Non-Return to Zero Inverse) 方式の電流反転法則に加え、データビットの“0”が2ビット以上続く場合はビット間で電流反転を発生させ、自己同期能力を高めている。

#### 5-4-2-2 位相シフト特性

位相シフトは高密度化に伴い、隣接磁化反転が近接することによる相互干渉で磁化反転位置が本来の位置からずれる現象である。図5. 28は表5. 7の仕様を満足するヘッドと媒体の組合せで再生出力および位相シフトの線記録密度依存性を測定したものである。ここで、位相シフト量は各記録密度におけるMFM変調方式での弁別窓幅に対する割合で表した。線記録密度の増加につれて位相シフト量は急激に増加していくが、目標の線記録密度  $100 \text{ k FCI}$  での位相シフト量は  $28\%$  であり、位相シフト量の目標仕様  $30\%$  以下を達成できた。また、図5. 28の再生出力の線記録密度特性における出力半減線記録密度  $D_{50}$  は  $145 \text{ k FCI}$  である。ところで、この  $D_{50}$  に位相シフト量は強く依存することが予想される。そこで、位相シフト量の  $D_{50}$  依存性を測定した。結果を図5. 29に示す。位相シフト量は  $100 \text{ k FCI}$  での値である。これより、位相シフト量は  $D_{50}$  の増加につれて単調に減少して、 $D_{50} = 175 \text{ k FCI}$  で0となる。この図から、目標である位相シフト量  $30\%$  以下を達成するには  $D_{50}$  は  $140 \text{ k FCI}$  以上とする必要がある。そのためには、5-3-1節の  $D_{50}$  とヘッドギャップ長との関係を検討した図5. 18の結果より、ヘッドギャップ長は  $0.22 \mu\text{m}$  以下とする必要がある。



