

高記録密度磁気テープシステムに
適した信号処理方式の研究

2016年6月

愛媛大学大学院理工学研究科

武者 敦史

要旨

情報のデジタル化が急速に進む中、年々増大するデジタルデータに対応したストレージシステムの構築が様々な分野で重要な課題となっている。また、大規模データセンターへの情報の一極集中も同時に進んでおり、こうしたデータセンターを中心に大量のデータを長期に渡って、安全安価に保管したいという要求は今後益々強くなると予想される。磁気テープストレージシステムは、保存したデータの長期安定性、信頼性(低ビットエラーレート)、コストパフォーマンス(低容量単価, 省電力)の観点からこれら要求に対する解決策となり得るため、大容量な磁気テープストレージシステムを構築することは社会的要請の強い課題である。テープシステムの大容量化を実現するためには、媒体、磁気ヘッド、高精度サーボトラッキング、信号処理等の技術開発が重要となる。これらの中でも信号処理は技術開発の余地が大きく、容量向上への寄与が大きいと期待されている。

本研究は高記録密度磁気テープシステムに適した信号処理方式の研究であり、①垂直配向したバリウムフェライトテープ媒体の再生信号に適した信号処理方式の検討、及び②テープシステム特有の搬送速度変動が大きい記録再生系においても、安定に動作するタイミング・リカバリ方式を提案することを目的としたものである。以下に具体的概要を示す。

第2章では塗布型垂直配向バリウムフェライト媒体に適したPR(Partial Response)ターゲットについて検討している。テープと同様の磁気記録媒体であるハードディスク装置(Hard Disk Drive, HDD)は、長手記録方式から垂直記録方式に移行した際に、媒体の磁化方向だけでなく、単磁極記録ヘッド、及び軟磁性裏打ち層の採用、DC成分を持つターゲットの選定といった、①媒体、②記録用磁気ヘッド、③信号処理方式 の3つが同時に垂直記録に適した形態に改良されたことで、今日に至る高記録密度化を実現してきた。一方で、現在の磁気テープシステムでは、バリウムフェライト媒体は磁化の垂直成分を持つものの、軟磁性裏打ち層は存在せず、単層長手媒体用に開発されたリングヘッドによる記録方式を採用している。本検討では、かかる記録再生系において最適なPRターゲットを検討することで、従来のメタル媒体に対し、高い信号対ノイズ比(Signal to Noise Ratio, SNR)を有するバリウムフェライト媒体の性能を引き出すことを目指している。実験では、それぞれ配向の異なる

塗布型バリウムフェライトテープ媒体を用い、それらに適したPRターゲットを検討した。その結果、磁性体の配向方向によらず、現行のテープシステムで採用されている状態数16以上のGPR(Generalized Partial Response)チャンネルにおいては、DC成分を持たないPR4を拡張したターゲットがほぼ最適な性能を発揮することを確認した。これは、現行の磁気テープシステムに採用されている記録再生方式、及び信号処理方式が垂直配向バリウムフェライトテープ媒体に良く適合することを示すものであり、今後、更に角型比を向上させた垂直配向バリウムフェライト媒体を用いることで、磁気テープシステムの更なる記録密度向上が可能であることを示している。

第3章では高記録密度における磁気テープシステムのタイミング・リカバリ回路の動作安定性の向上について検討を行っている。磁気テープシステムはHDDと比べて媒体搬送時の速度変動が大きいという特徴も持つ。このため将来に渡って高密度化が進み、低SNRの記録再生系のもとで動作するためには、信号処理回路中のタイミング・リカバリ機構の動作安定性に課題がある。タイミング・リカバリ機構は一連の信号処理回路の中でも前段に位置しており、本機構が適切に機能しないことには高度なエラー訂正方式を採用したとしても、正しく信号を検出することはできない。従って、今後繰り返し復号方式等の採用により、磁気テープの更なる高記録密度化を実現するためには、低SNRの記録再生系においても安定に動作するタイミング・リカバリ方式を開発することが重要となる。本検討では、タイミング・リカバリ回路が適正に動作しなくなる現象(Loss-of-lock)はタイミング・リカバリ回路中の位相誤差検出部において誤った誤差信号が検出されて回路にフィードバックされることが原因であることを示した。その上で、本現象を抑制するため、SOVA(Soft Output Viterbi Algorithm)復号器から得られる軟出力情報に基づき、検出された誤差信号のフィードバック制御を行う方式を検討した。その結果、SNRが8.0～10.5 dBの範囲において、いずれも明確なLoss-of-lock発生頻度(Loss-of-lock Rate)の改善効果が確認された。本方式は従来から採用されてきた信号処理の回路構成に対して、全く新規に導入が必要な機構が存在しないことが特長である。このため、比較的小さな回路修正のみで実現でき、現時点で最大32チャンネルもの記録再生素子を搭載する磁気テープドライブへの実装も容易であるため、磁気テープシステムの更なる高記録密度化に有効であると考えられる。

目 次

第 1 章 序論	1
1.1 本研究の背景	1
1.1.1 近年のテープストレージ動向	1
1.1.2 更なるテープストレージ高容量化に向けた技術	7
1.1.3 高容量テープシステムにおける信号処理技術	14
1.2 本研究の目的	17
第 2 章 垂直配向バリウムフェライトテープに適した PR ターゲットの検討	19
2.1 はじめに	19
2.2 テープ媒体	20
2.3 記録再生系	22
2.4 信号処理過程	25
2.5 記録再生信号の特性評価	27
2.6 記録再生信号のビットエラーレート評価	32
2.7 まとめ	35
第 3 章 高記録密度テープシステムに適したタイミング・リカバリ方式の検討	36
3.1 はじめに	36
3.2 テープシステムのタイミング・リカバリ回路概要	37
3.2.1 位相誤差検出部	39
3.2.2 位相オフセット算出部	39
3.2.3 補間フィルタ部	40
3.3 実験系の概要	42
3.4 高記録密度における位相同期回路の課題	45

3.5 SOVA 復号器の軟出力情報を利用した位相同期方式.....	49
3.6 性能評価.....	51
3.7 まとめ.....	52
第4章 結論.....	54
4.1 結果の概要.....	54
4.2 今後の展望.....	55
謝辞.....	57
参考文献.....	58
本研究に関する発表論文.....	64

第 1 章 序論

1.1 本研究の背景

1.1.1 近年のテープストレージ動向

情報のデジタル化が急速に進む中で、年々増大するデジタルデータに対応したストレージシステムの構築が各分野で重要な課題となっている。一方、保存データの信頼性に対する関心も大きくなっている。2012年6月に起きたファーストサーバ社のデータ消失事件は、データバックアップの重要性について考え直すきっかけとなった[1]。こうした市場の要請から、①大量のデータのアーカイブを安価に実現できる点 ②記録媒体の容量が順調に伸びており、年々増大するデータのマイグレーションに対応できる点 ③オフサイトで保管でき、事故等によるデータ消失に強い点 からテープストレージが注目を集めている。

(1) コールドデータ

データは生成されてから、実際にアクセスされるまでの時間に応じて、ホットデータ、コールドデータなどと呼ばれ、区別される。生成されてから、短時間のうちに再度アクセスされるデータをホットデータと呼ぶのに対し、コールドデータは、生成されてから長い時間（もしくは二度と）アクセスされることの無いデータを指し、それぞれに最適なストレージ媒体を選択することが重要である。頻繁にアクセスされることの多いホットデータは、RAM や NAND フラッシュなど、高速に読み書きが可能なストレージ媒体に保存しなければならないが、こうした媒体は得てしてストレージコストが高額になる。カリフォルニア大学が実施したおよそ3ヶ月に渡る企業向けサーバーのデータアクセス解析の結果によれば、保存されたデータの内、90%は調査期間中に一度もアクセスされることがなかったコールドデータである[2]。この結果が示しているのは、頻繁にアクセスされるデータは、ほんの一部であり、世の中の大半のデータは、一度保存された後は、

殆どアクセスされることが無いという事実である。そのようなデータも含めて、法規制など様々な理由から長期的に保存しておくことが要求されているが、いざアクセスする必要が生じたときには、2～3分程度の遅延は許容できることが多いのもこれらコールドデータの特徴である。

(2) テープストレージのコスト優位性

このような膨大な量のコールドデータを何年にも渡って保存するには、コストが非常に重要な要件となる。この場合のコストとは、単にデータを保存する機器や媒体といったハードウェアの価格を意味するだけではなく、それらデバイスを保管しておくフロアスペースや、メンテナンスコスト、空調管理、消費電力なども総合したコストであり、例えばハードディスク装置(Hard Disk Drive, HDD)は待機状態でも常にディスクが回転し、電力を消費するため、単に保管しておくだけでも相応のコストが発生する。一方、テープは一度記録した後は、カートリッジをライブラリ内のラックに置いて保管すればよく、場合によっては外部の倉庫にオフラインで保管しておくことも可能である。このため、長期保管を考えた際には省スペース、低消費電力であり、その分ストレージ全体にかかるコストを大きく下げることができる。また、容量の増設が比較的容易であるため、予想外にデータが急増したときにも対応し易いメリットもある。ストレージコストに関する定量的な議論は、前提とするストレージシステムの規模に大きく依存するが、例えば HDD とテープを比較した場合、一般にストレージの規模が大きくなるほど、テープのコスト優位性が顕著になる。いくつかの仮定のもとで試算した結果、HDD(SATA)のみで構築したストレージシステムに対して、テープを組み合わせたシステムでは、2倍[3]から、前提とするモデルによっては 20 倍以上[4]のコストメリットがあると報告されている。

(3) テープストレージの信頼性

データアーカイブにおいて最も重要な要件は、保存したデータが失われないことである。しかし、実際には冒頭で挙げた例[1]のように、データは様々な要因により、消失の

危険にさらされる。図 1.1 に、データが消失してしまう具体的要因について、Pepperdine 大学の David M. Smith 氏が調査した結果を示す[5]。ハードウェアの不具合によるものは 40%であり、人為ミス(29%)や、ソフトウェアの不具合(13%)など、その他の項目が残りの 60%を占める。これら各項目に関し、一度データを記録したテープはオフライン、オフサイトで保管できるため、グラフ中の盗難(9%)以外の項目については、大きくリスクを低減することが可能となる (LTO4 以降の世代のテープドライブは暗号化機能が実装されているため、盗難・紛失時のデータ流失リスクを最小限に抑制することが可能)。2011 年に Gmail の一部アカウントのデータがソフトウェアのバグにより一時的に消失し、後日テープ媒体に保存してあったバックアップデータにより無事復旧した事故は、日頃から多様なシステムを用いてバックアップを保持しておくことの重要性を世に示した[6]。次に、テープの信頼性を支える 3 つの特長、即ち(A) Read While Write 方式、(B) 強力なエラー訂正符号、(C) 記録媒体の長期安定性 について述べる。

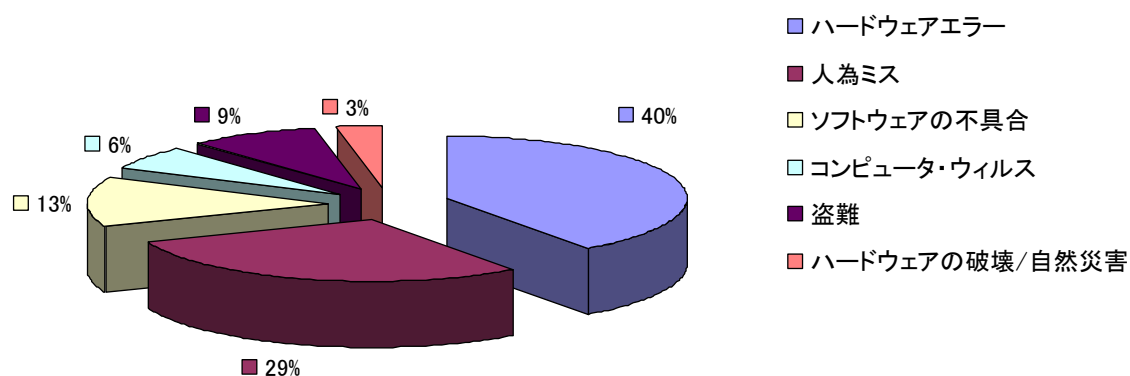


図 1.1 データ消失要因の割合

(A) Read While Write方式

Read While Write 方式とは、図 1.2 のように、上流側の素子で記録すると同時に、下流側の素子で記録したばかりのデータを再生し、データを正しく読み取れることを都度確認する方式のことを指す[7]。このとき、何らかの要因で再生不良が発生した場合は、読み取れなかったデータを再び書き直す Rewrite と呼ばれる動作をとることで、データが確実に媒体に記録されるよう保証している。

