九州大学学術情報リポジトリ
Kyushu University Institutional Repository

高密度磁気記録における記録再生特性と磁化の熱安定性に関する研究

田中, 輝光

https://doi.org/10.15017/1398259

出版情報：九州芸術工科大学, 2002, 博士（工学）, 課程博士
バージョン：
権利関係：

KYUSHU UNIVERSITY

第4章

磁気ディスクにおける記録にじみの磁極形状依存性とオフトラック記録特性

4.1 節　序言

記録トラック諸特性の記録ヘッド磁極形状依存性に関する研究[11][18][26]-[31]は一般的に MFM（Magneto force microscope：磁気力顕微鏡）画像により行われており，その画像データから得られる情報により，高密度化に適している磁極形状はある程度わかっている．しかし，ハードディスクドライブでは再生をヘッドで行うため，記録にじみ特性，記録ヘッドフリンジ磁界の磁極形状依存性を再生ヘッドを用い解析するほうが，より実際のシステムに即していると考えられる．そこで，本章では記録トラックの両端を DC 消去したマイクロトラックを作成し，その再生出力の測定とビッター法によるマクロトラック幅の顕微鏡観察により，記録ヘッドフリンジ磁界の磁極形状を評価する[32][33]．また，これまで MFM 画像で確認されてきた記録トラック幅を再生出力により求める新たな測定方法を提案する[34]．

通常の記録・再生方式は広トラック記録・狭トラック再生であるが，前述したようにこの方法で高トラック密度化が行き詰まれば，狭トラックでの記録・再生が行われる．このような狭トラック記録・再生方式では，本来記録するべき位置から何らかの理由でヘッドの位置がずれてしまいオフトラックして記録（ミスレジストレーション記録）してしまった場合には隣接するトラックは大きなダメージを受ける．これは現在の広トラック記録・狭トラック再生では多少ミスレジストレーション記録が起こっても再生ヘッドが狭いため再生時の S/N にはあまり影響を与えない．しかし，狭トラック記録・再生方式の記録と再生のヘッドトラック幅がほとんど等しいような場合には，ミスレジストレーション記録により記録トラック自身はオーバーライトの消え残り（前歴信号の消え残り）によりノイズが増加，また，オントラック再生が出来なくなるため信号出力は低下し，S/N が大きく低下する．さらに記録トラックの一部をオーバーライトされた隣接トラックはオントラック再生しても信号出力は低下し，オーバーライト信号によるノイズの増加で S/N が低下し，エラーが増加する．この様な状況を考えミスレジストレーション記録により記録トラックの一部をオーバーライトされる隣接トラックが受ける影響について検討を行った[34]．

4.2節　記録特性に及ぼすフリンジ磁界の影響

Fig. 4.1 に記録ヘッドトラック幅，記録にじみ，記録ヘッドフリンジ磁界の広がり幅を定義する簡略図を示す．記録にじみは記録ヘッドが発生する記録磁界の幅が広くなる（記録ヘッドフリンジ磁界がトラック幅方向に広く分布する）ために生じ，記録ヘッドフリンジ磁界の広がりが大きいヘッドは高トラック密度化には不利である．その理由は記録ヘッドフリンジ磁界の広がりが大きいと隣接するトラックは記録磁化の一部を消去され再生時に出力が低下すると考えられるからである．

記録ヘッドフリンジ磁界の広がりの影響を調べるために，第 3 章で示したマイクロトラックを作成する．Fig. 4.2 に示すように，全面 DC 消去したディスクに連続信号を記録した後，記録トラックの両端を同一のヘッドで DC 消去して作成したマイクロトラックについて，その再生出力を測定する．同図に示すように DC 消去するときのヘッド端の間隔（Erasing head edge gap）を W_{eg} と定義し，W_{eg} を小さくしながら記録トラック中央で再生出力を測定する．W_{eg} が記録ヘッド幅よりも広い場合と狭い場合をそれぞれ状態(a)，(b)とする．再生出力の大きさは再生ヘッド感度分布

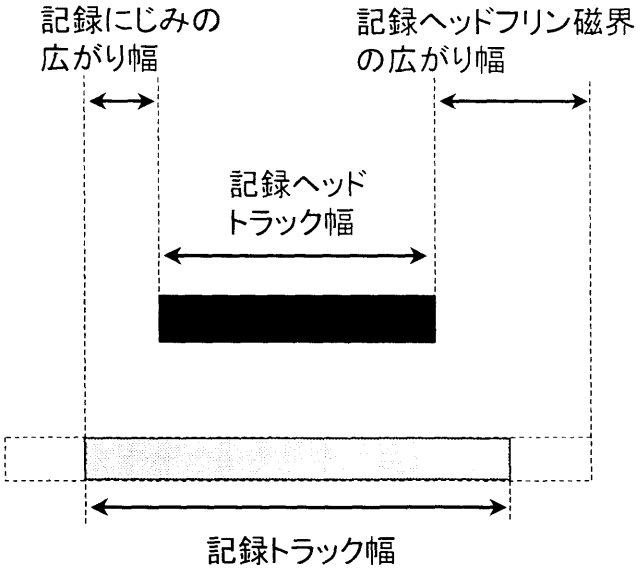


Fig. 4.1　記録ヘッドトラック幅，記録にじみ記録ヘッドフリンジ磁界の広がり幅の定義．

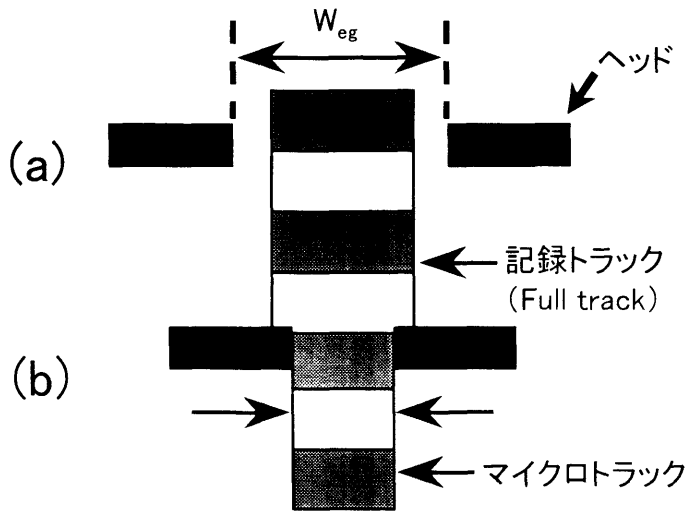


Fig. 4.2　W_{eg}の定義.

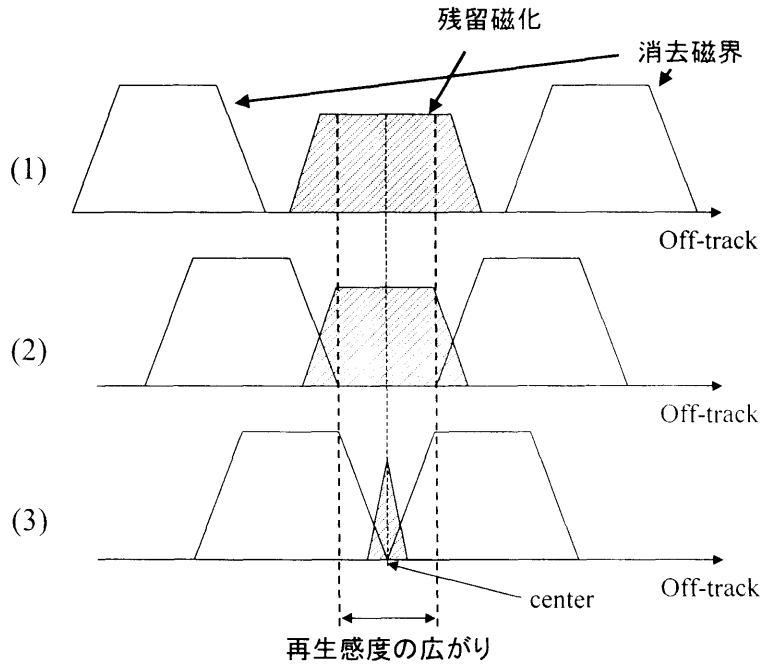


Fig. 4.3　マイクロトラック作成時の記録トラック残留磁化分布.