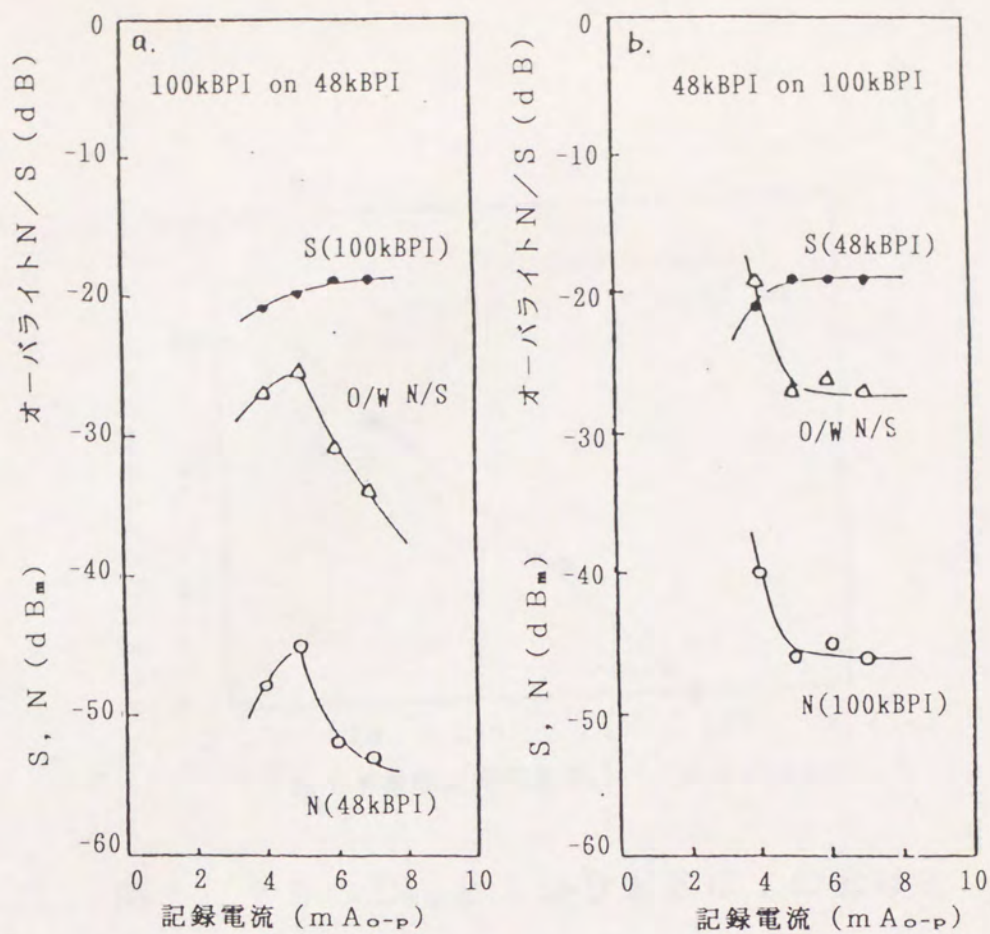


図 5. 27 オーバライト特性

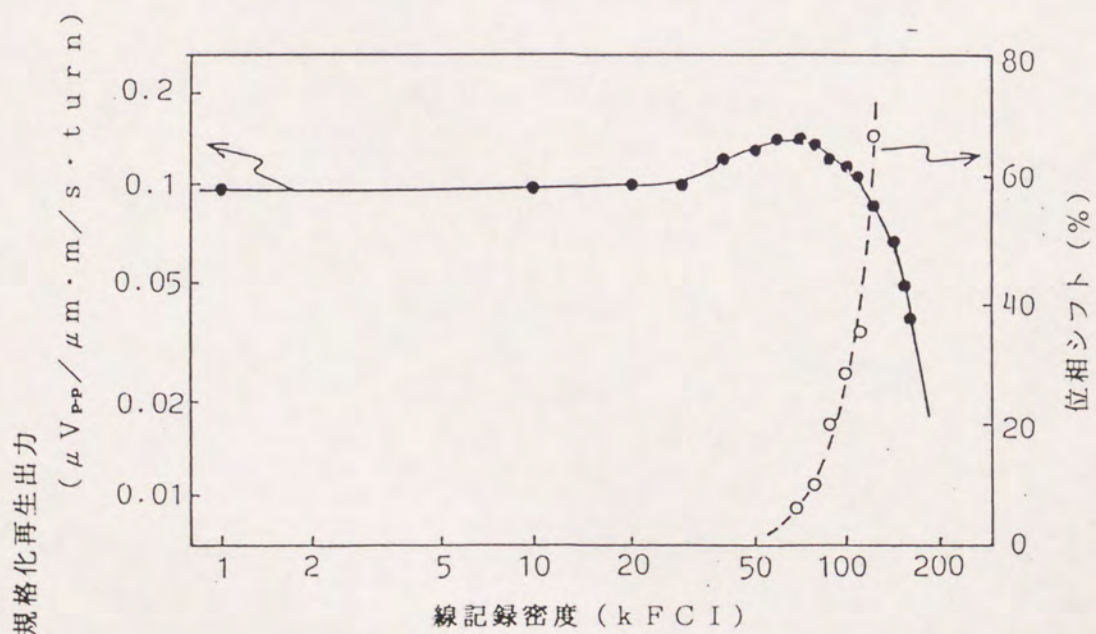


図 5. 28 再生出力と位相シフトの線記録密度依存性



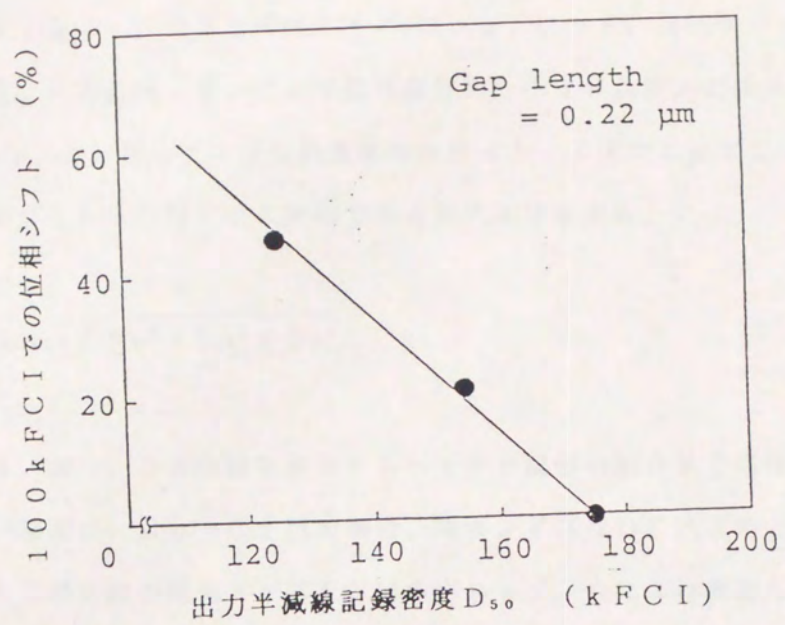


図 5. 29  $D_{50}$  と 100 k FCI における  
位相シフトの関係



#### 5-4-2-3 出力対雑音比

磁気記録装置の雑音要因には、a) 記録磁化状態の揺らぎや磁気特性の不均一性等により媒体から発生するノイズである媒体ノイズ $N_D$ 、b) ヘッド、接続ケーブルおよび再生回路の入力容量、入力抵抗、ダンピング抵抗を含めたヘッド共振系の損失分により生ずるヘッドノイズ $N_H$ 、c) 再生アンプで発生するホワイトノイズであるアンプノイズ $N_A$ がある。雑音の総和はこれらの雑音の2乗和である次式より求まる。