(B) 強力な誤り訂正符号

テープストレージシステムは、機構部品の故障など、ドライブ側で何らかの不具合が発生した場合でも、メディアさえ無事であれば、ドライブを交換することで容易に対応可能であるが、メディア側に何らかの故障原因があった場合は、データが失われる危険がある。このようなリスクに対応するため、テープは、誤り訂正に RS(Reed-Solomon)積符号を用いており、理論的には、およそ 15%のデータを正しく読み取ることができなくても、訂正して再生することが可能である。更にインターリーブという手法を用い、1つの誤り訂正単位を構成するデータをテープをダウントラック方向、ならびにクロストラック方向にうまく拡散することで、テープに局所的なダメージが発生した場合でも、復元できるよう工夫がされている。

(C) 記録媒体の長期安定性

一般に磁気記録媒体に記録された磁化パターンは、熱揺らぎと呼ばれる現象により、徐々に消失してしまうことが問題となる。磁気テープに記録された磁化データは、熱安定性の観点で、30年以上の室温保存に耐えられることが実験で確認されている[8]-[10]。また、近年導入され、テープ媒体の標準となりつつあるバリウムフェライト磁性体は酸化物であるため粒子自体が化学的にも安定である特長を持つ[11]。

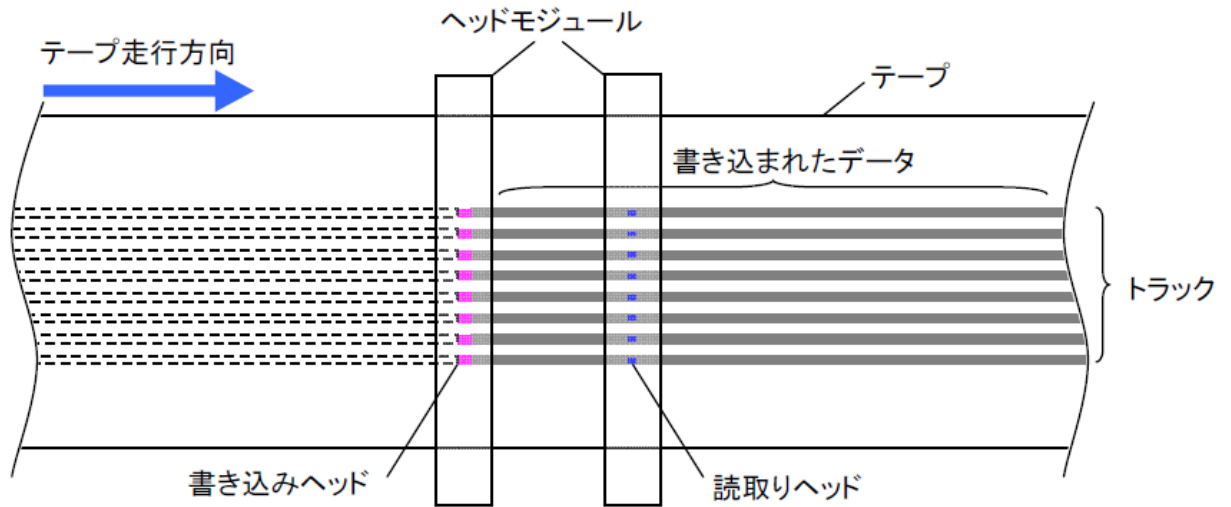


図 1.2 Read While Write 方式の概略図 (JEITA 資料より抜粋)

(4) テープストレージの活用事例

テープストレージ装置の代表的な製品と、HDD、光ディスクとを容量、転送速度、エラーレート、アクセス速度、媒体寿命の観点で比較した結果を表 1.1 に示す[12]-[14]. テープは他の装置と比べ、アクセス速度はやや劣るものの、大容量、高転送速度、かつ、高信頼性（低エラーレート）を実現しており、メディアも比較的長寿命であることが分かる. 次にこれらテープの特長を利用し、データアーカイブ用途に導入した最近の事例を表 1.2 に示す. 表より基礎研究からエンターテイメントにいたる幅広い分野でテープアーカイブの活用が進んでいることが分かる. 米国立スーパーコンピュータ応用研究所 (NCSA)における Blue Waters プロジェクトでの導入事例では、5 年間で 380PB まで増え続けるデータの内、アクセス頻度の少ないものをテープライブラリに保存することで膨大なデータを低コストでアーカイブすることに成功した[15]. 更に HDD の RAID

(Redundant Array of Independent Disk) に類似する RAIT (Redundant Array of Independent Tape) の技術を活用することで、アーカイブデータの保存・読み出しの速度と、信頼性の向上をわずか 1/5 の冗長 (5 巻あたり 1 巻のパリティ・カートリッジを作成) で実現している。

表 1.1 各種ストレージ媒体の性能比較

	テープ			HDD	光ディスク
	LTO6	LTO7	TS1150	ST8000AS0002	Blu-ray(16x)
容量	2.5 TB	6.4 TB	10 TB	8 TB	0.1 TB
転送速度	160 MB/s	315 MB/s	360 MB/s	150 MB/s	72 MB/s
エラーレート	1.E-17	1.E-17	1.E-20	1.E-14	-
アクセス時間(含マウント時間)	~ 1分			数ミリ秒	~ 1分
媒体寿命	30 年以上			~3 年	50年

表 1.2 テープの使用状況

研究機関	映像、娯楽	気象	ITベンダー 製造業	文化資料保管
NCSA	Red Bull	German	nVidia	CyArk
NIH	Media House	Weather	T3 Media	LOC
NERSC	Los Angels	Service	Google	
CERN	Lakers	Météo	Anna	
OSU	MLB	France	Aluminum	
JAXA	Endemole	ECMWF	CSC	
RIKEN	Fox Sports		Bombardier	
USC	Magic TV			
U. Oklahoma	Maple Leaf			
CIT				
NASA				
Oxford Univ.				
千葉大				

1.1.2 更なるテープストレージ高容量化に向けた技術

(1) 大容量化のトレンド

増え続けるデータ量に対応するためには、ストレージの容量も増やさなければならない。図 1.3 にエンタープライズ(3592, T10000)および Linear Tape Open(LTO)システム向け磁気テープ製品、3.5 型ハードディスク装置(HDD)の記録容量のトレンドを示した。LTO が標準化された汎用テープカートリッジを採用するテープストレージシステムであるのに対し、IBM 社の 3592 や、Oracle 社の T10000 といったエンタープライズテープシステムでは、高信頼性、大容量といった特長を訴求している。また合わせて近年実施されたテープの面記録密度デモの結果も載せている。2006 年に 6.7 Gb/in^2 , 2010 年に 29.5 Gb/in^2 , 2014 年に 85.9 Gb/in^2 , 2015 年に 123 Gb/in^2 の各面記録密度達成の技術デモが発表され、それぞれ 1 巻あたり 8 TB, 35 TB, 154 TB, 220TB のカートリッジ容量の実現可能性が検証されてきた[16]-[19]。以上から、テープは策定したロードマップに従って、堅調な容量向上トレンドを継続していることが分かる。本節では、2015 年に実証された最新の技術デモのポイントを中心に紹介し、テープストレージの容量向上に関する今後の技術展望について述べる。

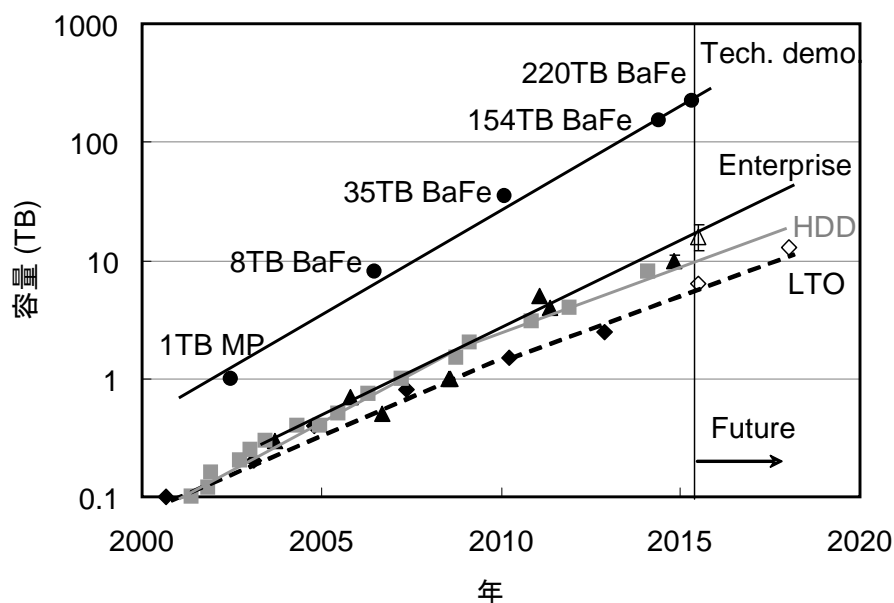


図 1.3 磁気テープ製品、技術デモ、3.5 型 HDD の容量のトレンド

(2) 高性能バリウムフェライトテープ媒体

2000年以降、磁気テープはHDD1台当たり記録容量のトレンドとほぼ同等にカートリッジ1巻あたりの容量を増加させてきたが、近年、LTOシステムでは記録容量の伸びが鈍化傾向にあった。記録材料として長らく採用されてきたメタル磁性体の微粒子化が限界に近づいてきたことが理由のひとつである。このような背景の中、バリウムフェライト磁性体を用いた高密度化研究が進み[20]、市場導入されたことで、鈍化傾向にあったカートリッジ容量のトレンドを再度加速させ、ロードマップへの回帰を果たしている。大容量化を実現する上でキーとなる媒体技術、すなわち、(A) バリウムフェライト磁性体、(B) 垂直配向技術、(C) 表面平滑化技術 の詳細を以下に記す。

(A) バリウムフェライト磁性体

従来採用されてきたメタル磁性体はFe-Co合金を主体とした金属微粒子であり、保磁力の起源が形状磁気異方性に由来する。そのため、微粒子化に伴い針状の粒子形状を維持できなくなると磁化を保持することが困難になる。一方、バリウムフェライト磁性体の保磁力の起源は結晶磁気異方性に由来するため、形状に左右されず安定に磁化を保持できる。また、先に述べた通り、バリウムフェライト磁性体はメタル磁性体に対して、化学的に安定であるため、保存性にも優れる。図1.4は、上記バリウムフェライト磁性体および最新メタル磁性体を用いて媒体化した磁気テープの、磁性層表面の走査型電子顕微鏡(Scanning Electron Microscope, SEM)像である。バリウムフェライトのテープはメタルテープに比べて、磁性体が微粒子化かつ高充填化されていることが分かる。

(B) 垂直配向技術

記録再生特性を向上させるための重要な技術のひとつとして、磁性層内での磁性体の配向度が挙げられる。表1.2にバリウムフェライト磁性体とメタル磁性体の比較を示す。表に示したように、バリウムフェライト磁性体は六角板状の形状であり、かつ磁化容易軸を板面に対し垂直方向に持つため、媒体化する際に垂直方向に配向させることができる。バリウムフェライトテープの配向による影響については、垂直配向することで記録

再生特性が向上することが報告されており[21], 2010, 2014, 及び 2015 年に行われた技術デモでは, 同技術により, 記録再生信号の信号対ノイズ比(Signal to Noise Ratio, SNR)向上を実現している. 図 1.5 に垂直配向したバリウムフェライト最新テープ, バリウムフェライト製品テープ(無配向), および最新メタルテープ(長手配向)の磁性層の断面 TEM 像およびその模式図を示す. 垂直配向した最新のデモテープでは, 平板状のバリウムフェライト磁性体が面内方向に配列されている様子がわかる.