内の磁化の強度に比例する. Fig. 4.3 に狭トラック再生時の記録トラック磁化が消去される状態の簡略図を示す. 同図において, 状態(1)から(2)までは W_{eg} が小さくなっても出力の低下は起こらないが, 状態(2)より W_{eg} が小さくなると出力の減衰が起こる. 状態(2)から(3)の間で消去される磁化の量が W_{eg} の減少に比例する場合には, 再

生出力はW_{eg}の減少に比例して直線的に減衰する．

測定結果をFigs. 4.4，4.5に示す．Fig. 4.4は磁極形状の異なるHead #1，#2の測定結果，Fig. 4.5はHead #3の測定結果である．また，測定はDC消去電流をHead #1，#2では$2\times I_{90}$，$6\times I_{90}$の2通りとし，Head #3は$1.5\times I_{90}$とした．これらの消去電流値でヘッドが飽和していないことをオーバーライト特性により確認している．記録信号はすべて線密度が10 kFRPIの連続信号とした．両図において細線はフリンジ磁界と再生にじみのない理想的は場合を示す．この理想状態の推定結果はFig. 4.3のモデルにおいて残留磁化および消去磁界が台形ではなく完全な角型の場合を考えることで簡単に求めることが出来る．また，その理想状態に近いほど記録ヘッドフリンジ磁界の広がりは小さいと言える．Fig. 4.4において上下の磁極の幅が揃っていない（untrimmed）Head #1は理想状態を示す細線から大きく離れており，(a)領域で既に出力の減少が起こっている．この(a)領域での出力の減少は記録ヘッドフリンジ磁界の広がりがあまり大きくなくても再生にじみが大きければ生じる現象であるが，相反定理から考えてそのようなことは考え難い．よって，(a)領域での出力の減少はフリンジ磁界の広がりが大きいヘッドでは，再生にじみも大きくなり，理想状態を示す細線から大きく離れることになる．このことから，Head #1の記録ヘッドフリンジ磁界は大きく広がっていると言える．また，消去電流（記録の場合も同様）が大きくなると細線からのずれはより大きくなっており，記録ヘッドフリンジ磁界の広がりが大きくなっていることが分かる．一方，上下磁極の幅の揃った（trimmed）Head #2は理想状態を示す細線に非常に近くなっており，消去電流を大きくしてもほとんど変化はない．これらのことから，記録ヘッドの上下磁極の幅を揃えることは記録ヘッドフリンジ磁界の広がりを抑える上で非常に有効であることが分かる．また，消去電流値を大きくした測定結果から，上下磁極の幅を揃えたヘッドは励磁電流が大きくなるとヘッドに面する部分の磁界強度は増すがフリンジ磁界の強度はほとんど変化しないと言える．

Head #3のマージ型MRヘッドを用いた場合は，記録・再生ヘッドトラック幅が2μm・1.4μmであるため，理想的なグラフはW_{eg}が1.4μm以上の場合には1，そしてそれ以下では図示するように原点に向かって直線的に減衰する．Head #3の記録ヘッド磁極のシールドとしても用いられている側はトリミングが施されてはいる

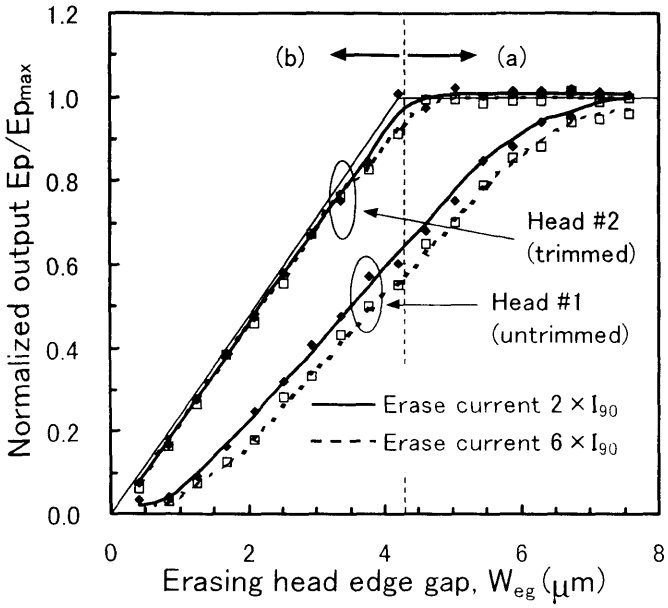


Fig. 4.4　Head #1, #2 における再生出力の W_{eg} 依存性.

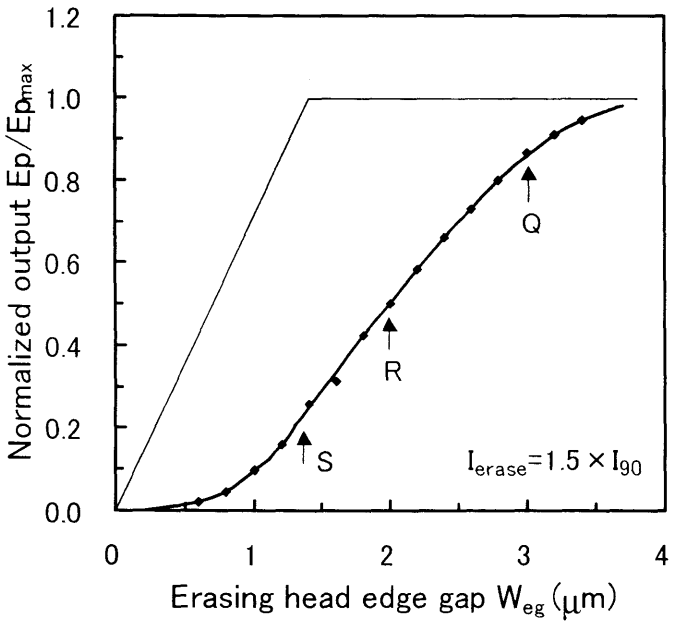


Fig. 4.5　Head #3 における再生出力の W_{eg} 依存性.

が上下磁極の幅は揃っていない．測定結果は細線から大きく離れており，記録ヘッドフリンジ磁界が非常に大きく広がっていることがわかる．

4.3節　Bitter法による観察

磁性コロイド溶液を用いて磁気現像するBitter法により記録トラック幅を顕微鏡観察した．3章で述べた手続きでマイクロトラックを作成し，ディスクに磁性コロイドの溶液を滴下した後，光学顕微鏡によりマイクロトラック幅を測定する．磁性コロイドはディスク表面の磁束が出入りする部分（磁化転移）に集まるため，MFMのような磁化の向きまでは分からない．

測定結果の写真をFig. 4.6に示す．同図において（a）フルトラック，（b）W_{eg} =（記録ヘッド幅）×0.8，（c）W_{eg} =（記録ヘッド幅）×0.4の場合を示す．Head #1, #2の（c）の写真から，Head #1はフリンジ磁界が広く分布しているためトラック端が大きく消されトラック幅が狭くなっていることが確認される．Head #3ではW_{eg}を小さくすると幅の広いビットパターンと狭いビットパターンが交互に現れている．これは媒体飽和磁界よりも小さいヘッドフリンジ磁界の広がりが大きく，印可磁界と逆の極性をもっていた磁化領域を十分にDC消去出来ていないことが原因であると考えられる．