$$N_{HAD} = \sqrt{N_D^2 + N_H^2 + N_A^2} \quad (5-3)$$

図5.30は、表5.7の仕様を満足するヘッドと媒体の組合せで媒体ノイズを測定した結果である。測定は、Co-Cr膜の場合、媒体ノイズはDC消去時と信号記録時で大差ないため、DC消去時の媒体ノイズをRMSボルトメータにより測定した。この図より、記録周波数2.36MHz、カットオフ周波数4.25MHzの試作装置条件での規格化媒体ノイズは7.0(nVrms/ $\sqrt{T_w \cdot \text{turn}}$ )となる。ここで、 $T_w$ はトラック幅、turnはヘッドコイルの巻数である。試作装置では、表5.6に示したようにトラック幅74 $\mu\text{m}$ 、コイル巻数は再生時は70turnのヘッドを用いるため、媒体ノイズは4.2 $\mu\text{Vrms}$ となる。これにヘッドノイズとアンプノイズを加えた試作フロッピディスク装置のノイズの総和 $N_{HAD}$ は、7.2 $\mu\text{Vrms}$ と見積もれた。一方、100kFCIでの規格化再生出力は、図5.28より、0.12( $\mu\text{Vp-p}/\mu\text{m} \cdot \text{m/s} \cdot \text{turn}$ )である。トラック幅74 $\mu\text{m}$ 、コイル巻数70turnおよび媒体周速1.2(m/s)を代入して、試作フロッピディスク装置条件での再生出力を求めると、0.76mVp-pとなる。従って、信号対雑音比 $S(p-p)/N(\text{rms})$ は、40.5dBとなった。

ところで、ヘッド・アンプ・ディスクのノイズによるジッタ $T_{JHAD}$ は、信号を振幅 $S_{p-p}$ の正弦波と仮定し、ヘッド・アンプ・ディスクノイズ $N_{HAD}$ の振幅を $N_{p-p}$ とすると、次式で表される。

$$T_{JHAD} (\mu\text{s}) = \{ \sin^{-1} (N_{p-p}/S_{p-p}) \} / (\pi \cdot f_w) \quad (5-4)$$

$f_w$ : 記録周波数 (MHz)



また、ヘッド・アンプ・ディスクのノイズによるジッタを弁別窓幅に対する割合として求める場合、MFM変調方式では次式で求められる。

$$T_{JHAD}(\%) = (2/\pi) \cdot \sin^{-1}(N_{p-p}/S_{p-p}) \quad (5-5)$$

これらの式を適用してヘッド・アンプ・ディスクのノイズによるジッタを見積もるためには、ヘッド・アンプ・ディスクノイズをrms値からp-p値に変換する必要がある。この点に関しては、実験的に換算係数が求められており、エラーレート $10^{-7}$ の場合、換算係数は10である。従って、S/Nの実測値から算出されるヘッド・アンプ・ディスクノイズによるジッタ $T_{JHAD}(\%)$ は、6%と見積もることができる。通常の装置では、 $T_{JHAD}(\%)$ は20~30%で動作させており、今回の試作装置では非常に良好なS/Nが得られていることになる。S/Nの更なる改善に関しては、10nm程度の極薄の軟磁性材料をCo-Cr膜の下に配置することにより、記録磁界分布を劣化させることなく記録膜内部の自己減磁界を低減させてS/Nを改善できることを確認した<sup>(5-17) (5-18) (5-19)</sup>。今後は位相シフト量低減のための高分解能ヘッド構造や信号処理方式等が更なる高密度化の重要課題となろう。

#### 5-4-2-4 装置動作マージンの評価

以上に述べた記録再生特性の検討結果をもとに、表5.6に示した5.25インチの大容量フロッピディスク装置の装置動作マージンを評価した結果について述べる。

図5.31は、装置が正常に動作するために必要なS/Nと位相シフト量の関係を示している。ハッチングで示した領域が正常な動作が可能な領域である。図中の黒点は、表5.7の仕様のヘッドと媒体の組合せで、これまでに得られた記録再生特性をもとに、線記録密度をパラメータとしてS/Nと位相シフト量を求めてプロットしたものである。線記録密度100k BPIが表5.6の装置仕様に相当する。この評価結果より、表5.7の仕様の記録再生系で達成可能な線記録密度の限界は110~120k FCIであり、表5.6で示した仕様の装置は十分に動作可能であるといえる。