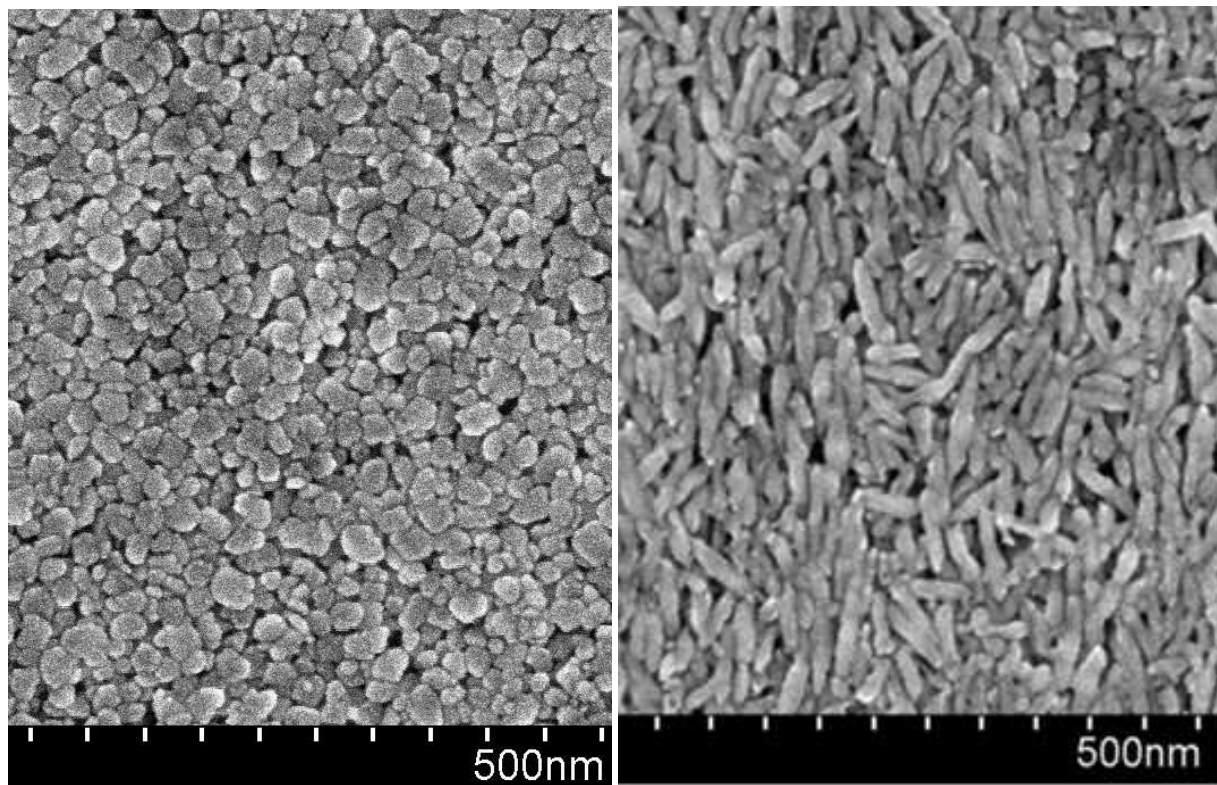
(C) 表面平滑化技術

記録再生特性の向上には, 上述した磁性体の微粒子化や粒子配向に加え, 磁気ヘッド-テープ間距離 (スペーシング) を低減させることも有効である. スペーシング低減には, 磁気テープ表面を平滑化することが効果的であるが, 一般的に磁気テープの表面性を平滑にすると, 磁気ヘッドとの真実接触面積が増加するため, 摺動時の摩擦係数が増加し, 走行性が損なわれることが知られている[22]. 2015 年の技術デモでは, 数ミクロンの波長を持つ長周期のうねりを除去した平滑面に, 非磁性のフィラー粒子の内添によりテープ表面に微小突起を形成することで, 磁気ヘッドとの真実接触面積を低減させ, 低スペーシングと, 低摩擦を両立することに成功している. 図 1.6 は原子間力顕微鏡 (Atomic Force Microscope, AFM)で測定した測定面積 $40 \mu\text{m}$ 角での表面プロファイル像である. 技術デモで使用したテープは製品テープに比べてより小さい十点平均粗さ R_z [23] を保ちつつ, 表面に微小な突起が多数形成されていることがわかる.

(3) 高効率記録再生ヘッド

記録再生特性向上を目的とした磁性体微粒子化と, 熱安定性を両立するためには, 磁性体の保磁力を高めなければならない. そのような磁性体を用いた媒体に, 信号を記録するためにはヘッドが生成する記録磁界を高める必要がある. ヘッドの記録磁界は記録素子の構成材料で決まるため, より高い飽和磁束密度を生成可能な材料によるヘッド構成が有効となる[24]. 2015 年の技術デモでは, $\text{Ni}_{45}\text{Fe}_{55}$ で構成された従来の記録磁極のギャップ部に, より飽和磁束密度の大きい CoFe を製膜することでヘッドの記録磁界を高

めることに成功している[19].


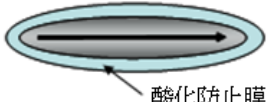


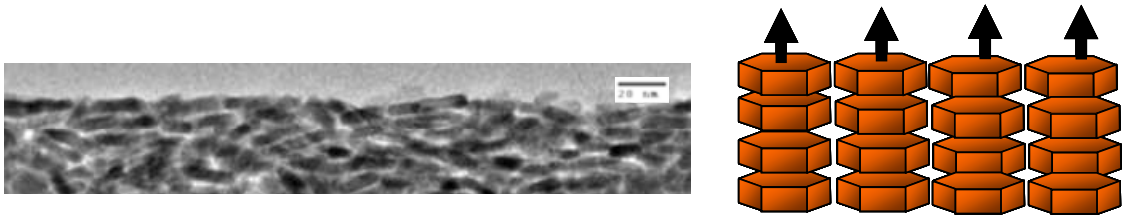
(a) バリウムフェライトテープ

(b) 最新のメタル製品テープ

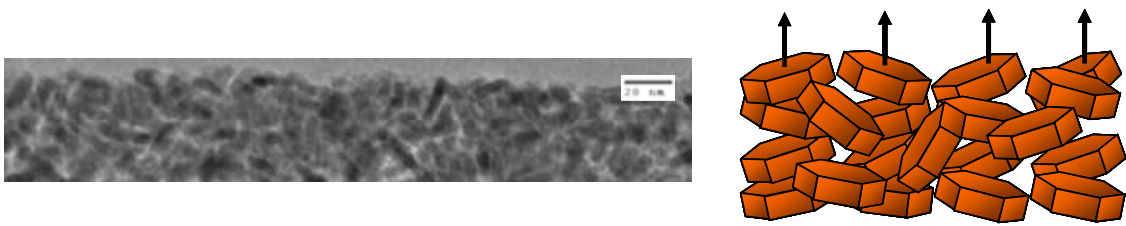
図 1.4 磁性層表面の SEM 像

表 1.2 バリウムフェライト磁性体とメタル磁性体の比較

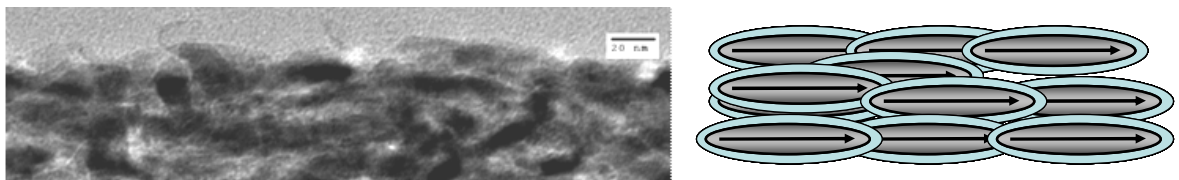
	バリウムフェライト(BaFe)	メタル(MP)
形状	磁化容易軸 ↑  六角板状	 針状
保磁力の起源	結晶磁気異方性	形状異方性
材料	$\text{BaO}(\text{Fe}_2\text{O}_3)_6$ 酸化物	Fe-Co合金
酸化防止膜	不要	必要



(a) 最新の技術デモテープ（垂直配向）

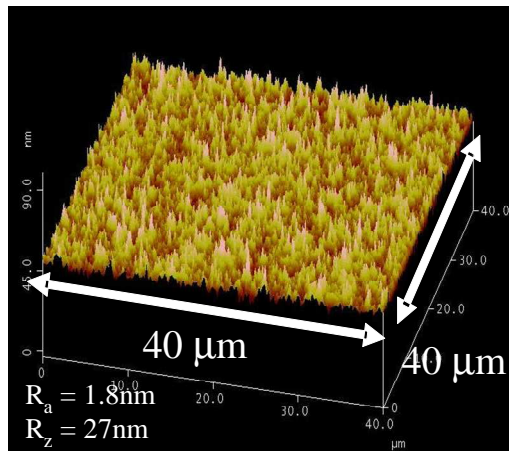


(b) バリウムフェライト製品テープ（無配向）

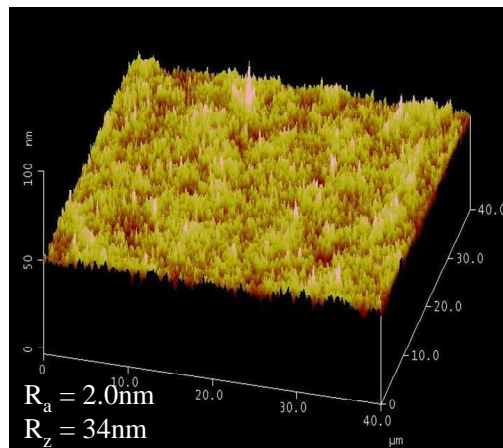


(c) 最新のメタル製品テープ（長手配向）

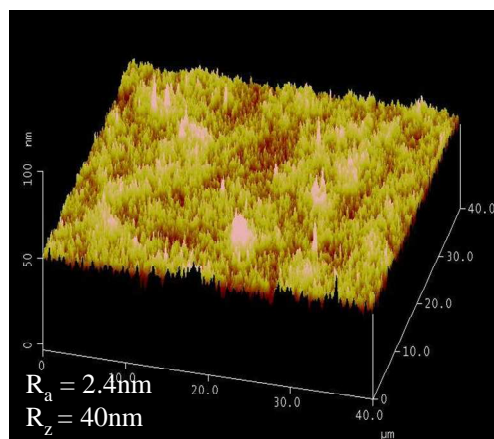
図 1.5 磁性層の断面 TEM 像およびその模式図



(a) 最新の技術デモテープ



(b) バリウムフェライト製品テープ



(c) 最新のメタル製品テープ

図 1.6 AFM で測定した表面プロファイル像

(4) 高精度トラッキング技術

テープの大容量化実現にはトラック密度の向上が重要となる。LTO7 のフォーマット [25]では、テープ 1/2 インチ (約 13mm) 幅に 3584 本ものデータトラックが存在し、これから見積もられる 1 トラックの幅は $4\mu\text{m}$ 以下である。予めテープに書き込まれたサーボ信号をもとに、走行位置のズレや、テープの振動に対してヘッドの動きが追従することで、高い精度でのトラッキングを可能としている。2015 年の技術デモでは、テープの位置検出分解能向上のための新しいサーボフォーマットの導入と、ヘッドアクチュエータ制御システムの改良により、再生素子幅 90nm のヘッドをわずか 140nm 幅のデータトラックに追従させる性能を実現している[19].

(5) 信号処理技術

高記録密度化に伴うビットサイズの狭小化により、記録再生信号の SNR 低下や、微小な媒体欠陥の影響を受けやすくなる。このため、正しく再生信号を検出し、復号を可能とするための信号処理技術が重要となる。テープシステムでは、再生信号の波形干渉を利用してデータを復号する PRML(Partial Response Maximum Likelihood)と、RS 誤り訂正符号の組合せが長らく使用されてきたが、LTO5 より、ノイズを事前予測することでデータ検出の信頼性を高める NPML(Noise Predictive Maximum Likelihood) [26]が導入され、記録密度向上の一翼を担ってきた。また、IBM 社 3592 システムでは、第 4 世代にあたる TS1140 より NPML のノイズ事前予測を記録パターンに応じて最適化する dd-NPML(data-dependent Noise Predictive Maximum Likelihood)という方式が導入され[27], これにより大幅な記録密度向上を達成している。また、同方式と繰り返し RS 復号と呼ばれる誤り訂正方式を組み合わせることで、高記録密度における再生信号検出の信頼性を高める検討もされている[19].