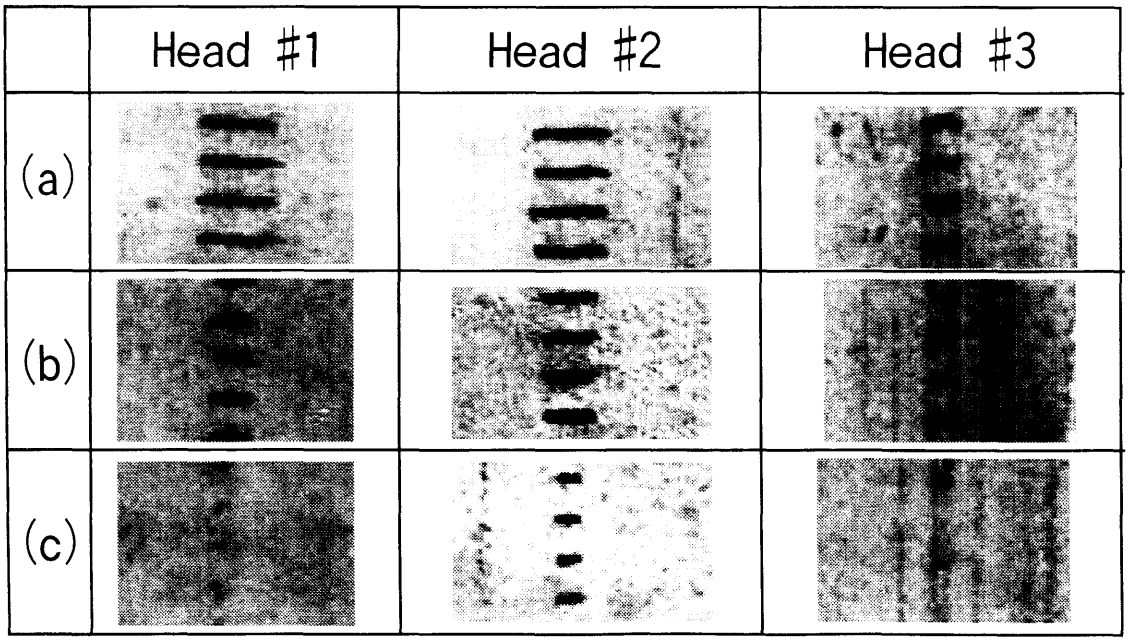


Fig. 4.6　記録トラックのビッターパターン．(a)：フルトラック，(b)：(記録ヘッドトラック幅)×0.8，(c) (記録ヘッドトラック幅)×0.4.

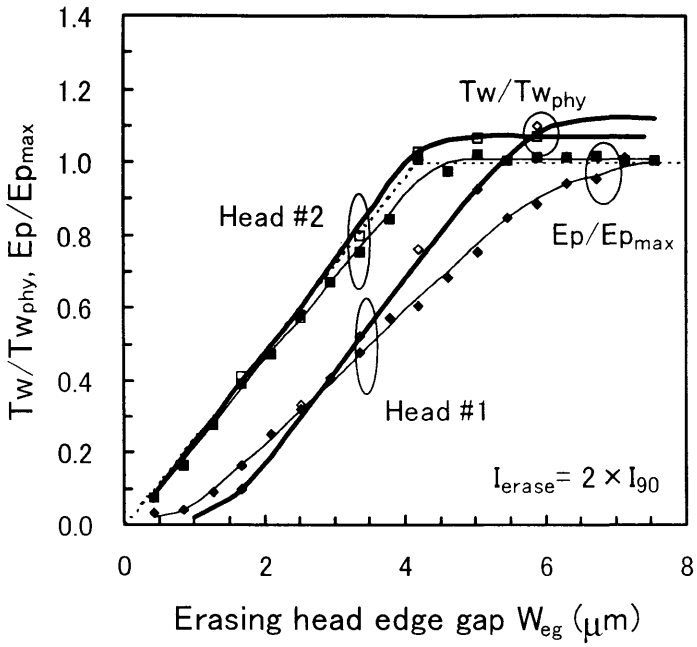


Fig. 4.7　Head #1, #2 における記録トラック幅の W_{eg} 依存性.

Figs. 4.7, 4.8 の太線で示す曲線は Fig. 4.6 の写真から求めた残留トラック幅 Tw を各記録ヘッドのトラック幅 Tw_{phy} で規格化したものである. Fig. 4.8 では残留トラック幅の広いものと狭いものとを別々に示している. 図中の点線はフリンジ磁界が存在しない理想的な場合のグラフである. 実測のグラフが 1 よりも大きくなっているのは, フリンジ磁界によって記録トラック幅が広くなっている（記録にじみが大きくなっている)ことを示す. Figs. 4.7, 4.8 の細線で示す曲線は Fig. 4.4 の曲線(I_{erase} =2×I_{90}）の場合のものである. 再生出力測定によるグラフとビッターパターンによるグラフを比較すると, Head #1, #2 では出力が減少し始める W_{eg} と 50%に減ずる W_{eg} の値はビッターパターンで観察される残留トラック幅が減少し始める W_{eg} と 50%に減ずる W_{eg} の値はほぼ一致している. 一方, Head #3 では出力が減少し始める W_{eg} は狭いビットパターンのトラック幅が減少し始める W_{eg} に対応しており出力の減少の度合いが大きくなる点 R に対応する W_{eg} は広いビットパターンのトラック幅が減少し始める W_{eg} に対応している.

このように再生出力測定とビッターパターン観察の両方から記録ヘッドフリンジ磁界の磁極形状依存性を調べた結果, 上下磁極の幅を等しく揃えることがフリンジ

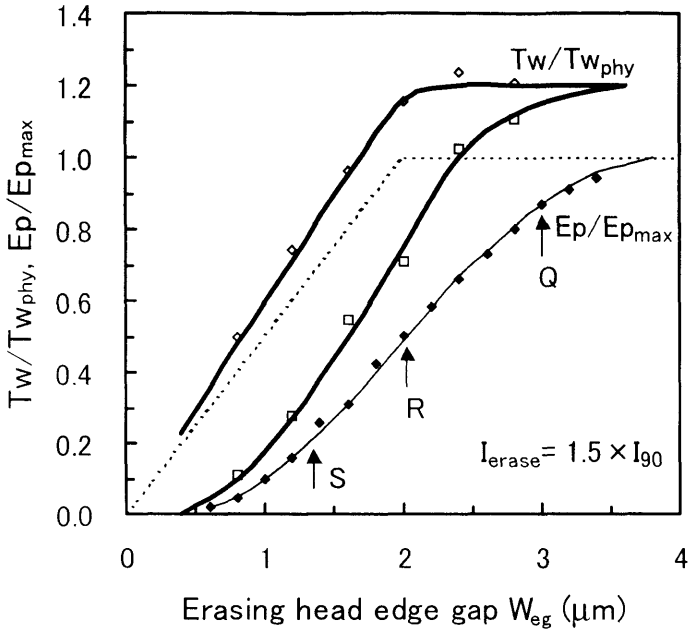


Fig. 4.8　Head #3 における記録トラック幅の W_{eg} 依存性.

磁界の広がりを抑える上で重要であることが示された.

4.4節　再生出力による記録・再生トラック幅の推定

トリミングを施して記録ヘッドの上下磁極の幅を揃えた Head #2 では Fig. 4.7 に示すように，出力の変化およびビットパターンの変化が理想状態を示す点線によく一致するため，出力が低下し始める W_{eg} から記録トラック幅は容易に推定できるが，Head #1，#3 のようにフリンジ磁界の広がりが大きなヘッドでは出力の変化を表すグラフと Bitter 法による測定結果が理想状態を表すグラフからずれているため，記録トラック幅の推定が困難である．本節ではフリンジ磁界の広がりが大きなヘッドについて，Head #3 を例に，再生出力による記録トラック幅の推定法を述べる.

まず最初にフリンジ磁界の広がりを Fig. 4.5 のグラフから求める．前述したように，再生出力は W_{eg} が狭くなるにつれて，最初緩やかに減少し，続いて直線的に減

少（QR, RS）した後，また緩やかに減少する．これら 3 つの再生出力の減少は磁化の消磁の割合がそれぞれ異なることが原因である．Fig. 4.9 にその様子を表す簡略図を示す．W_{eg} が大きい場合から Fig. 4.5 の Q 点までの状態は Fig. 4.9(1), (2)に相当する．ここでは簡単化のために再生にじみが非常に大きい場合を前提とし，ヘッド磁界分布を表す台形の上底の磁界強度は媒体飽和磁界に等しいとする．Fig. 4.9(1)から(2)までの間では，初期トラックの残留磁化のフリンジ部分とヘッド磁界のフリンジ部分が重なるような状態であり，この場合は W_{eg} の変化の割合と消磁される磁化の割合が一定でない．そのため再生出力の減少は緩やかになる．Fig. 4.9(2)から更に W_{eg} が減少し，(3)の状態になるまでの範囲では W_{eg} の変化の割合と消去後の残留トラック幅（マイクロトラック幅）の減少の割合は一定である．そのため Fig. 4.5 の Q から S の辺りまではほぼ直線的に減少する．さらに W_{eg} が小さくなると初期記録トラックの中央部では左右の消去磁界のフリンジ同士が重なって消去後の残留トラックの磁化分布は(4)の状態，つまり 3 角形となり W_{eg} の減少に比べて磁化の減少は小さくなり，Fig. 4.5 において S 点の W_{eg} 以下の状態となる．ここで，記録ヘッド片側のフリンジ磁界の広がり幅を W_{fr}，記録ヘッドのトラック幅を Hw_w すると，Fig. 4.10 のようになる．ここで，W_{fr} は(4.1)式で表される．

$$W_{fr} = \frac{W_{eg} - Hw_w}{2} \tag{4.1}$$

Fig. 4.5 のグラフの傾きの変化点として S 点を推定し，(4.1)式から $W_{fr} = 0.65\ \mu m$ という値が得られた．Head #3 の記録ヘッドフリンジ磁界の広がりはおよそギャップ長の 2.2 倍であることが分かる．