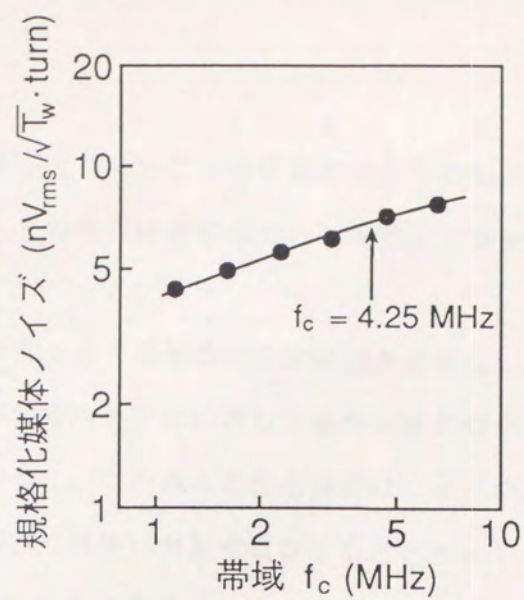


図 5. 3 0 媒体ノイズ特性

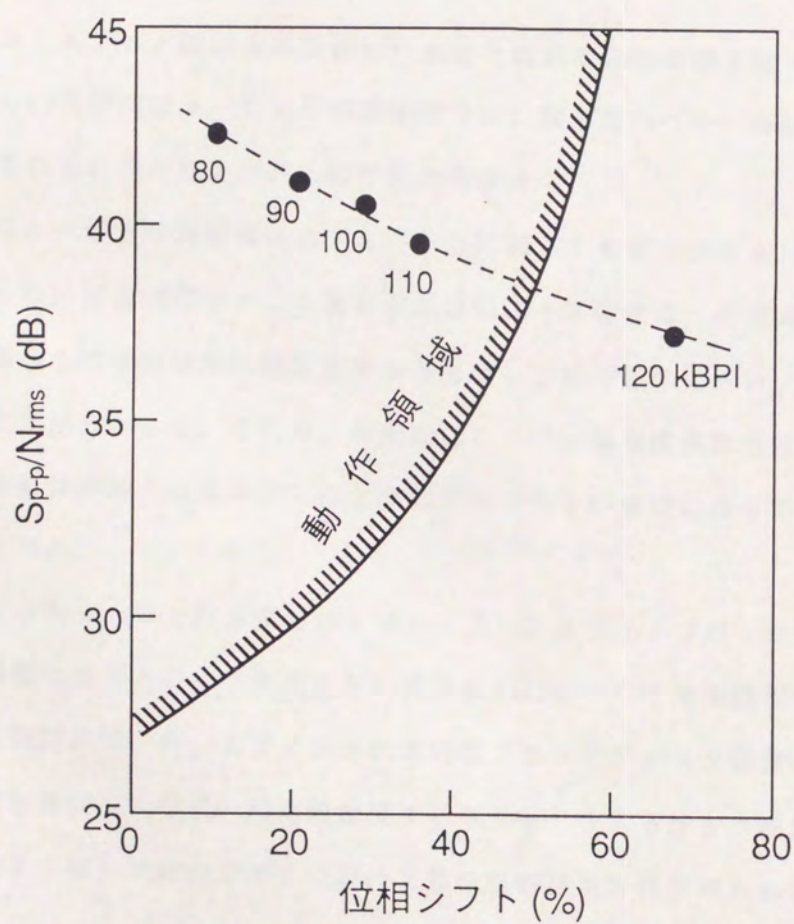


図 5. 3 1 装置動作マージンの評価



## 5-5 まとめ

リング型磁気ヘッドとCo-Cr単層膜媒体からなる垂直記録系の高密度化の条件を検討した。さらに、その検討結果に基づいて大容量フロッピディスク装置を試作評価し以下の結論を得た。