1.1.3 高容量テープシステムにおける信号処理技術

テープシステムの更なる高容量化に向け、様々な技術改良が検討されていることを先に述べた。この中でも信号処理方式の改良に関しては大きな伸び代が期待できる。これはテープシステムと同様に磁気記録媒体を用いる HDD では、現在、主として LDPC(low density parity check) 符号等を用いた繰り返し復号法を採用しているのに対し、テープは未だ繰り返し復号を前提としない RS 符号によるエラー訂正方式を採用しているためである。

図 1.7 に現行のテープシステムにおいて採用されているデータチャネルの概要を示す [28]。記録時には、ユーザーデータは最初に圧縮される。今日のデータ圧縮アルゴリズムでは、概ね 2:1, 3:1 といった圧縮レートが可能である。圧縮後のデータはそれぞれ、C1 (ECC1), C2(ECC2)の 2 重のエラー訂正符号により順次符号化される。C1 符号化が単一トラックのデータに冗長バイトを適用することで構成されるのに対し、C2 では複数のトラックに跨るデータを用いて符号化を行う。これにより、例えば局所的なテープ上のキズや、一時的なヘッド素子の目詰まり、同期の外れなどによる連続したエラー（バーストエラー）が発生しても、それらが訂正可能となるよう工夫されている。一方で、再生時における C1, C2 の復号過程は一方通行であり、HDD で採用されているような繰り返し復号を利用した方式は未だ実現されていない。このため、符号化効率を高めるために有効な軟情報、即ち、復号された 0, 1 のデータの確からしさの情報を活用することで符号化利得を向上させ、更なる高容量化を達成する余地がある。

一方で、HDD で採用された方式をそのままテープに転用するには、いくつか解決すべき課題が存在する。現行の塗布型テープシステムは HDD とは異なる記録再生信号上の特徴や外乱を有するため、これらに対応した方式の検討が必要となる。例えば、HDD と異なり、磁気テープシステムでは媒体が磁気ヘッドと直接接触し、擦られながら搬送される。このため、媒体-ヘッド間の摩擦に起因するジッターノイズ[22]に対応した方式の検討が重要となる[29]-[32]。また、近年実用化されたバリウムフェライトテープ媒体は、垂直記録 HDD と同様に磁化が垂直成分を持つ特徴を有する一方、記録再生方式は

垂直記録 HDD と大きく異なる。このため、得られる記録再生信号の周波数特性も異なったものとなり [33]、HDD が垂直記録に移行した際に為された信号処理方式の検討 [34]-[37]が再度重要となる。本研究では主としてこれら HDD との差異に着目し、塗布型テープシステムに適した信号処理方式の検討を行っている。

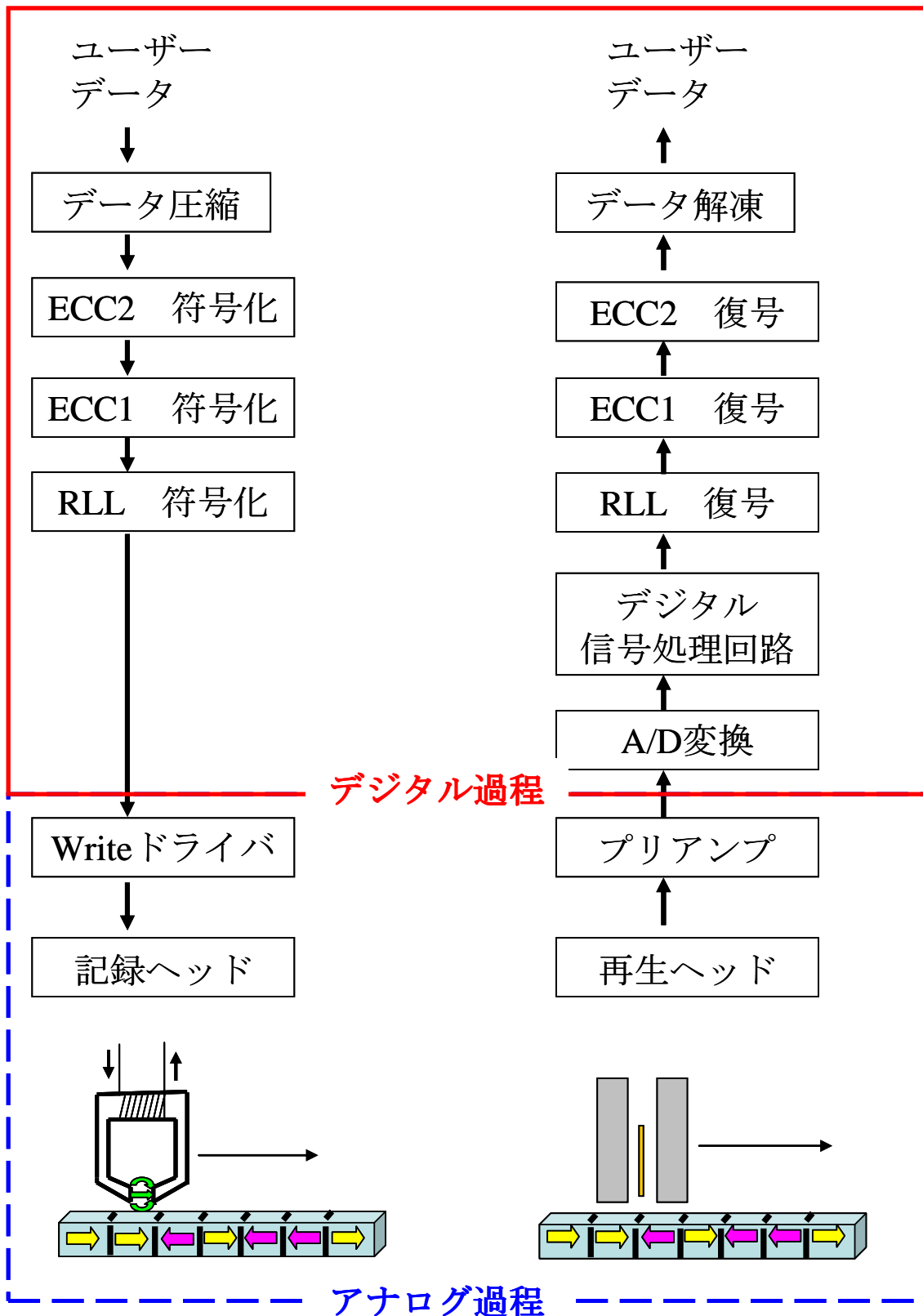


図 1.7 現行のテープシステムにおいて採用されているデータチャネル概要

1.2 本研究の目的

本研究の目的は、高記録密度テープシステムに適した信号処理方式の検討であり、次の①、②を達成することである。

- ① 垂直配向したバリウムフェライトテープ媒体の再生信号に適した信号処理方式を検討すること。ここでは、従来長手記録のテープに採用されてきた PR4 PR(Partial Response class4)型のターゲットに対して、リングヘッド、と単層垂直テープ媒体の組み合わせで得られる再生波形に適したターゲットの検討を行う。
- ② 高記録密度テープシステムに適したタイミング・リカバリ方式の検討を行う。テープシステムは、記録生素子を複数搭載するマルチチャンネルという特徴を持ち、特に最新のシステムでは同時に記録再生を行う素子の数は 32 チャンネルにも及ぶ。このため、信号処理が複雑化し、回路規模を増大することによるハードウェアコストの制約が大きいため、特に実装上の容易性にも留意しつつ、高記録密度におけるタイミング・リカバリ回路の動作安定性を向上する方式の検討を行う。

本論文の概要を章ごとに述べると以下の通りである。

第1章 序論

本研究の背景、及び目的を述べたものである。

第2章 垂直配向バリウムフェライトテープに適した PR ターゲットの検討

本研究の主要な課題の一つである、垂直配向バリウムフェライトテープ媒体に適した信号処理方式に関する研究である。具体的には、現行のテープシステムで採用されている記録再生ヘッド、媒体構成を前提とした場合に、垂直配向バリウムフェライトテープ媒体の性能を引き出すための最適な PR(Partial Response)ターゲットの検討を行うものである。

第3章 高記録密度テープシステムに適した位相同期方式の検討

本研究の二つ目の課題である，高記録密度においてテープの搬送速度変動を補償するための位相同期方式に関する研究である．高記録密度では記録再生系の信号対ノイズ比が低下するため，位相の誤検出により，位相同期回路中のフィードバックループが不安定になる．信号を検出するビタビ復号器の軟情報を活用することで，SNR が低い記録再生系においても，テープの速度変動の影響を補正し，安定した位相同期を実現する方式を提案する．

第4章 結論

本研究を総括する．

第2章 垂直配向バリウムフェライトテープに適したPRターゲットの検討

2.1 はじめに

磁気テープシステムの更なる高記録密度化を実現するための媒体技術として、微粒子化しても高い保磁力の維持が可能なバリウムフェライト磁性体の導入が進んでいる。従来テープ媒体に長らく採用されてきたメタル磁性体は、保磁力の起源が形状磁気異方性に由来するのに対し、バリウムフェライト磁性体の保磁力は結晶磁気異方性に由来するため、微粒子化しても保磁力が低下しにくい、という特長がある。バリウムフェライト磁性体のもう一つの特長はその形状であり、磁化容易軸が面外方向に向いた六角板状であるため、塗布型媒体において、磁化が垂直方向に配列され易い点である。塗布時に面外方向に外部磁界を印加することで、積極的に磁性体を垂直方向に配向させ、垂直方向の角型比を向上させることも可能であり、これによって更なるSNRの向上と、高記録密度における熱安定性の向上が可能であることが示されてきた[9], [10]。テープと同じ磁気記録媒体であるHDDは、長手記録方式から垂直記録方式に移行した際に、媒体の磁化方向を垂直にしただけでなく、単磁極記録 (Single-Pole-Type, SPT)ヘッド、及び軟磁性裏打ち層(Soft Under Layer, SUL)の採用、DC成分を持つターゲットの選定といった、①媒体、②記録用磁気ヘッド、③信号処理方式 の3つが同時に垂直記録に適した形態に改良されたことで、今日に至る高記録密度化を実現してきた。一方で、現在のテープシステムは媒体こそ、磁化の垂直成分を持つものの、依然として、単層長手媒体用に開発されたリングヘッドでの記録方式と、再生時には、低域遮断特性を持つアンプを採用している。過去、磁気記録の歴史の中で、このような記録再生系において、最適な信号処理ターゲットを検討した例は少なく、今後将来に渡って垂直配向バリウムフェライトテープのポテンシャルを引き出し、更なる高記録密度化を実現するためには、かかる検討が重要となる。本章では、現行のテープシステムでの記録再生系において、磁化の配向方向が記録再生信号に与える影響を考察した上で、最適なターゲットの検討を行う。

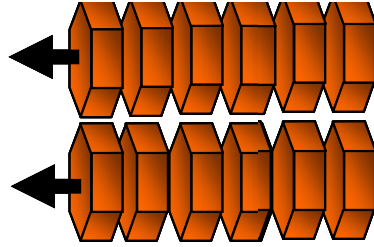
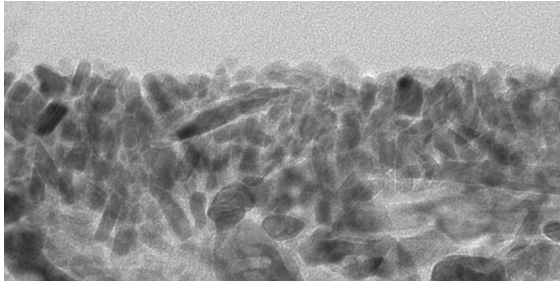
2.2 テープ媒体

磁気記録媒体では一般に、磁性層内における磁化方向のバラつきが SNR を劣化させる要因となる。このため、層内において磁性粒子を配向させ、媒体の角型比を向上させることが記録再生信号の SNR を向上する手段として有効である[21]。テープにおいて長らく使用されてきたメタル磁性体は、針状粒子であるため、塗布～乾燥時にテープの長手方向に外部磁界を印加することで、磁性粒子を面内長手方向に配向させ、記録密度の向上に寄与してきた。本検討では、板径 21nm のバリウムフェライト磁性体をそれぞれ、テープ塗布面に対し、①面外垂直配向、②面内長手配向、③無配向 させた媒体を作製し、それぞれの記録再生信号を用いた。磁性液を高分散し、磁性体を一次粒子レベルまで解砕した後に塗布し、それぞれの方向の外部磁場を印加しながら乾燥させることで、配向性を実現している。図 2.1 はこれら媒体の断面 TEM 像と模式図を示しており、平板形状の磁性体が狙い通りの配向方向に整列している様子がわかる。また、表 2.1 に媒体の物理特性、及び磁気特性を示す。長手、垂直方向の媒体角型比からもそれぞれの媒体が所望の配向状態を実現していることが確認できる。③無配向媒体に関しては、乾燥時に外部磁場を印加していないものの、角型比を見ると、板状バリウムフェライト磁性体の形状効果により、若干垂直に配向していることが分かる。