次に，Fig. 4.11 に示すように記録トラックの片側をフリンジ磁界の広がり幅がわかっているヘッドで DC 消去し，そのときのヘッドの位置の関数として再生出力を測定する．このとき再生ヘッドは再生にじみによる感度の鈍化の影響を避けるために，消去前の記録トラックに半分オントラックするように位置決めする．再生出力が低下し始める offset 距離から記録にじみの幅を算出する．線密度 10 kFRPI の場合と 120 kFRPI の場合の測定結果を Fig. 4.12 に示す．同図において再生出力が減少し始める状態を表す簡略図を Fig. 4.13 に示す．ここで記録トラック片側の記録にじみの幅を W_{sp}，offset 距離を A とすると(4.2)式が得られる．Fig. 4.12 において再生出力が減少し始める offset 距離は 10 kFRPI, 120 kFRPI のときでそれぞれ 2.86μm,

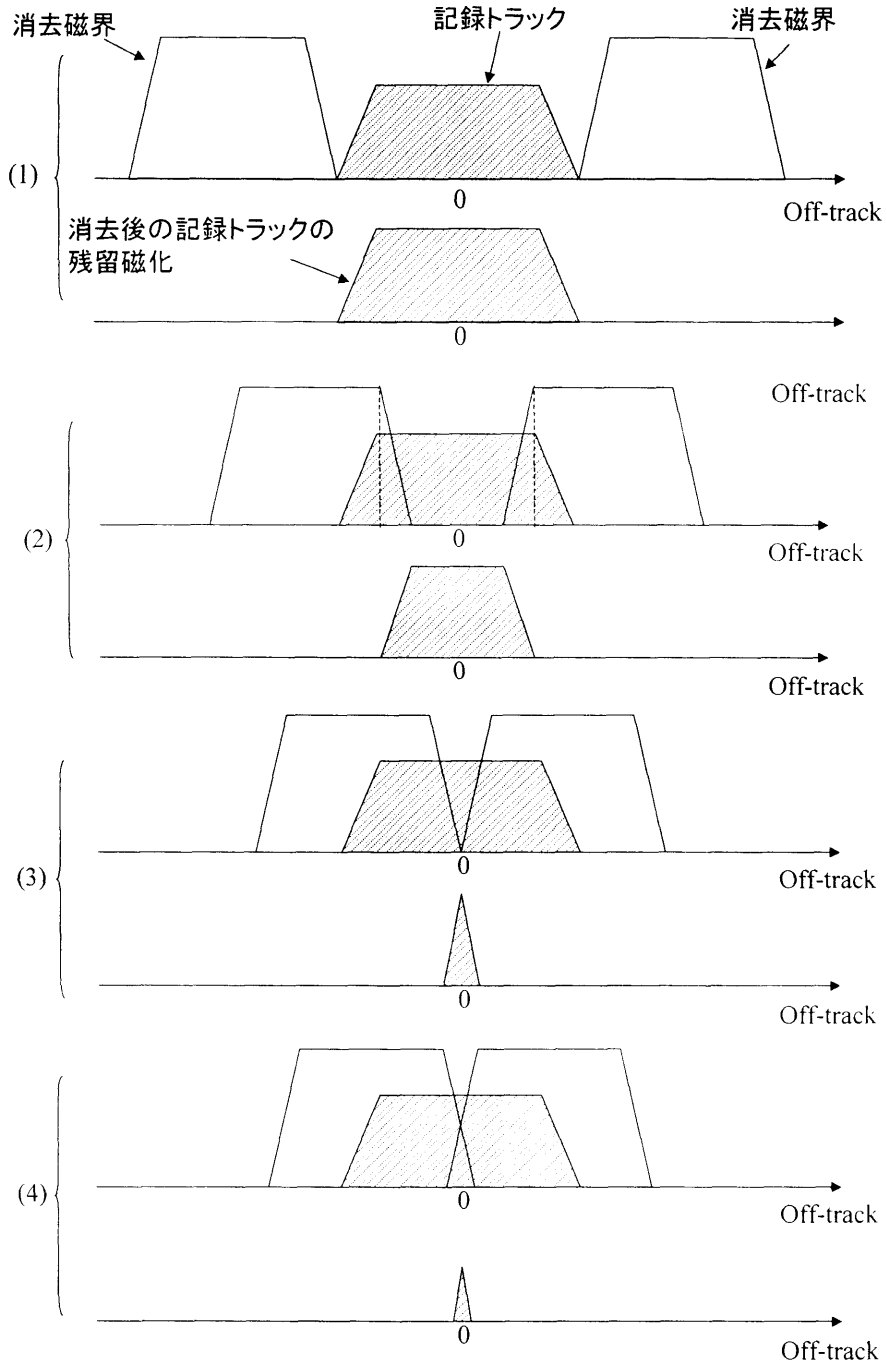


Fig. 4.9　記録トラック残留磁化分布.

2.50μmである.

$$W_{sp} = A - Hw_w - W_{fr} \qquad (4.2)$$

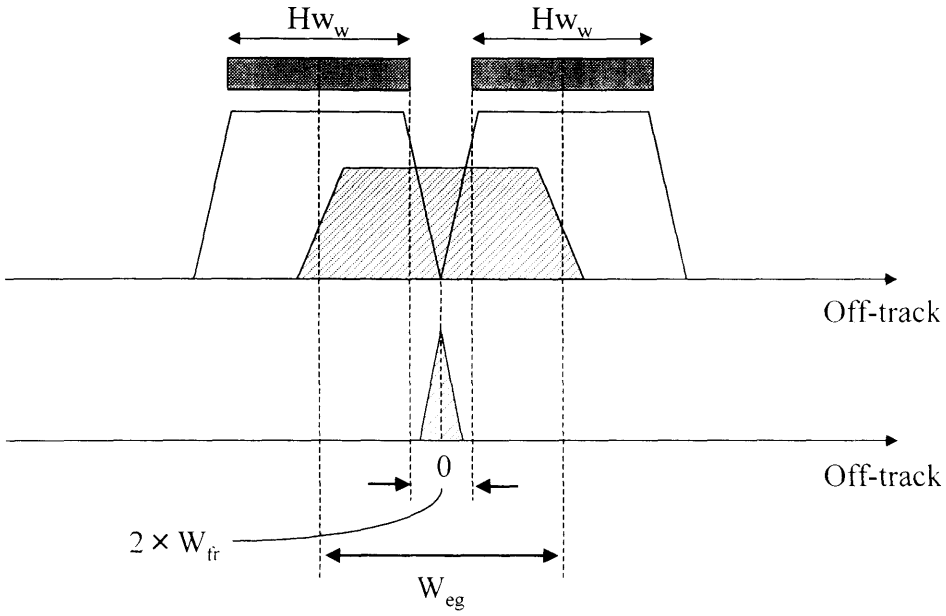


Fig. 4.10　記録ヘッドフリンジ磁界の広がり幅の推定.

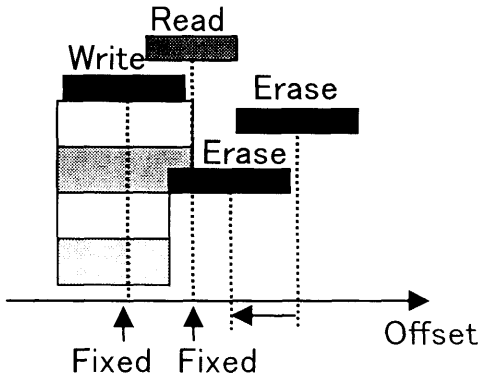


Fig. 4.11　記録にじみの広がり幅の推定方法.