- (1) リング型磁気ヘッドの垂直方向の記録磁界分布は、リング型磁気ヘッドの長手方向あるいは単磁極ヘッドに比較して磁界勾配が緩やかであり高密度記録には適していない。従って、この系の高密度特性はCo-Cr単層膜媒体の垂直磁気異方性あるいは垂直配向性に大きく依存することをBitter法および電子線ホログラフィ法による記録磁化状態の観察と記録再生実験により明らかにした。
- (2) Ge下地膜を用いた高配向Co-Cr単層膜媒体の磁化機構についてさらに詳しく解析した結果、
  - a) Bitter法による記録膜の表面と裏面の磁化状態を種々の記録条件で観察し、高配向Co-Cr単層膜媒体では、膜厚方向への一斉回転型の磁化反転が生じていると推定される観察結果を得た。
  - b) Co-Cr単層膜媒体のノイズ特性に関しても配向性により大きな差異が認められ、高配向Co-Cr単層膜媒体のノイズ特性は、低配向Co-Cr単層膜媒体や長手記録用の薄膜媒体よりもむしろ塗布媒体に近いノイズ特性を有することが分かった。これは、高配向Co-Cr単層膜媒体では結晶粒子間の磁気的結合が弱く結晶単位の磁化反転が生じやすい構造になっていることを示唆している。
- (3) Co-Nb-Zr非晶質薄膜をMn-Znフェライトブロックで挟み込んだ複合型磁気ヘッドとGe下地膜を用いた高配向Co-Cr単層膜媒体を組み合わせた垂直記録系で、5.25インチの大容量フロッピディスク装置の条件で記録再生特性を評価した結果、線記録密度100k BPI、トラック密度200 TPI、容量34 MB/片面で十分に動作可能な記録再生特性が得られることが確認できた。



5 - 6 参考文献

- (5-1) J. Hokkyo and F. Kugiya : J. Magn. Jpn., Vol.13, Supplement, No.S1, p.1(1989)
- (5-2) 鈴木、岩崎 : 信学技報、MR81-8(1981)
- (5-3) F. Futamoto, Y. Honda, H. Kakibayashi and K. Yoshida : IEEE Trans. Magn., Vol.MAG-21, p.1426(1985)
- (5-4) F. Kugiya, M.Koizumi, F. Kanno, M. Suzuki, Y. Honnda, M. Futamoto, and K. Yoshida : IEEE Trans. Mgn., Vol.MAG-23, p.2362(1987)
- (5-5) Y. Honnda, M. Futamoto, T. Kawasaki, K. Yoshida, M. Koizumi, F. Kugiya, and A. Tonomura : Jpn. J. Appl. Phys., Vol.26, No.6, p.L923(1987)
- (5-6) T. Okuwaki, F. Kugiya, N. Kumasaka, K. Yoshida, N. Tsumita, and T. Tamura : IEEE Trans. Magn., Vol.MAG-21, No.5, p.1365(1985)
- (5-7) 釘屋、熊坂、吉田、奥脇、積田、田村 : 信学技報、MR84-54(1984)
- (5-8) 大内、岩崎 : 信学技報、MR86-7(1986)
- (5-9) A. Aharoni : J. Appl. Phys., Vol.30, Supplement, p.70(1959)
- (5-10) C. Byun, J.M. Sivertsen, and J.H. Judy : IEEE Trans. Magn., Vol.MAG-22, No.5, p.1155(1986)
- (5-11) S. Hasegawa, T. Kawasaki, J. Endo, A. Tonomura, Y. Honda, M. Futamoto, K. Yoshida, F. Kugiya, and M. Koizumi : J. Appl. Phys., Vol.65, No.5, p.2000(1989)
- (5-12) K. Yoshida, Y. Honnda, T. Kawasaki, M. Koizumi, F. Kugiya, M. Futamoto, and A. Tonomura : IEEE Trans. Magn., Vol.MAG-23, No.5, p.2073(1987)
- (5-13) O. Kitakami, Y. Ogawa, H. Fujiwara, F. Kugiya, and M. Suzuki : IEEE Trans. Magn., Vol.25, No.3, p.2607(1989)
- (5-14) 北上、小川、釘屋、鈴木 : 信学技報、MR88-5(1988)
- (5-15) F. Kugiya, M. Suzuki, F. Kanno, K. Yoshida, O. Kitakami, H. Fujiwara, and D.E. Speliotis : J. Appl. Phys., Vol.63, No.8, p.2908(1988)
- (5-16) 青井、釘屋、土屋、鈴木 : 日本応用磁気学会誌 Vol.12, No.2, p.151(1988)



Vol.MAG-2, p.208(1966)

(5-17) 鈴木、釘屋、吉田、北上 : 信学技報、MR88-6(1988)