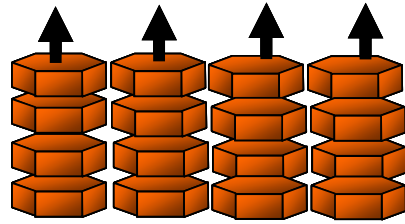
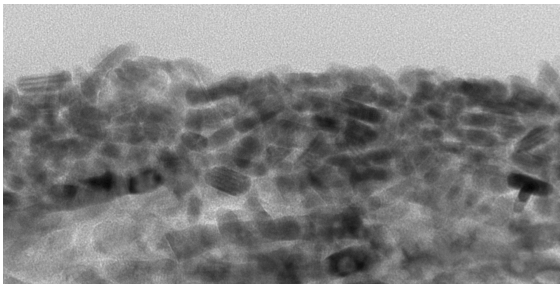
表 2.1 配向違い媒体の物理特性、及び磁気特性

	媒体 A	媒体 B	媒体 C
配向方向	長手配向	垂直配向	無配向
磁性層厚 (nm)	82	73	80
表面粗さ (nm), Ra	2.3	2.3	2.2
角型比	0.7	0.26	0.4
*角型比 _⊥	0.37	0.66	0.53
媒体保磁力 (0e)	2800	1490	2060
媒体保磁力 _⊥ (0e)	2060	2830	2460

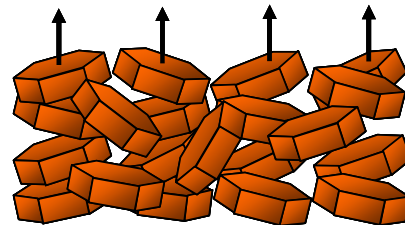
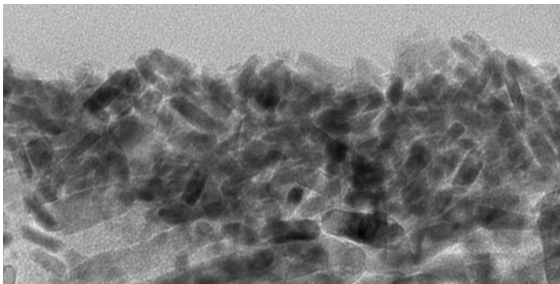
*反磁界補正無し不值



(a) 長手配向媒体



(b) 垂直配向



(c) 無配向

図 2.1 それぞれ配向の異なるバリウムフェライトテープ媒体の断面 TEM 像と模式図

2.3 記録再生系

前述のとおり，現行の磁気テープシステムは，薄膜リングヘッドによる記録と，GMRヘッドによる再生，低域遮断特性を持つプリアンプにより再生信号増幅する方式を採用しており，本検討でも同様の構成を用いた．本節では，検討に用いた記録再生系の詳細について述べる．

実験系全体の概要を図 2.2 に示す．まず，生成多項式 $x^8 + x^6 + x^5 + x^4 + 1$ より得た 255 ビット長の擬似ランダムバイナリ系列 (Pseudo Random Binary Sequence, PRBS) を繰り返し磁気ヘッドにより，テープ媒体上に記録する．本検討には，薄膜リング型の記録素子と，再生素子幅 $0.9\mu\text{m}$ の GMR 素子を搭載した記録再生ヘッドを用いており，本ヘッドをループ型のテープ媒体搬送系 (ループテスト) にマウントすることで，記録再生に用いた．図 2.3 に実験で用いたループテストの写真を示す．なお，テープ媒体の搬送速度は 4.1 m/s ，線記録密度は， 550 kbp とした．媒体からの再生信号をまず低域遮断周波数 1MHz の特性を持つプリアンプにより増幅した後に，デジタルオシロスコープにて，A/D サンプルングする．A/D サンプルング時に，ビットの情報が失われないためには，1 ポイント/ビット以上のサンプルングレートを常に確保する必要があるため，テープ搬送速度変動を考慮したレートでのオーバーサンプルングが必要となる．テープにおける記録再生は接触式であるため，ヘッド浮上式のディスク型装置に対して，ヘッド-媒体間の摩擦に起因する搬送時の速度変動が大きい．記録再生信号の位相変化から凡そ 1% 程度の速度変動があることを確認したため，局所的に発生するジッターも考慮した上で，本実験でのサンプルングレートは，余裕を持ってビットレートの 1.25 倍とした．

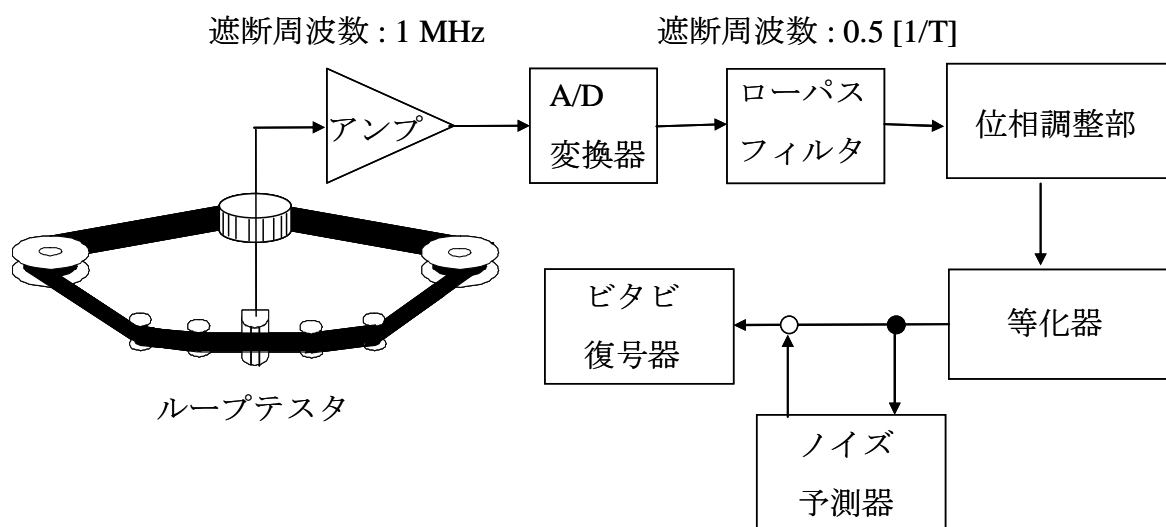


図 2.2 実験系全体の概要

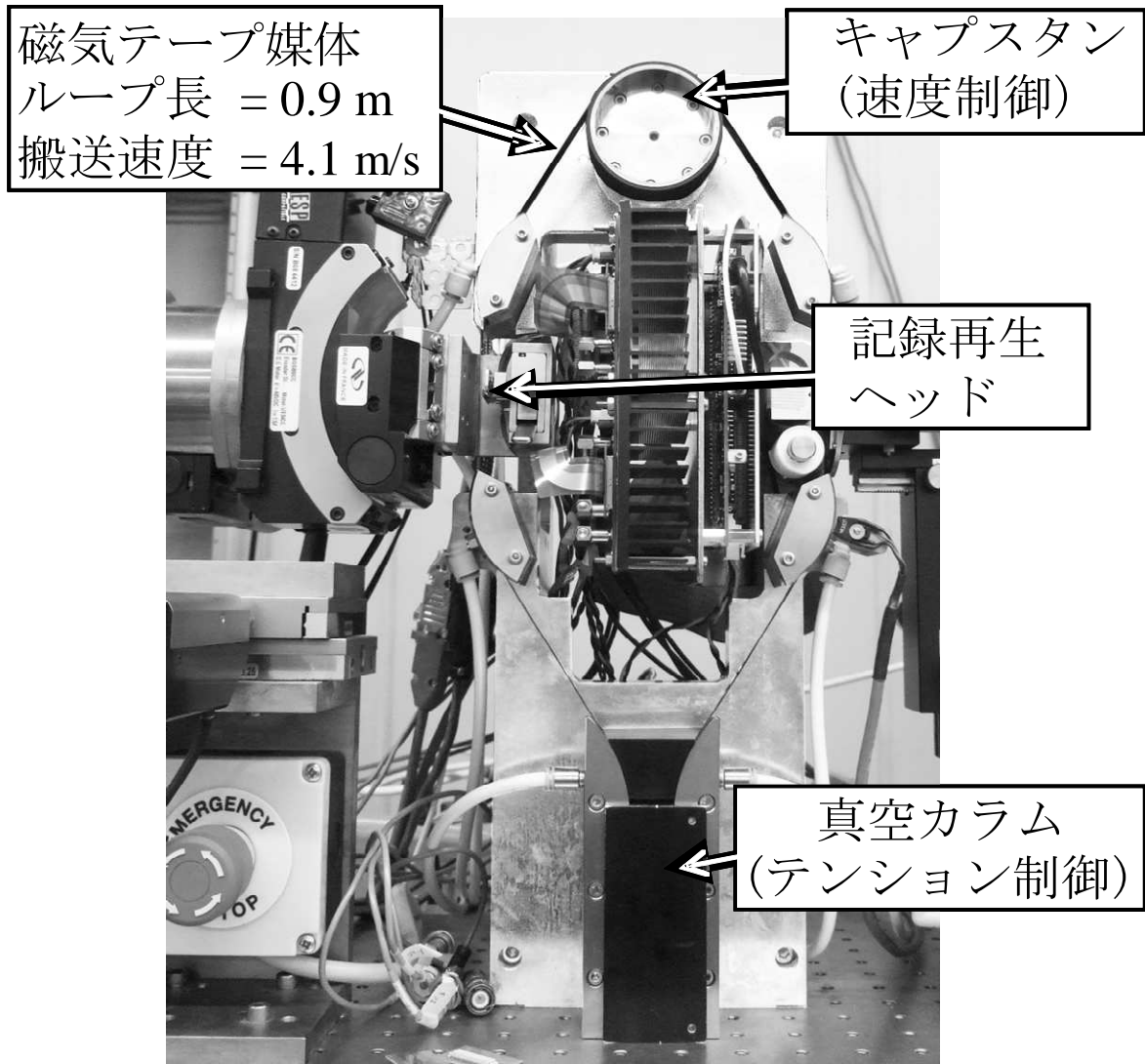


図 2.3 実験で用いたループテスタ

2.4 信号処理過程

記録再生波形を A/D サンプリングした系列 $\{x_k\}$ を、遮断周波数 $1/T$ 、タップ数 101 の低域通過特性を持つ FIR (Finite Impulse Response) フィルタをとおした後に、位相調整処理を施す。ここで、 T は記録再生されるビットの時間間隔を意味する。位相調整処理は前述したテープ-ヘッド摺動時に発生するジッターを補正し、検出点の位置をそれぞれ適切な時間軸上の位置に置きなおす処理である。媒体の速度変動が大きいテープシステムでは、特に高記録密度において如何に正確な位相調整を実現するかが課題となっている(詳細は 3 章にて述べる)。しかしながら、本節の目的はあくまで最適な PR ターゲットの検討であるため、ここで記録信号系列が既知の繰り返しパターンであることを利用して、理想信号系列との相互相関係数が最大となるようなレートで系列 $\{r_k\}$ をリサンプリングすることで、ジッターの影響をほぼ完全に除去している。位相調整処理が施された系列 $\{x_k\}$ は、タップ数 17 の FIR フィルタにより、所望の PR 特性に波形等化された後にノイズ予測フィルタを通され、全体として $G(D) = (1-\alpha D)(1+D)(1-P(D))$ の特性を持つ GPR (Generalized Partial Response) チャンネルにより処理される。ここで、 $P(D)$ はノイズ予測器の項を示しており、状態数が 16 の GPR チャンネルを用いる場合は、 $P(D) = p_1 D + p_2 D^2$ [26], [34] となる。なお、本検討で用いたノイズ予測器の係数 p_i は、Yule-Walker 方程式の解として Levinson-Durbin のアルゴリズムを解くことで求めた [38]。GPR チャンネル出力系列 $\{y_k\}$ は、その後ビタビ復号器により、0, 1 の系列に復号され、その結果を既知の記録再生系列と比較することで、ビットエラーレートの評価を行った。ここで、 α は PR ターゲットの DC 成分調整係数であり、 $\alpha = 0$ としたとき、GPR チャンネル全体は DC 成分が最大となる PR1 特性を有し、逆に $\alpha = 1$ のとき、DC 成分が 0 となる PR4 特性を有する。一方、 $\alpha = 0, 1$ のときは DC 成分が抑制された PR3 特性を有し、 α の値に応じて、PR ターゲットの DC 成分を調整することが可能である。一般に SPT ヘッドと、SUL を採用した現行の垂直記録 HDD システムでは、PR1 や、PR3 といった DC 成分を有する PR ターゲットが良好な性能を示すことが知られている [35]-[37]。図 2.4 に α が 0 ~ 1.5 のそれぞれの値をとったときの各種 PR ターゲットの周波数特性を示す。 α の値に応じて、

ターゲット波形の DC 成分が変化していることが分かる.