(4.2)式から記録トラック片側の記録にじみ幅は 10 kFRPI, 120 kFRPI でそれぞれ 0.21μm, −0.15μm と推定される.

さらに記録にじみを含む実効的な記録トラック幅は記録ヘッドトラック幅にヘッド両側の記録にじみ幅を足したものとなる.

このようにして再生出力から推定した記録トラック幅とビッターパターンから測定した記録トラック幅を Fig. 4.14 に示す. 両者はほぼ一致しており再生出力による測定法は有効であると考えられる. ここで重要なことは, 記録されたトラック幅は記録信号の記録密度によって変化し, 高線密度になるにしたがい記録トラック幅

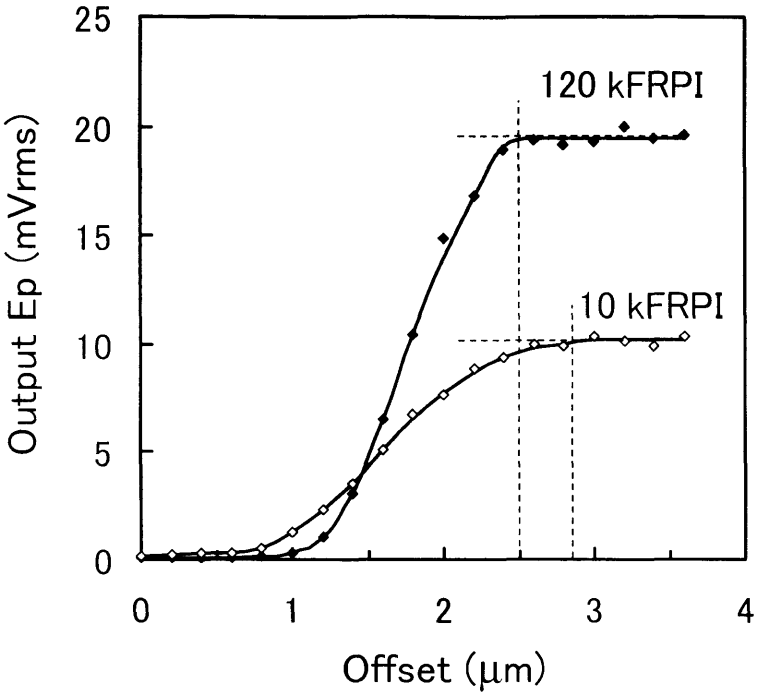


Fig. 4.12　再生出力とオフセット距離の関係.

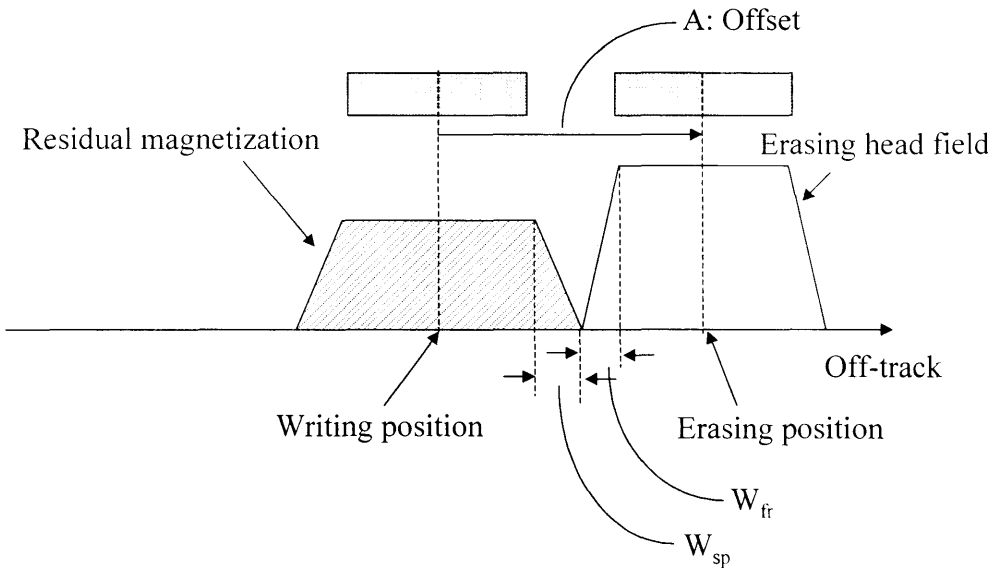


Fig. 4.13　記録にじみの広がり幅の推定.

が狭くなり，線密度 50 kFRPI 以上で記録ヘッド幅よりも狭くなっていることである．この理由は，3.3.2 項の Fig. 3.14 で示す記録ヘッドエッジ部分のヘッド磁界の

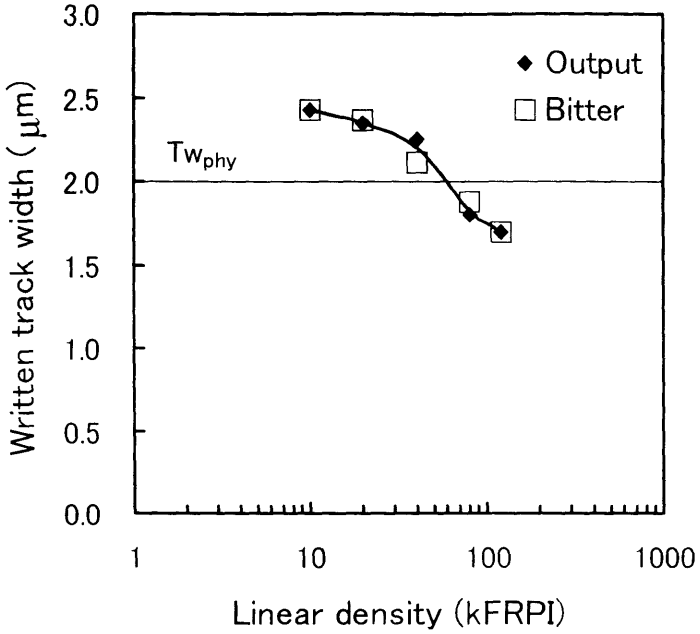


Fig. 4.14　実効記録トラック幅の線密度依存性.

広がりによる尾引き効果によるものと考えられる．また，このときのビット長は 0.5μm で記録ヘッドギャップ長の約 1.7 倍に相当する．

4.5節　ヘッド磁界分布の磁極形状依存性

記録ヘッド磁極形状の異なるヘッド磁界解析を 3 次元磁界解析プログラムを用いて有限要素法により行った†．Head #3 を例に下部磁極のトリミングのない場合(a)と Head #3 のように下部磁極のトリミングは行われているが上部磁極と幅の揃っていないもの(b)，そして上下の磁極の幅が等しくなるようにトリミングを施したもの(c)について計算した．上記の 3 つの ABS 面から見た磁極形状の図を Fig. 4.15 に示す．また，トリミングの深さは全て 1μm とし（Fig. 4.16），ギャップ深さを 1μm,

† 磁界計算は新潟工科大学情報電子工学科の金井靖教授に依頼し，同教授と当時学部生だった田中大介氏に計算して頂いた.

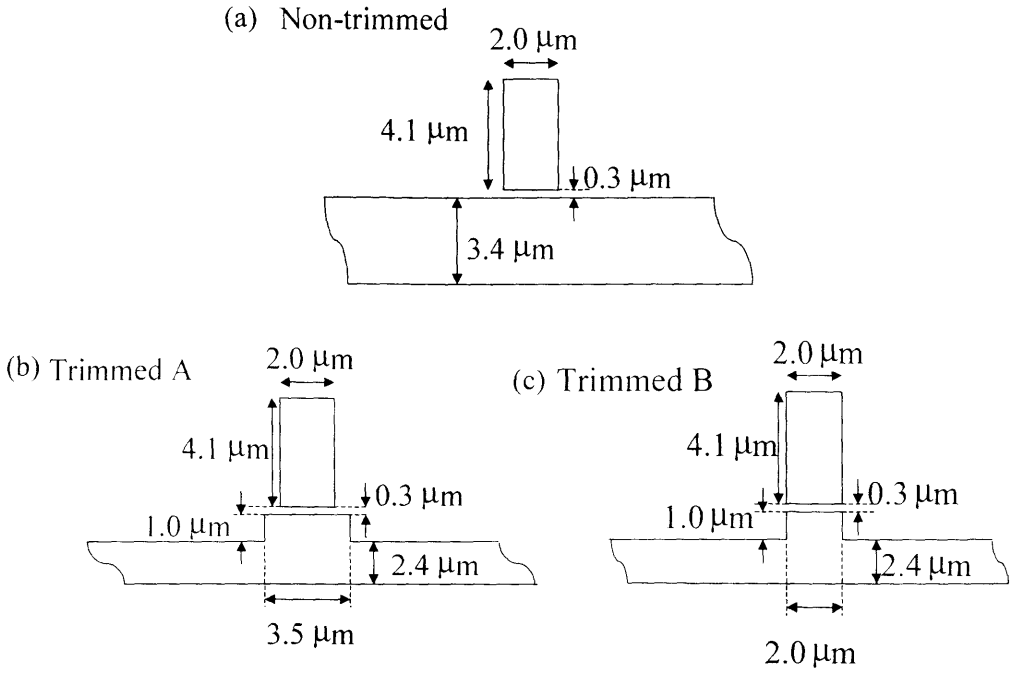


Fig. 4.15　ABS 面から見た記録ヘッド磁極形状.