(5-18) O. Kitakami, Y. Ogawa, S. Yamagata, H. Fujiwara, F. Kugiya, and M. Suzuki  
: IEEE Trans. Magn., Vol.25, No.5, p.4177(1989)

(5-19) M. Suzuki, F. Kugiya, K. Yoshida, and O. Kitakami : J. Magn. Jpn., Vol.13,  
Supplement, No.S1, p.27(1989)

(5-20) 加藤、釘屋、奥脇、青井 : 昭和60年度電子通信学会半導体・材料部門全国大会  
1-41(1985)



## 第6章 結論

近年の高度情報化社会の進展にともない、情報を蓄積するためのファイルメモリの大容量化、高密度化への要求は益々強まっている。デジタル磁気記録装置は計算機用ファイルの中心的役割を担い、その記録密度は5年で約4倍のペースで推移してきており、今後はサブミクロンのビット間隔の高密度装置の実現が要求されている。

本研究は、このような背景のもとに、従来からの長手記録方式と高密度化の新しいアプローチである垂直記録方式に関して、磁気ヘッドおよび記録媒体の材料と構造が高密度領域における記録再生機構に及ぼす影響を定量的に把握し、高密度化の指針を得ることを目的とした。以下に各章の内容を総括する。

第1章「序論」では、従来からの長手記録方式においてもヘッドと媒体は新しい材料へと移行しつつあること、さらには、高密度記録方式として垂直記録方式が注目されていること等、本研究の背景および位置付けについて概観した。

第2章「磁気ヘッドの記録磁界の解析」では、2次元静磁場の記録磁界を有限要素法により数値解析するシミュレータを活用して、リング型磁気ヘッドによる長手記録ならびに垂直記録と主磁極励磁型単磁極ヘッドによる垂直記録の3方式の記録磁界を解析し、各方式における高密度化の条件を明らかにすることを試みた。その結果、1) リング型磁気ヘッドによる長手記録では、記録磁界勾配のスペーシング依存性ならびにヘッド飽和の影響が大きいことを考慮した記録再生系の設計が必要なこと、2) リング型磁気ヘッドによる垂直記録系では、他の2方式に比べ記録性能が劣るため、高密度化は媒体の垂直異方性に強く依存すると推定されること、3) 主磁極励磁型単磁極ヘッドによる垂直記録系では、記録磁界は単磁極ヘッドと媒体の軟磁性下層膜が磁氣的な結合した閉磁路構造のため、記録磁界の改善にはヘッドと媒体の軟磁性下層膜との磁氣的結合を強めるための軟磁性材料の高透磁率化やヘッド構造設計が高密度化のキーポイントであること、などの知見が得られた。

第3章「リング型磁気ヘッドによる記録再生系のスペーシング損失の解析」では、3方式のなかでも特にスペーシングの影響が懸念されるリング型磁気ヘッドによる垂直磁



気記録方式を中心に検討した。その結果、十分な記録磁界強度が得られる条件で記録を行えば、再生スペーシング損失に関しては長手記録と同等の値になるとともに、記録再生スペーシング損失は波長依存性をもたないという新たな知見を得ることができた。さらに、再生過程のシミュレーションにより、再生スペーシング損失を解析した結果、狭スペーシング領域の再生スペーシング損失を検討する場合には、ヘッド・媒体間の磁氣的相互作用の影響を考慮する必要があることを明らかにした。

第4章「リングヘッドと塗布媒体からなる長手記録系による高密度記録」では、まず、本研究で開発した記録再生シミュレータは、磁性粒子単体の磁化反転モデルとして扁長回転楕円体カーリングモデルを用いることにより、磁化曲線および記録再生特性が実測と良く一致する高精度な記録再生シミュレータであることを示した。さらに、上記記録再生シミュレータにより、塗布媒体の磁気パラメータと記録再生特性の関係を解析した結果、保磁力、飽和磁束密度、記録膜厚等の従来から着目されている磁気パラメータとともに、磁性粒子の配向性や磁気特性の均一性が記録再生特性を決定する重要なパラメータであることを明らかにした。また、磁気特性の均一性に優れたバリウムフェライトは比較的低保磁力で良好な高密度特性が得られることを示した。