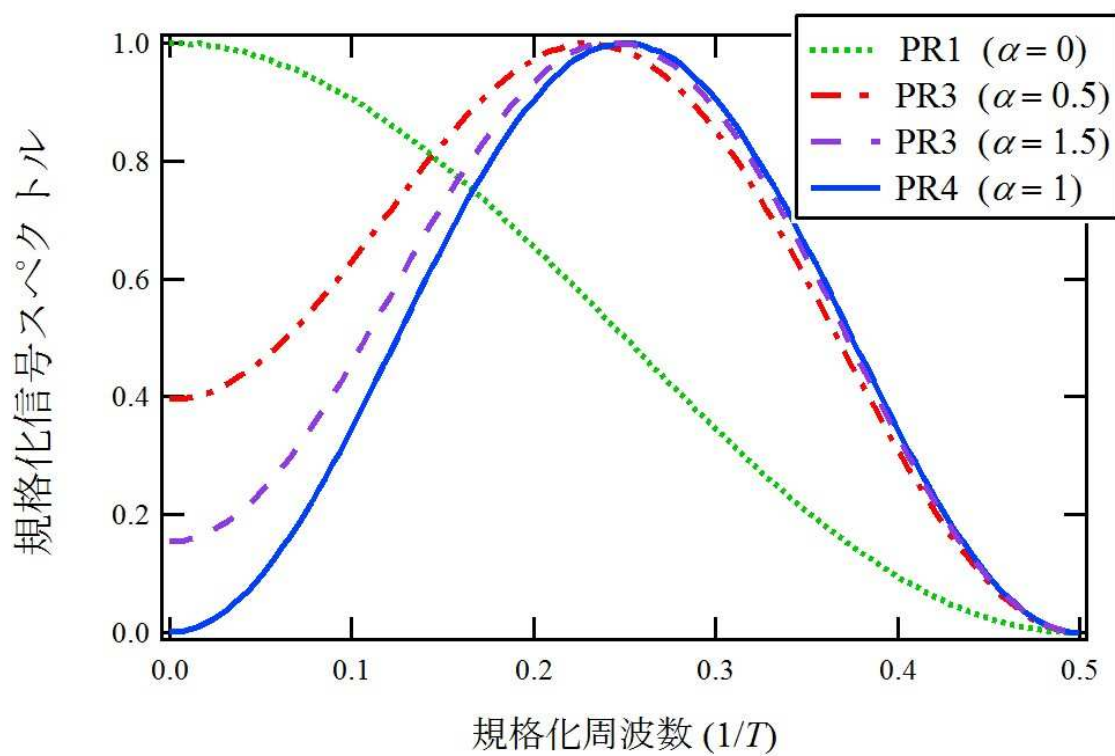


図 2.4 $\alpha = 0 \sim 1.5$ のときの各種 PR ターゲットの周波数特性

2.5 記録再生信号の特性評価

本節では、テープ塗布面に対し、磁性体がそれぞれ①面外垂直配向、②面内長手配向、③無配向 のバリウムフェライト媒体に対する記録再生信号の特性を評価した結果について示す。まず、各媒体に対して、2Tの単一パターンを記録し、再生した信号を評価した結果を示す。実機では媒体にランダムなパターンが記録されるが、記録再生信号の基礎特性を理解する上で、単一パターンの記録再生信号解析は有効である。実験で測定された単一信号波形の出力、及びノイズの値を表 2.2 に示す。ノイズは、図 2.5 に示すノイズスペクトルをそれぞれ、DC ~ 1/T の範囲で積分することで求めている。長手、垂直に関わらず配向することで、特に低域のノイズが上昇するが、それ以上に出力が向上するため、出力とノイズの比である SNR は配向により、向上していることが分かる。

次に、より実技に近い、PRBS パターン記録再生波形の特性を評価した結果を示す。波形の解析には、FIR 等化前の系列 $\{x_k\}$ を用いた。図 2.6 はこれら配向の異なるバリウムフェライト媒体の PRBS パターン記録再生波形の周波数特性を示している。無配向媒体と、垂直配向媒体には殆ど差が無いが、長手配向では、これらに対して低域の出力が大きく、逆に高域の出力が小さい傾向が見られる。これは単一パターンを記録再生した際に得られたノイズスペクトルの傾向と一致するものである。一般に、SUL を採用した垂直記録媒体の記録再生信号は、(SUL の存在により)再生ヘッドの実効的な MR 感度関数が広がるため、その記録再生信号は大きな低域成分を持つことが知られている。一方で、単層の垂直媒体においては必ずしもそうならないことが知られており[31]、SUL を用いていない現行の垂直テープ媒体において、記録再生信号の低域成分が小さいことは妥当な結果と解釈できる。

図 2.6 が再生信号出力の周波数特性を示しているのに対し、図 2.7 は、SNR の周波数特性、即ち各周波数帯域における信号と、ノイズの比をプロットしている。なお、算出方法に関しては、記録パターンが既知の 255 ビット繰り返し系列であることを利用し、各々の 255 ビット分の波形をアベレージした波形を理想信号、また理想信号と実波形との差分をノイズと定義した。すなわち、同一パターンを記録再生して得られた実波形の

うち、再現性のある分を信号、再現性のない分をノイズとした。

$$Noise \equiv y^i - \overline{y^i} \quad (i = 1 \sim 255) \quad (2-1)$$

このように、信号系列とノイズ系列を分離し、それらの FFT(Fast Fourier Transform)結果から SNR の周波数特性を算出している。

また、それぞれ配向の異なるバリウムフェライト媒体記録再生信号のダイビット応答を、図 2.8 に、旧来用いられてきた針状のメタル媒体と、垂直配したバリウムフェライト媒体のダイビット応答を比較した結果を図 2.9 に示す。長手配向バリウムフェライト媒体、及び同じく長手配向したメタル媒体は、いずれもダイビット応答波形が上下対象であり、PR4 や、EPR4(extended partial response class 4)といった長手磁化媒体に適した DC 成分を持たない PR4 型ターゲットのダイビット応答に近い。これに対し、無配向、垂直配向と、磁化の長手成分が減少し、垂直成分が大きくなるにつれ、ダイビット応答波形の上下対象性に歪みが生じていることが分かる。