ヨーク長を 20μm（Fig. 4.17[35]）としてヘッド磁極表面からの距離が 40nm の位置のヘッド磁界長手方向成分の計算を行った．ヘッド起磁力はヘッドが飽和していない領域で，ヘッド磁界強度がヘッド起磁力に比例している場合を 2 通り（0.1 AT, 0.5 AT）計算した．Figs. 4.18, 4.19, 4.20 にそれぞれ磁極形状(a), (b), (c)に対する長手方向の計算結果を磁束密度 B_x として示す．(a)の場合の B_x はトラック幅方向に大きく広がっていることが分かる．一方，トリミングを施した(b)と(c)ではトラック中央からエッジに向かうにつれて急激に B_x が低下し，off-track = ±1.3～2.0μm 付近で最小となり，また大きくなっている．これはヘッドギャップ中央付近では B_x が最も高くなっているが，下部磁極のギャップ中央から離れた部分と上部磁極の間でもギャップが形成された状態となっているためであると考えられる．しかし，ギャップから離れた部分の B_x は低くなっており，この部分は充分な記録性能を持たないため，信号記録時には記録トラックの形成に寄与しないと考えられる．しかし，隣接トラックへの影響は大きいものと予想される．このことは前節で示した Head #3 におけるマイクロトラックの再生出力と W_{eg} との関係が，理想状態から大きく外れていたことから推測される．また，トラックエッジでの磁束密度長手成分は長手方向に大きく広がっており，高線密度記録時の記録減磁は大きくなると思われる．

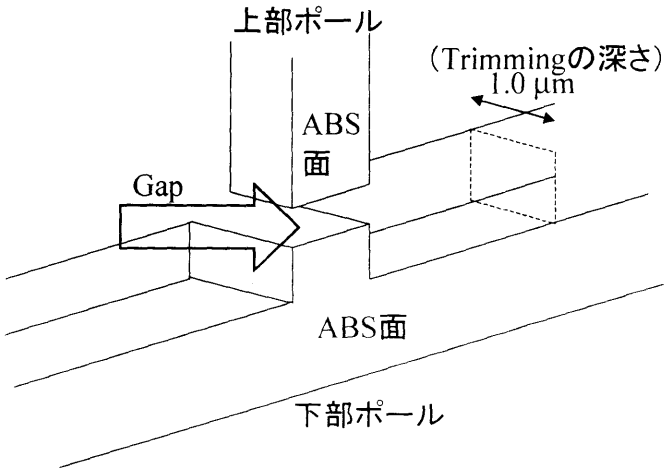


Fig. 4.16　トリミングの深さ.

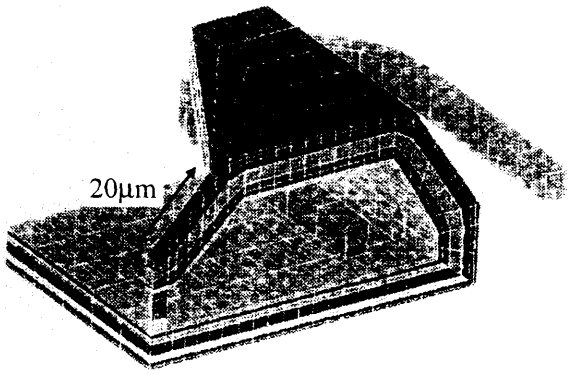
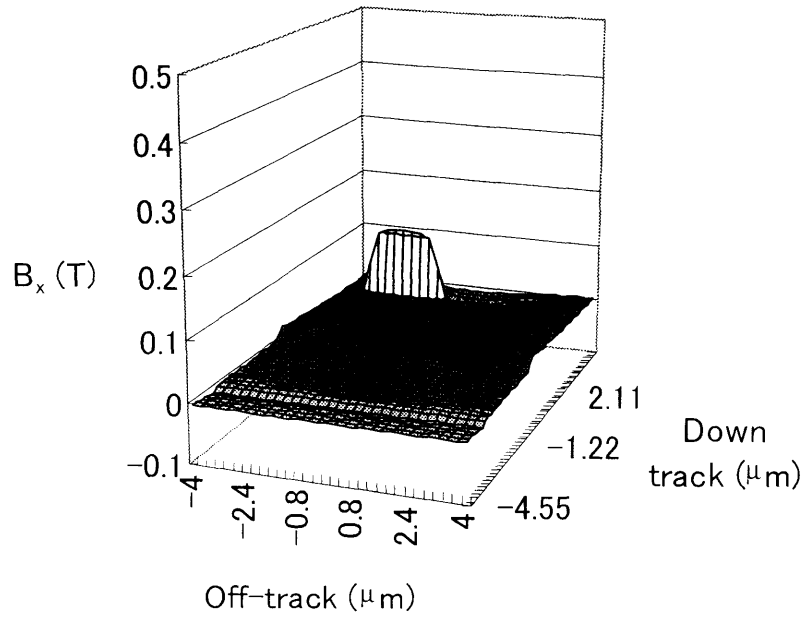
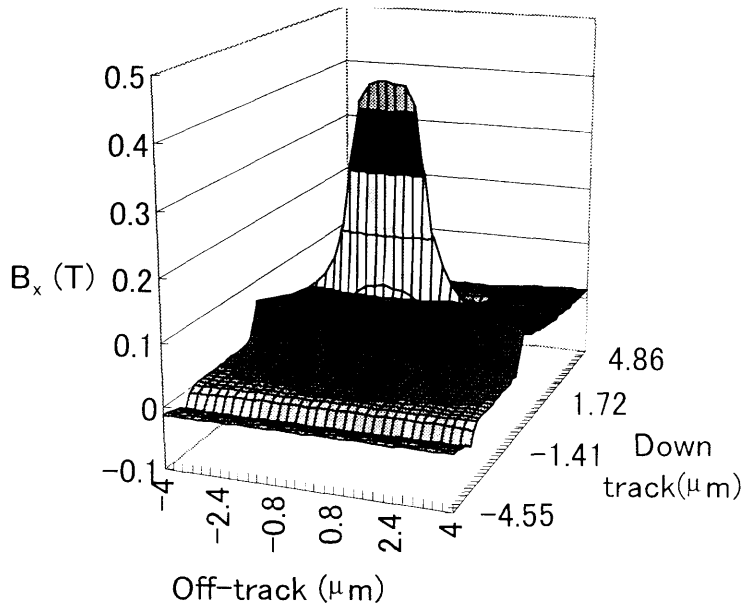


Fig 4.17　薄膜記録ヘッドのヨーク長.