第5章「リングヘッドとCo-Cr媒体からなる垂直記録系による高密度記録」では、リング型磁気ヘッドを用いた垂直記録系で高密度記録を実現するには、垂直配向性の良好なCo-Cr媒体が要求されることをBitter法および電子線ホログラフィ法による記録磁化状態の観察と記録再生実験を併用することにより明らかにした。また、高配向Co-Cr単層膜媒体では、膜厚方向への一斉回転型の磁化反転が生じていることや、結晶粒子間の磁氣的結合が弱く結晶単位の磁化反転が生じやすい構造になっていることが推定される等の新たな知見を得ることができた。さらに、この高配向Co-Cr単層膜媒体とCo-Nb-Zr非晶質薄膜をMn-Znフェライトブロックで挟み込んだ複合型磁気ヘッドとを組み合わせた垂直記録系で、5.25インチの大容量フロッピーディスク装置を試作評価した結果、線記録密度100k BPI、トラック密度200 TPI、容量34MB/片面で十分に動作可能な記録再生特性が得られることが確認できた。



## 謝辞

本論文の執筆にあたり、終始、懇切なるご指導ご鞭撻を賜った大阪大学 基礎工学部 システム工学科 白江公輔教授に厚く御礼申し上げます。また、本論文をまとめる過程で、ご討論、ご助言をいただきました大阪大学 基礎工学部 システム工学科 辻三郎教授、井口征士教授、並びに沼田卓久助教授に厚く御礼申し上げます。

本論文は、(株)日立製作所 中央研究所にておこなった研究の成果をまとめたものである。本研究を通じて、終始ご指導並びにご激励を賜った(株)日立製作所 中央研究所 主管研究員 青井基博士、元同所主任研究員 田村喬氏(現在、(株)日立製作所 ストレージシステム事業部 技術管理センタ長)、並びに元小田原工場 主管技師長 堤 正義氏(現在、日立京浜工業専門学院長)に心より御礼申し上げます。本研究は、同研究所磁気記録研究グループ、日立マクセル(株)筑波研究所、及び(株)日立製作所 ストレージシステム事業部 磁気ディスク装置設計部の多くの方々の協力を得て成しえたものである。ここに深く感謝申し上げます。特に、共同研究者として絶大なる協力を頂いた(株)日立製作所中央研究所 小泉真氏、同赤城文子氏、同鈴木幹夫氏、同加藤泰弘氏、同二本正昭博士、同吉田和悦博士、同本多幸雄博士、日立マクセル(株)筑波研究所 北上修氏、同藤原英男博士(現在、アラバマ大学 客員教授)、電子線ホログラフィによる磁化状態の観察でご協力頂いた(株)日立製作所 基礎研究所 主管研究員 外村彰博士とそのグループの方々に心から感謝します。さらには、所内討論会等を通じて、磁性および記録機構に関する適切なるご助言を賜った(株)日立製作所 中央研究所 技師長 杉田愼博士、同主任研究員 上坂保太郎博士に厚く御礼申し上げます。

また、本研究を継続してゆくにあたり、ご支援、激励を賜った元(株)日立製作所 中央研究所 所長 土井俊雄博士(現在、日立マクセル(株)監査役)元同所 所長 武田康嗣博士(現在、(株)日立製作所常務取締役)元同所 所長 堀越 彌 博士(現在、コンピュータ事業本部 製品企画本部長)、元第6部長千葉常世博士(現在、主管研究員)、元第6部長堤善治氏(現在、日立マクセル(株)筑波研究所 第2セクター長)、並びに元同所第2部長 角田義人博士(現在、(株)日立製作所 日立研究所 画像エレクトロニクス部長)並びにストレージ研究センター長 鈴木 良 博士に深く感謝いたします。



## 本研究に関する発表論文

### 1. 筆頭論文

- (1) F.Kugiya, M.Koizumi, T.Okuwaki, K.Shinagawa, Y.Uesaka, T.Tamura, and H.Fujiwara ; "Studies of Spacing Loss in Longitudinal and Perpendicular Recording", J.Appl.Phys., 55(6), 15 March pp.2220(1984).
- (2) F.Kugiya, M.Koizumi, F.Kanno, Y.Uesaka, T.Okuwaki, and T.Tamura; "Head Saturation Effects in Perpendicular and Longitudinal Recording", IEEE Trans. on Mag., Vol.MAG-21, No.5, September pp.1411(1985).
- (3) F.Kugiya, M.Koizumi, F.Kanno, M.Suzuki, Y.Honnda, M.Futamoto, and K.Yoshida "Switching Mechanism of Co-Cr Films with Ge Underlayer", IEEE Trans. on Mag., Vol.MAG-23, No.5, September pp.2362(1987).
- (4) F.Kugiya, M.Suzuki, F.Kanno, Y.Yoshida, O.Kitakami, H.Fujiwara, and D.E.Speliotis; "Influence of Oxygen on Recording Characteristics in Vacuum-Evaporated Co-Cr Thin Films", J.Appl.Phys., 63(8), 15 April pp.2908 (1988).
- (5) M.Tsutsumi, F.Kugiya, N.Kodama, M.Suzuki, M.Koizumi, and F.Akagi; "Read/Write Simulation of Ba-Ferrite Particulate Media", J.Appl.Phys., Vol.69(8), 15 April pp4493(1991)