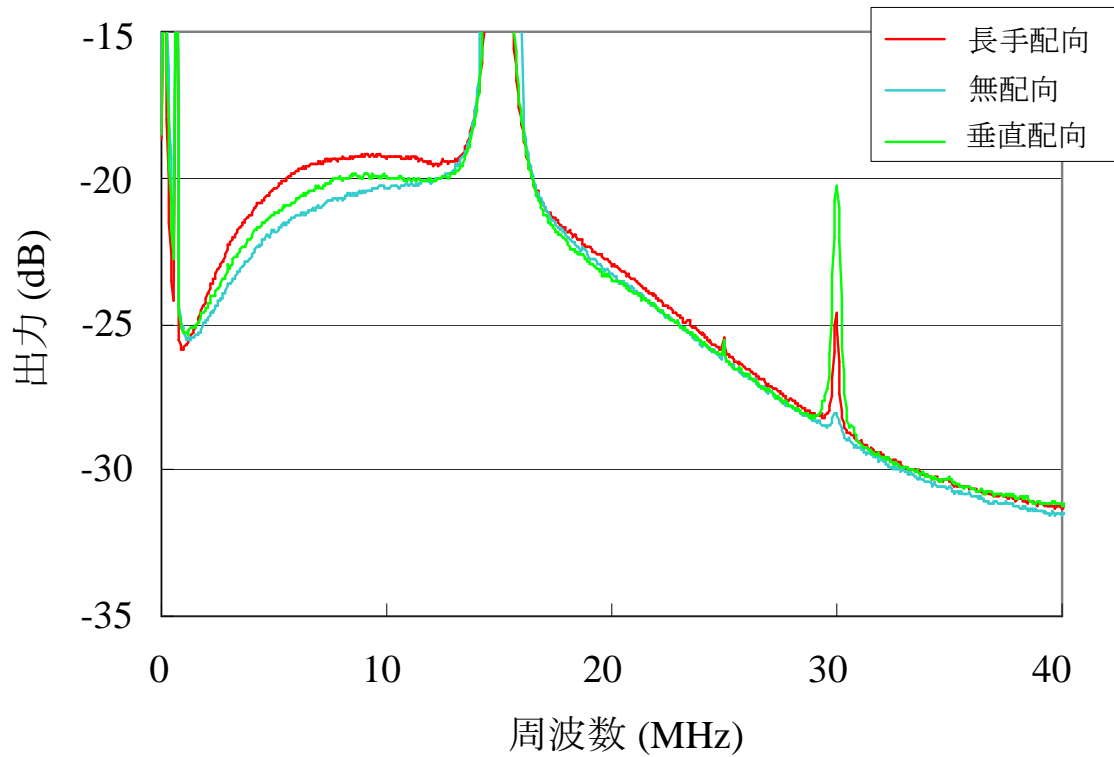


図 2.5 2T 単一記録再生信号のスペクトル

表 2.2 2T 単一記録再生信号の出力，及びノイズの値（無配向媒体を基準: 0dB とした）

	長手配向	無配向	垂直配向
出力 (dB)	+0.5	0.0	+2.0
ノイズ (dB)	+0.5	0.0	+0.6
SNR (dB)	0.0	0.0	+1.4

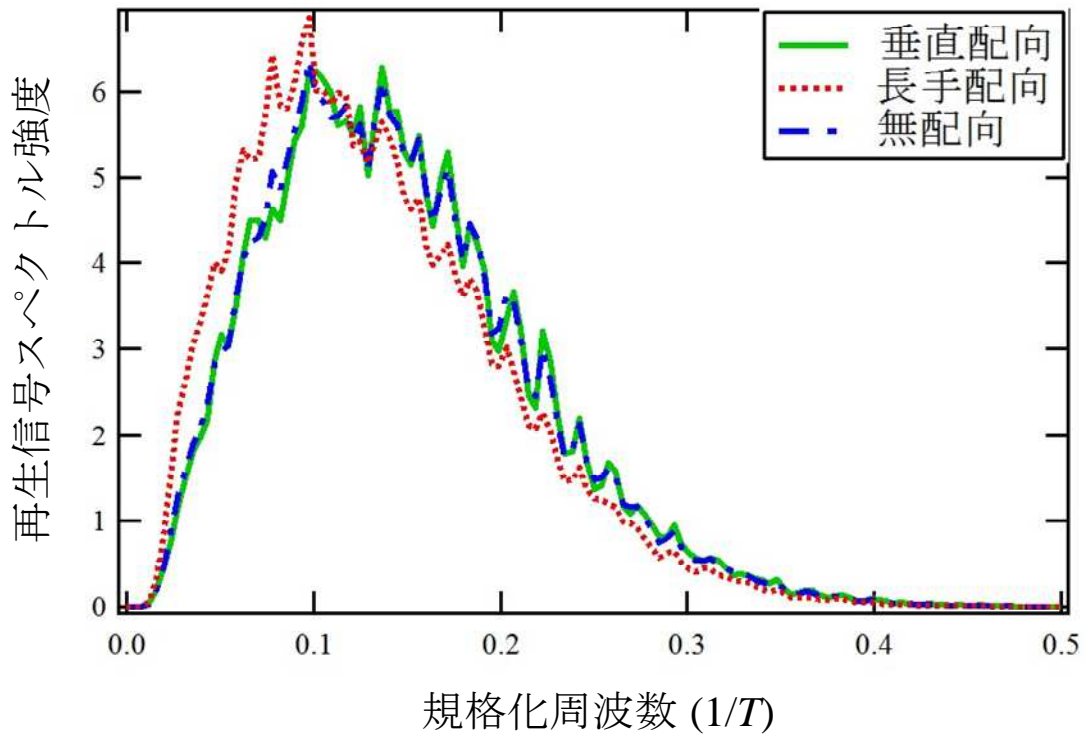


図 2.6 PRBS パターン記録再生信号出力の周波数特性

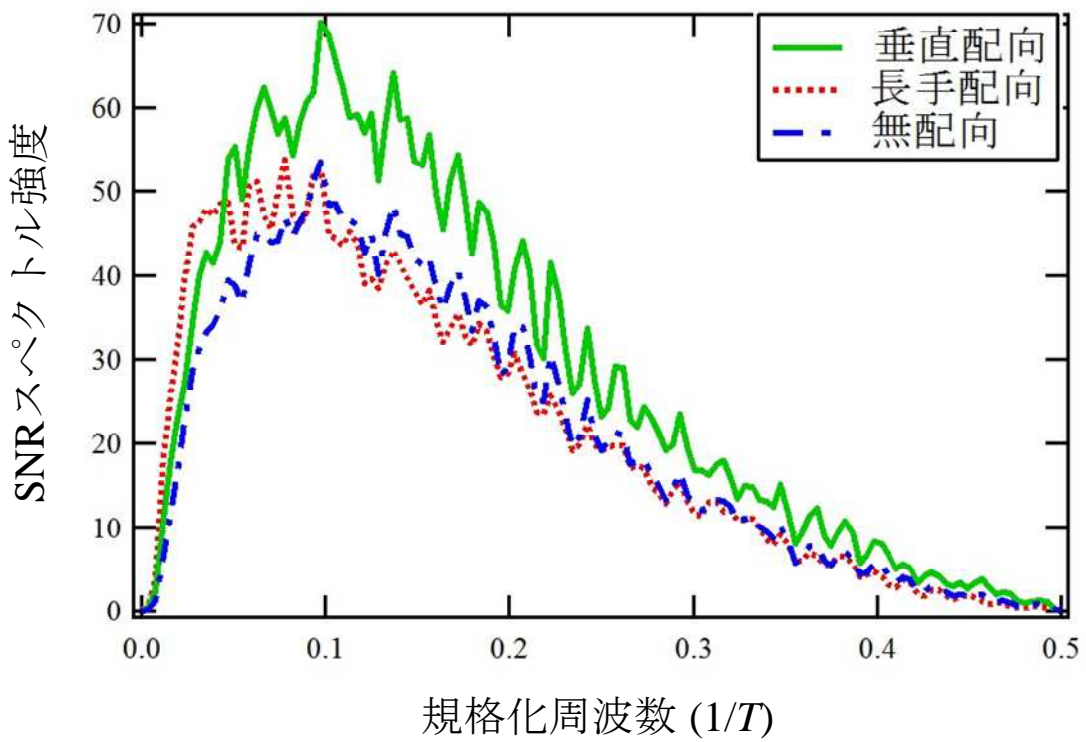


図 2.7 PRBS パターン記録再生信号 SNR の周波数特性

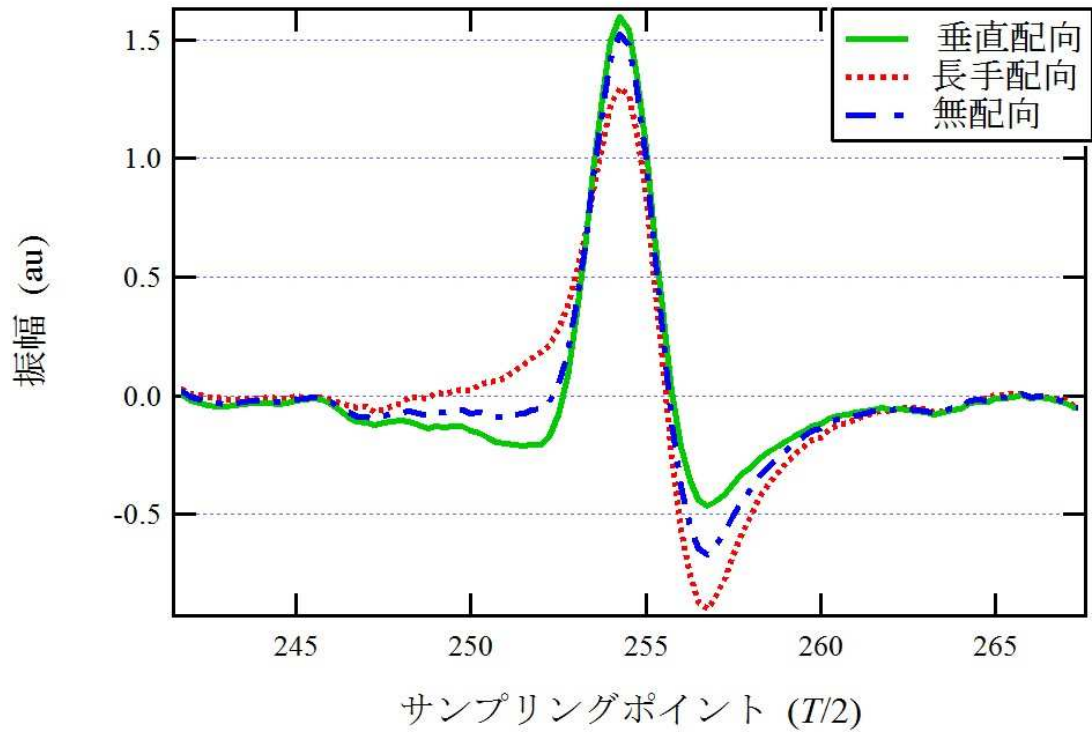


図 2.8 配向状態の異なるバリウムフェライトテープ媒体のダイビット応答波形

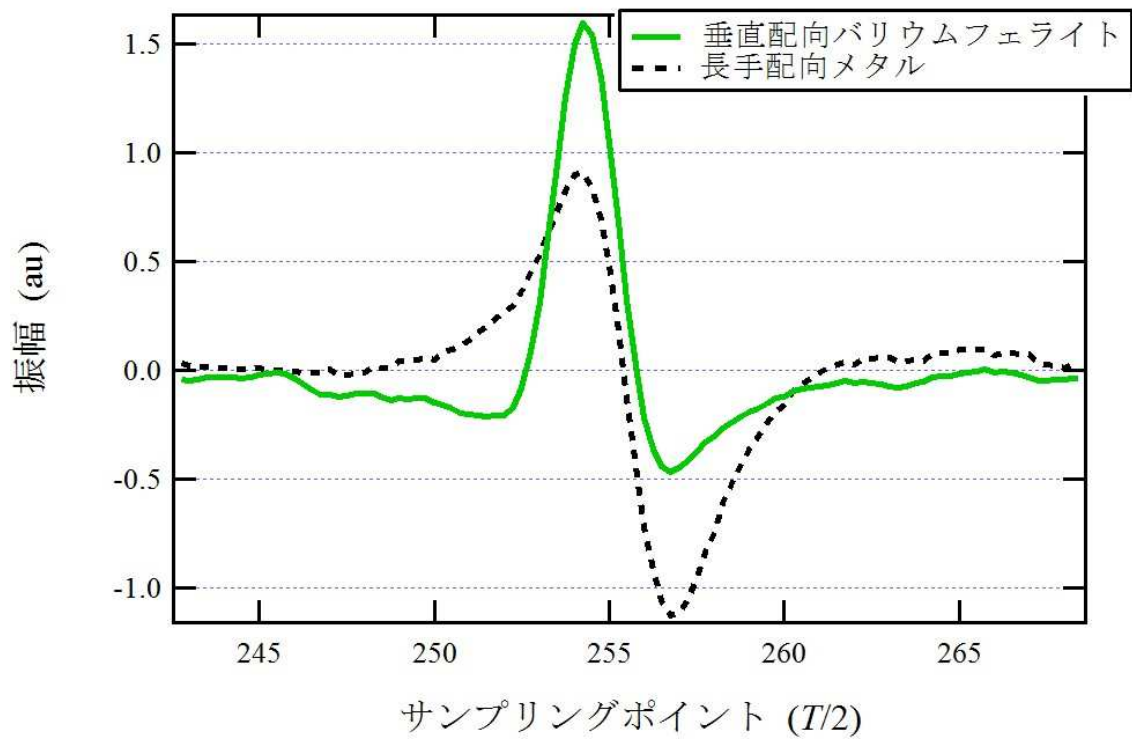


図 2.9 バリウムフェライト媒体とメタル媒体のダイビット応答波形

2.6 記録再生信号のビットエラーレート評価

本節では、配向したバリウムフェライト媒体に関し、それぞれ DC 成分の異なる PR ターゲットを用いた際のビットエラーレートを示す。信号処理チャンネルについては、前述のとおり、 $G(D) = (1 - \alpha D)(1 + D)(1 - P(D))$ の特性をもつ GPR チャンネルを用いた。長手、及び、垂直に配向したバリウムフェライト媒体記録再生信号に関して、それぞれ異なる α 、状態数を用いたときのビットエラーレートを図 2.10, 2.11 にそれぞれ示す。特に、 $\alpha = 0$ (ターゲットの DC 成分が最大) のときと、 $\alpha = 1$ (ターゲットの DC 成分が 0) のときに関して、状態数が増加するにつれ、ビットエラーレートが大きく改善する傾向が長手配向、垂直配向に共通した特徴として確認された。一方で、いずれの配向の場合も、DC 成分を調整したターゲットを用いた場合、即ち、 $\alpha \neq 0, 1$ のときには状態数の増加によるビットエラーレートの改善効果は小さかった。ここで、状態数が小さいときに $\alpha = 0$ 、及び $\alpha = 1$ におけるビットエラーレートが大きいのは、図 2.4 に示した各種 PR ターゲットの周波数特性と、図 2.6 に示した記録再生信号との不一致によるものと考えられる。 $\alpha = 0$ の場合は、周波数の DC 成分において、また、 $\alpha = 1$ の場合は周波数の高域成分において、PR ターゲットと、実記録再生信号のそれぞれの周波数特性の間に乖離が生じているために、波形等化後のノイズ強調により、劣化が生じたものと考えられる。一方、状態数の向上に伴い、ノイズ予測器の次数が向上するため、波形等化時に強調されたノイズが白色化され、結果的に 16 以上の状態数では、ビットエラーレートの α 依存性が小さくなっていることが分かる。また、状態数の増加に伴うビタビ復号時の符号化利得のため、ビットエラーレートの値も全体として改善している。

上記結果は、媒体の配向に依らないため、垂直配向バリウムフェライト媒体であっても長手配向媒体と概ね同様の記録再生信号周波数特性を示し、結果的に最適な PR ターゲットに関しても配向による差異が無いことが本結果から読み取れる。なお、垂直配向媒体のビットエラーレートが長手配向媒体に対して良好なのは、前者の方が記録再生信号の SNR が高いためであるが、これは媒体の角型比から分かるように長手配向媒体に対して垂直配向媒体の配向度が高いことに由来する。

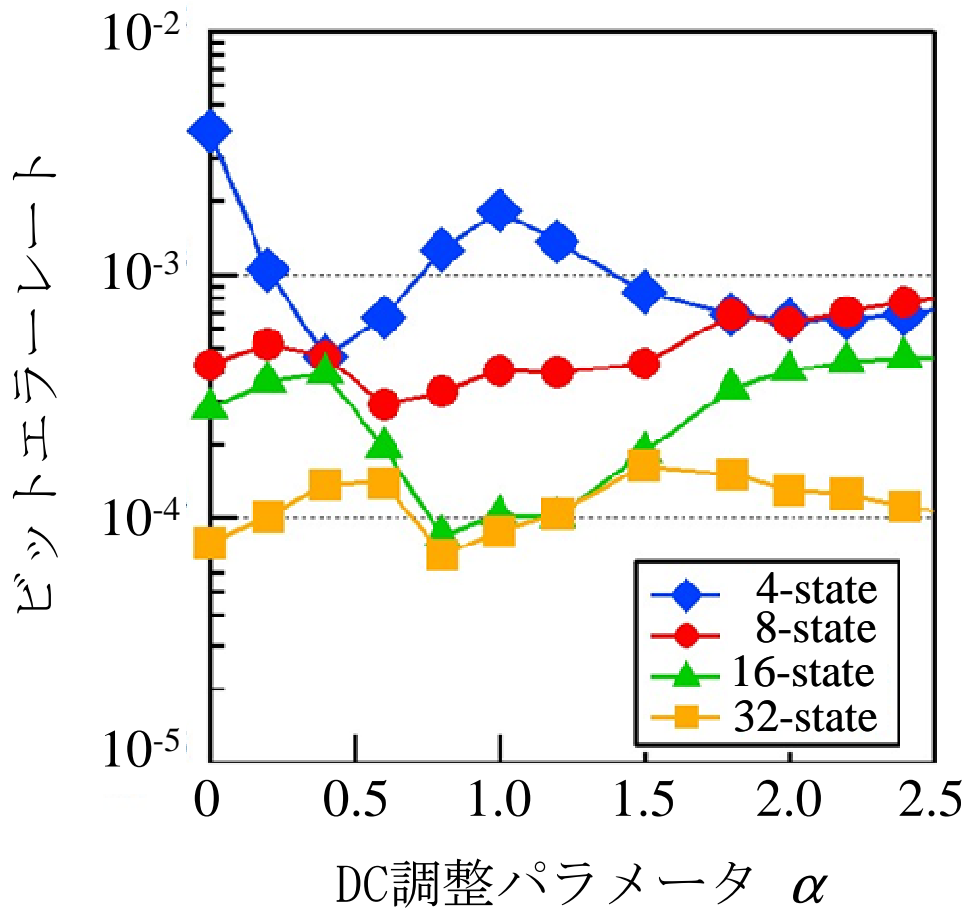


図 2.10 ビットエラーレートの α 依存性 (垂直配向バリウムフェライト媒体)