トリミングを施していない(a)の場合とトリミングを施した(b)と(c)の場合を比較すると，(a)では起磁力が大きくなるとトラックエッジの B_x も高くなっている．しかし，トリミングを施した(b)(c)では off-track = ±1.3μm 付近での B_x は小さく，起磁力を大きくしても B_x の増加は少ない．(b)と(c)を比較すると，off-track = ±1.3μm よりやや内側のオフトラック方向の B_x の傾斜は(c)の場合の方がやや急峻である．これは 2.3 節の Fig. 2.7 からわかるように，記録トラックエッジの未飽和磁化領域を狭くする効果がある．

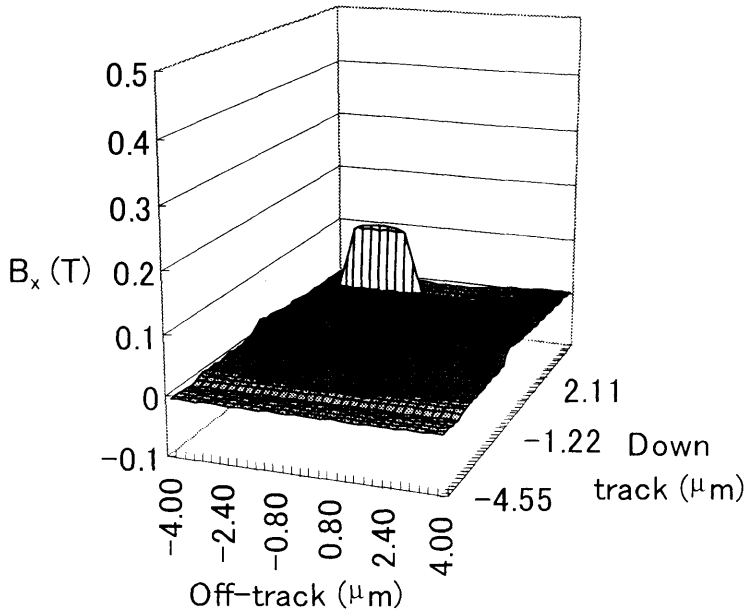


(1)　0.1 AT の場合

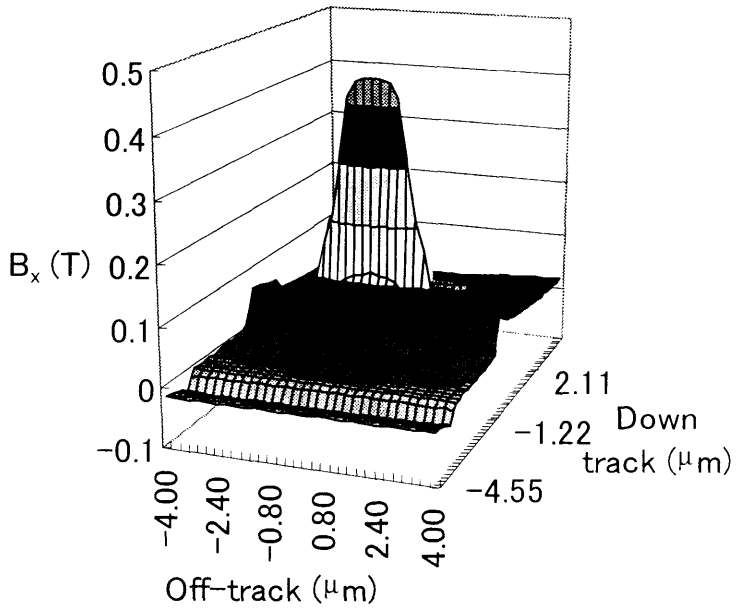


(2)　0.5 AT の場合

Fig. 4.18　(a) Non-trimmed ヘッドにおける記録ヘッド磁束密度分布.

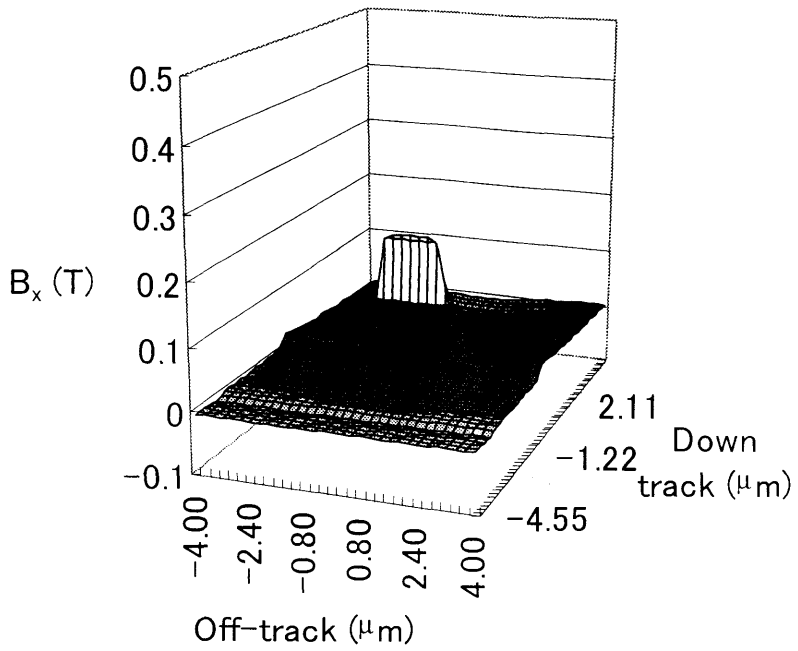


(1)　0.1 AT の場合

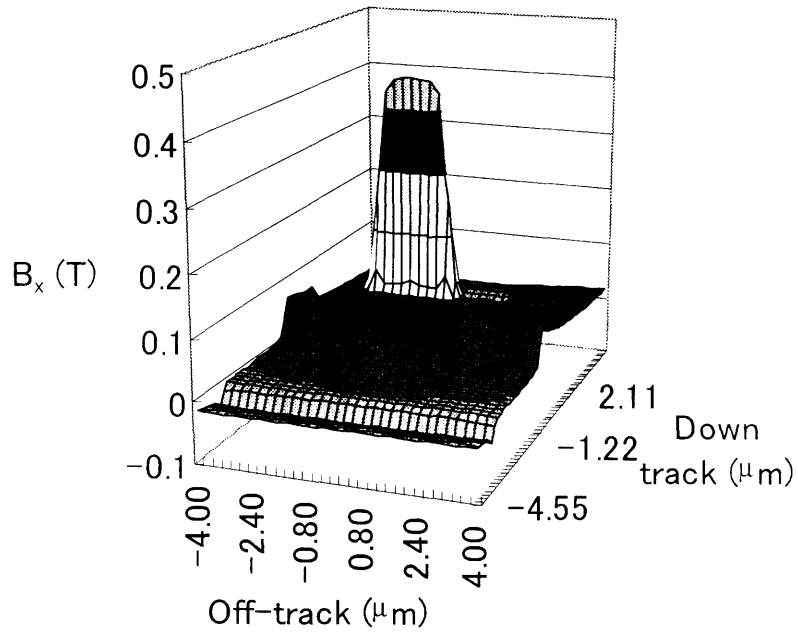


(2)　0.5 AT の場合

Fig. 4.19　(b) Trimmed A ヘッドにおける記録ヘッド磁束密度分布.



(1)　0.1 AT の場合



(2)　0.5 AT の場合

Fig. 4.20 (c) Trimmed B ヘッドにおける記録ヘッド磁束密度分布.

4.6節　オフトラック記録の影響

4.1 節で述べたようにミスレジストレーション記録（オフトラック記録）とは本来記録するべきトラック位置からずれて記録を行ってしまうことをいう．このミスレジストレーション記録は狭トラック記録・再生方式において重要な問題となる．そこで，狭トラック記録・再生方式において，ミスレジストレーション記録が起こった場合に，隣接トラックが受ける影響について検討する．

測定方法を Fig. 4.21 に示す．全面 DC 消去したディスクに連続信号 S_1 を記録した後，記録ヘッドを距離 x だけオフセットさせて連続信号 S_2 をオーバーライトする．そして，S_1 と S_2 の再生出力を記録ヘッドの中央の位置（Position 1），エッジが揃う位置（Position 2）の 2 通りの位置で測定する．ここで Position 1 は現在の広トラック記録・狭トラック再生，Position 2 は狭トラック記録・再生の場合に相当する．

Fig. 4.22 は Position 1 の測定結果である．同図から S_1 の再生出力が低下し始めるクリティカルオフセット距離を P とする．S_1 の線密度が高い場合には P は小さく，低い場合には P が大きくなっていることがわかる．この結果は 4.4 節の低線密度の記録トラック幅は広いという測定結果から予想されるが，再生にじみの線密度依存性の影響も現れている可能性がある．そこで，マイクロトラック特性から Tw_{50} を求め再生にじみの線密度依存性の有無を調べた．Figs. 4.23，4.24 に Position 1，2 における P と Tw_{50} の線密度依存性を示す．Tw_{50} は線密度に依存していないため両図に

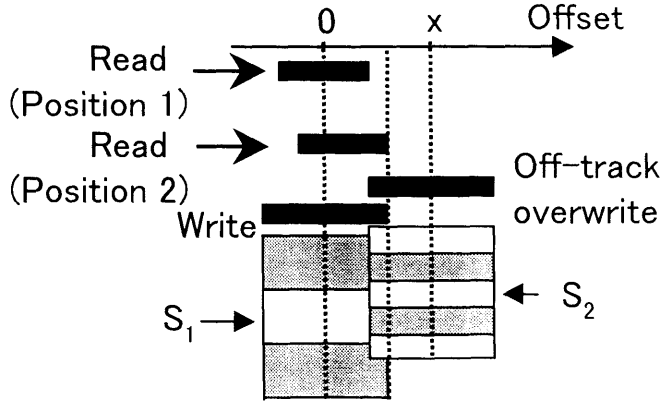


Fig. 4.21　ミスレジストレーション記録.