### 2. 副論文

- (1) K.Shinagawa, H.Fujiwara, F.Kugiya, T.Okuwaki, and M.Kudo; "Simulation of Perpendicular Recording on Co-Cr Media with a Thin Permalloy Film-Ferrite Composite Head"; J.Appl.Phys., 53(3), March pp.2585(1982).
- (2) T.Okuwaki, F.Kugiya, N.Kumasaka, K.Yoshida, N.Tsumita, and T.Tamura; "5.25 Inch Floppy Disk Drive Using Perpendicular Magnetic Recording", IEEE Trans. on Mag., Vol.MAG-21, No.5, September pp.1365(1985).
- (3) Y.Honda, M.Futamoto, T.Kawasaki, K.Yoshida, M.Koizumi, F.Kugiya, and A.Tonomura: "Observation of Magnetization Structure on Co-Cr Perpendicular Magnetic Recording Media By Bitter and Electron Holography Methods", JJAP, Vol.26, No.6, June pp923(1987)
- (4) Y.Yoshida, Y.Honda, T.Kawasaki, M.Koizumi, F.Kugiya, M.Futamoto, and A.Tonomura; "Measurement of Intensity of Recorded Magnetization on Co-Cr Film by Electron Holography", IEEE Trans. on Mag., Vol.MAG-23, No.5, September pp.2073(1987).
- (5) 菅野 文子、釘屋 文雄、中村 慶久; "媒体磁気特性を考慮した記録磁界の計算", 日本応用磁気学会誌、Vol.12, No.2, pp.137(1988).
- (6) 青井 基、釘屋 文雄、土屋 鈴二郎、鈴木 幹夫; "連続媒体ノイズ要因の一考察", 日本応用磁気学会誌、Vol.12, No.2, pp.151(1988).



- (7) S.Hasegawa, T.Kawasaki, J.Endo, A.Tonomura, Y.Honda, M.Futamoto, K.Yoshida, F.Kugiya, and M.Koizumi; "Sensitivity-Enhanced Electron Holography and its Application to Magnetic Recording Investigations", J.Appl.Phys., 65(5), 1 March pp.2000(1989).
- (8) M.Tsutsumi, F.Kugiya, S.Hasegawa, and A.Tonomura; "A Study on Magnetization Model for Particulate Media", IEEE Trans. on Mag., Vol.25, No.5, September pp.3665(1989).
- (9) M.Suzuki, F.Kugiya, K.Yoshida, and O.Kitakami; "R/W Characteristics of Ring Head/Co-Cr Media with Soft Magnetic Underlayer", J.Mag.Jpn., Vol.13, Supplement, No.S1, pp.27(1989)
- (10) O.Kitakami, Y.Ogawa, S.Yamagata, H.Fujiwara, F.Kugiya, and M.Suzuki; "Improvement of the Reproduced Output of Co-Cr Thin Film Media by Insertion of Very Thin Soft Magnetic Underlayer", IEEE Trans. on Mag., Vol.25, No.5, September pp4177(1989)
- (11) O.Kitakami, Y.Ogawa, H.Fujiwara, F.Kugiya, and M.Suzuki; "Influence of Initial Growth Layer and Ti Underlayer on Magnetic Properties and Recording Characteristics of Very Thin Films of Evaporated Co-Cr Media", IEEE Trans. on Mag., Vol.25, No.3, May pp2607(1989)
- (12) K.Yoshida, K.Imagawa, F.Kugiya, H.Daimon, S.Yamagata, O.Kitakami, and H.Yasuoka; "Heat Treatment Effect of Co-Cr Film on Read-Write Characteristics", J.Mag.Jpn., Vol.13, Supplement, No.S1, pp.425(1989)
- (13) M.Tsutsumi, F.Kugiya, F.Akagi, and I.Matsuyama; "Magnetization Model for R/W Simulation of Acicular Particulate Media", IEEE Trans. on Mag., Vol.26, No.5, September pp2113(1990)

### 3. 解説論文

- (1) J.Hokkyo and F.Kugiya: "Review on Perpendicular Magnetic Recording Development", J.Mag.Jpn., Vol.13, Supplement, No.S1, pp.1(1989)