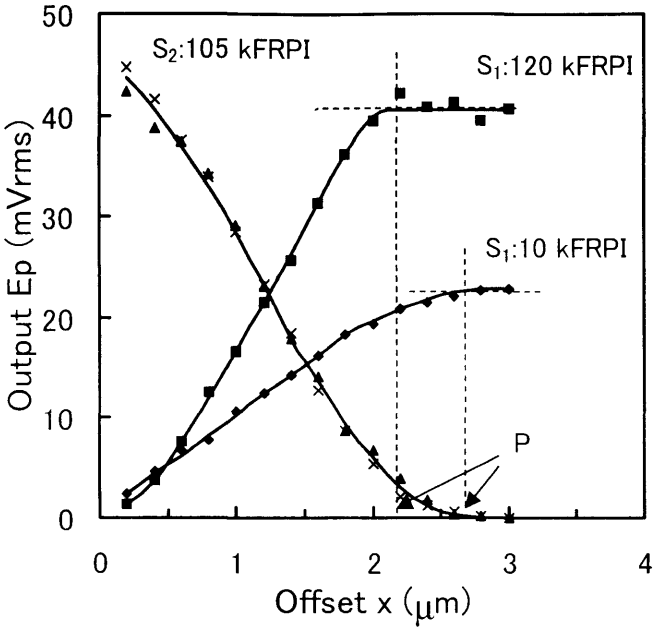


Fig. 4.22　クリティカルオフセット距離.

おける P の線密度依存性は記録トラック幅の線密度依存性によると考えられる．S_1 が低線密度の場合の P は大きく，高線密度の場合の P はやや小さくなっているため，S_1 の線密度が低いとミスレジストレーション記録の影響を受けやすく，高いと幾分その影響は軽減されると言える．なお，P の値は再生出力から考えられるトラックピッチの最小値を与えている．記録にじみの幅が狭い場合には Position 2 の場合の方が全ての S_1 の線密度において P が大きくなると考えられるが，Figs. 4.23，4.24 に示される測定結果の P の値はほぼ同じである．その理由は，ここで使用した再生ヘッドはその再生にじみの幅が非常に大きく記録トラック幅と同程度の再生感度分布を持っているためであると考えられる．

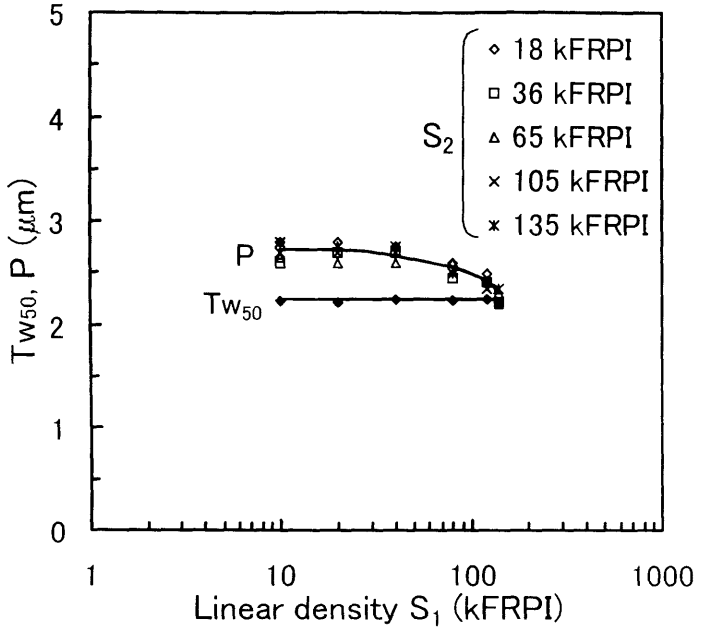


Fig. 4.23　Position 1 におけるクリティカルオフセット距離の S_1 依存性.

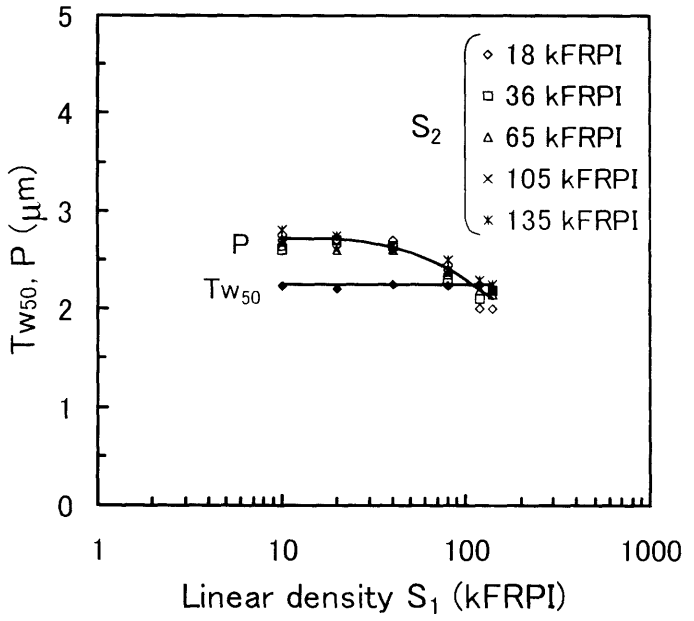


Fig. 4.24　Position 2 におけるクリティカルオフセット距離の S_1 依存性.

4.7節　結言

記録ヘッドフリンジ磁界の磁極形状依存性について記録トラックの両側を DC 消去したマイクロトラック法とビッター法から検討した結果，両者とも上下磁極の幅の揃ったヘッドでは磁界の広がりが小さく，下部磁極にトリミングを施した Head #2 では無視できる程度であることが確認された．

下部磁極にトリミングを施したマージ型 MR ヘッドである Head #3 を用いて記録信号の再生出力から記録トラック幅の推定を行い，ビットパターンとの比較を行った結果，両者はほぼ一致した．このことから，再生信号出力による記録トラック幅の推定法は有効であることが立証された．しかし，この方法では今後更に重要となる記録トラックの磁化強度を推定することができない．この点が今後の課題となる．この記録トラック幅の推定から，線密度が高くなるに従い残留記録トラック幅が減少していることがわかった．これは 4.5 節の磁極形状を変えたヘッドの磁束密度分布のシミュレーションから off-track 位置約±1.3～2.0μm 付近で長手方向になだらかに分布しており，これによる記録減磁の影響であると考えられる．

ミスレジストレーション記録が起こった場合，高線密度の隣接トラックは受けるダメージが軽減されることがわかった．これは高線密度の記録トラックは記録減磁により記録トラック幅が狭くなるという現象から推測される．一方，このことは信号を記録すると記録トラックの両側に何も磁化のない領域，いわゆるサイドイレーズバンドが形成されていることを示す．広トラック記録・狭トラック再生方式では，ある記録トラックの隣に信号を記録する場合，再生トラック位置の近隣にサイドイレーズバンドがくるように記録すると，再生時の S/N は若干良くなる．しかし，狭トラック記録・再生方式では，このサイドイレーズバンドが形成されるとトラックピッチを大きくする必要があり，高トラック密度化は幾分制限されると考えられる．これらを考慮すると，記録ヘッド磁極はトリミングを深く，さらに記録過程のみを考えた場合には下部磁極全体の幅を上部磁極の幅と揃えることがサイドイレーズバンドの形成を抑え，高トラック密度化の有効な手段であると結論できる．