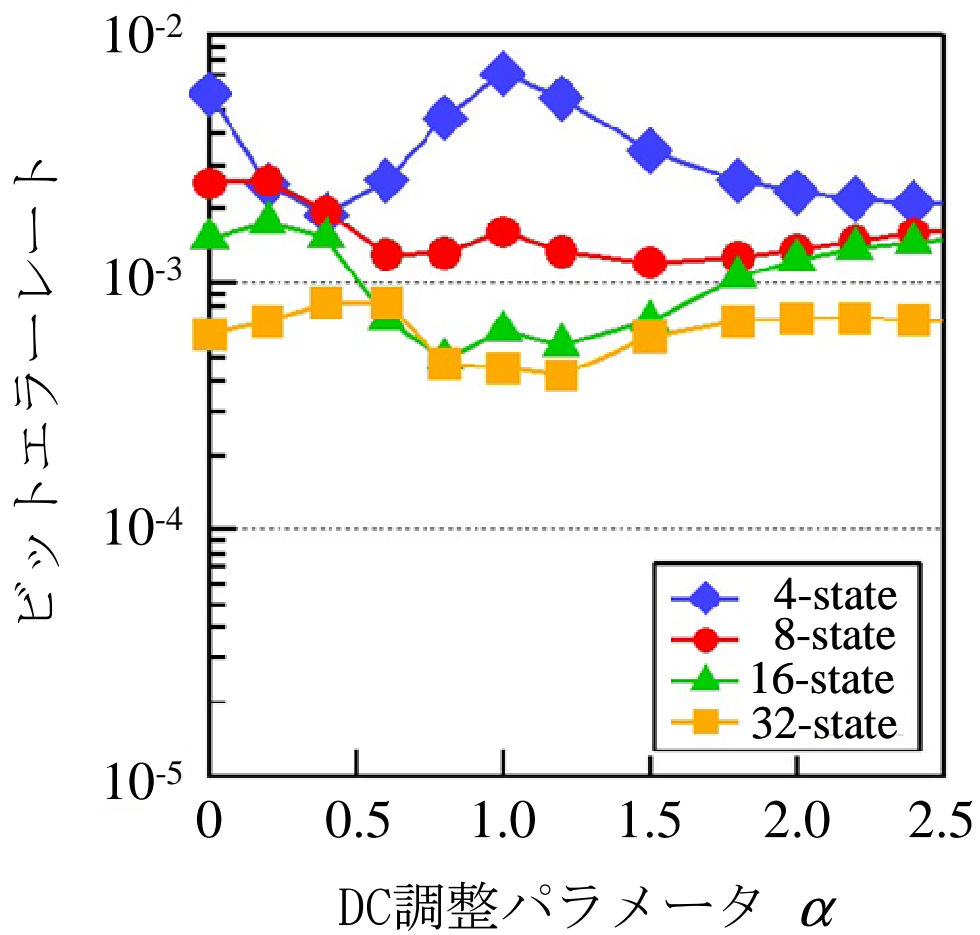


図 2.11 ビットエラーレートの α 依存性 (長手配向バリウムフェライト媒体)

2.7 まとめ

現行の磁気テープシステムにおいて採用されている（SUL の無い）単層記録媒体と、薄膜リングヘッドによる記録方式との組み合わせにおいて、それぞれ長手配向，垂直配向，無配向のバリウムフェライト媒体の記録再生信号特性，及び異なる DC 成分を持つ PR ターゲットにおけるビットエラーレート評価を行った．その結果，ダイビット応答波形に関しては，磁化の垂直成分の増大により上下対称性が歪む傾向が確認されたが，再生信号の周波数特性には配向違いで大きな差異は確認されなかった．また，ビットエラーレートの α 依存性も本周波数特性を反映した結果となっており，配向の違いにより最適な α の値が変わらないことが確認できた．特に現行のテープシステムが採用する $L=2$ の GPR チャネルにおいては，従来の長手記録媒体で用いられてきた $\alpha=1$ ，即ち PR ターゲットの DC 成分が 0 となる PR4 特性がほぼ最適なビットエラーレート特性を示すことを確認した．これは，現行のテープシステムにて採用されている記録再生方式，及び信号処理方式が垂直配向バリウムフェライトテープ媒体に良く適合することを示すものであり，今後，更に角型比を向上させた垂直配向バリウムフェライト媒体を用いることで，磁気テープシステムの更なる記録密度向上が可能であることを示している．

第 3 章 高記録密度テープシステムに適したタイミング・リカバリ方式の検討

3.1 はじめに

先に述べたとおり，信号処理方式の改良により磁気テープストレージシステムは今後も大きく記録容量を伸ばすポテンシャルを持つ．これはテープと同様に磁気記録媒体を用いる HDD で，現在，主として LDPC(low density parity check) 符号を用いた繰り返し復号法を採用しているのに対し，テープシステムは未だ PRML 方式と RS 符号を組合せる HDD の一世代以上前の信号処理方式を採用しているためである．現行のテープシステムの信号処理方式を改良することによる，大幅な利得から更なる大容量化が期待される．

一方で，磁気テープシステムは例えば HDD と比べ媒体搬送時の速度変動が大きい，といった特徴も持つ[22]．このため，将来に渡って今よりも高密度化が進み，低 SNR の記録再生系のもとで動作するためには，信号処理回路の中でタイミング・リカバリ機構の動作安定性に課題を持つ．タイミング・リカバリ機構は一連の信号処理回路の中でも前段に位置しており，本機構が適切に機能しないことには高度なエラー訂正方式を採用したとしても，正しく信号を検出することはできない．従って，今後繰り返し復号方式等に採用により，テープシステムの更なる高記録密度化を実現するためには，低 SNR の記録再生系においても安定に動作するタイミング・リカバリ方式を開発することが重要となる．

本章では，従来のテープシステムで用いられてきたタイミング・リカバリ方式の課題を明らかにした上で，低 SNR 記録再生系においても，動作が安定なタイミング・リカバリ方式の検討を行う．

3.2 テープシステムのタイミング・リカバリ回路概要

本節では、現行の磁気テープシステムで採用されているタイミング・リカバリ機構の概要について説明する。まず、現行のテープシステムで採用されている一般的な信号処理回路全体の概要を図 3.1 に示す[28]。プリアンプで増幅された再生信号はアンチ・エイリアシングフィルタにより帯域外のノイズを除去した後に、A/D 変換器でサンプリングされ、再生信号系列 $\{r_k\}$ を生成する。A/D 変換時のサンプリングレートとしては、テープの速度変動を加味した上で、記録再生系のクロック周波数を上回る適切な値が設定される。再生信号系列 $\{r_k\}$ は、FIR フィルタにより波形等化され、等化器出力系列 $\{x_k\}$ を生成した後に、タイミング・リカバリ回路に入力される。タイミング・リカバリ回路の役割は、検出点の時間間隔 T に対してオーバーサンプリングされたクロック T_s を有する等化器出力系列 $\{x_k\}$ を再度ダウンサンプリングし、その際に各点が時間軸上において適正な位置となるよう調整することで検出器入力系列 $\{y_k\}$ を生成することである。 T_s が T に対して十数倍以上高ければ、ダウンサンプリングする際に最も適当な位相のサンプル点を選択すれば良いが、一般に高速な A/D 変換器は高価であり、消費電力も大きいので、オーバーサンプリングレートは可能な限り低いことが望ましい。実際には実装上のコストを鑑みた上、オーバーサンプリングレートはクロック周波数に対して数十%程度上乗せされた値に設定されることが一般的である[39]。この場合、オーバーサンプリングクロック T_s の時間軸で波形等化された $\{x_k\}$ 系列のサンプル点間を補間することで、適正な位相における再生信号振幅を算出することが必要となる。すなわち、タイミング・リカバリ回路の機能はテープの搬送速度変動を受け、時々刻々と変化する再生信号の位相誤差を検出し、デジタルサンプリングされた系列間の点を補間することで適正な位相における振幅を算出することである。図 3.1 に示されるとおり、タイミング・リカバリ回路はビタビ復号器、位相誤差検出部、位相オフセット算出部、補間フィルタ部で構成される。タイミング・リカバリ回路におけるビタビ復号器の機能と課題については次節で議論するため、本節では位相誤差検出部、位相オフセット算出部、補間フィルタ部の詳細について述べる。

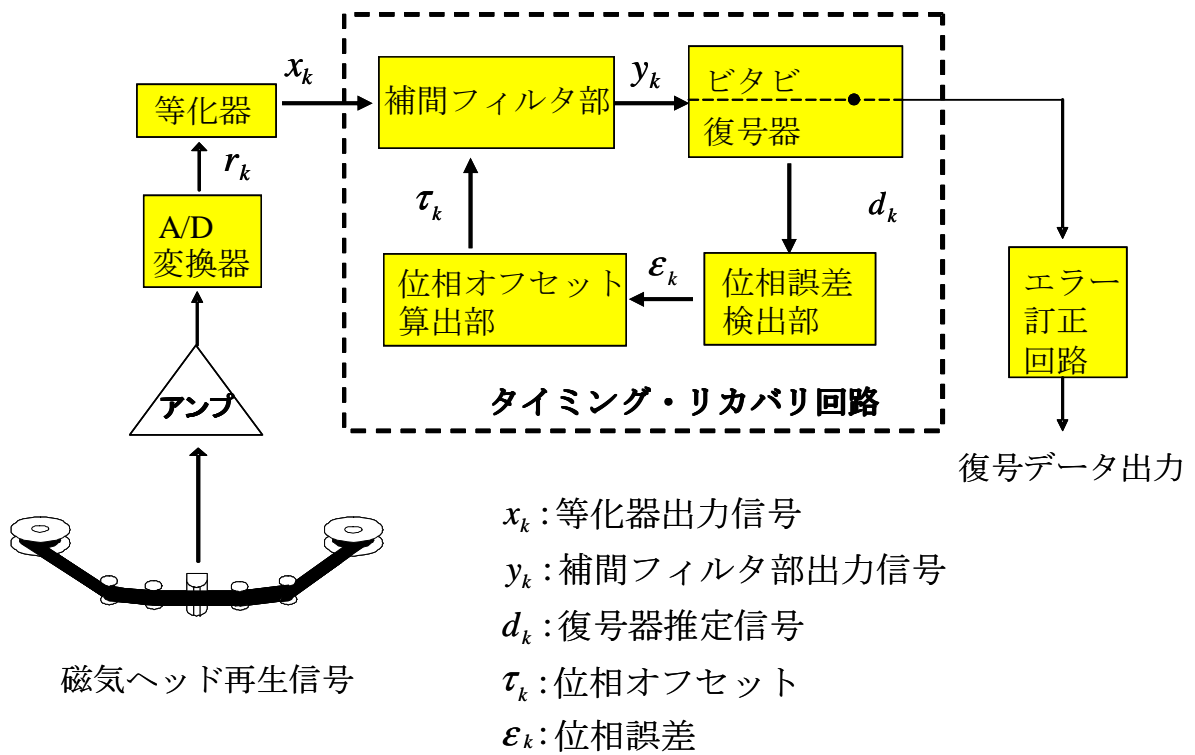


図 3.1 現行の磁気テープシステムで採用されている信号処理回路概要

3.2.1 位相誤差検出部

位相誤差検出部では検出器入力系列 $\{y_k\}$ において残存する位相誤差を検出する．位相誤差を算出するためのアルゴリズムはいくつか存在するが，**Mueller and Müller** らの方法 [40]がその簡便性からしばしば用いられ，これによれば位相誤差系列 $\{\epsilon_k\}$ は

$$\epsilon_{k-\Delta} = y_{k-\Delta} d_{k-1-\Delta} - y_{k-1-\Delta} d_{k-\Delta} \quad (3-1)$$

と定義される．ここで $\{d_k\}$ はビタビ復号器の判定結果から得た検出器推定値系列，即ち検出器入力系列 $\{y_k\}$ に対応した理想値を意味する．このとき問題となるのは，検出器推定値系列 $\{d_k\}$ を算出するのに要する遅延 Δ である．信号の再生時間には， $\{d_k\}$ に対応した記録系列を事前を知る手段は無いため， $\{d_k\}$ の推定にはビタビ復号器が記録系列の判定に要するビット分の遅延 Δ が必要となる．一般に遅延 Δ を大きくとるほどビタビ復号器の判定の信頼性は高くなるため，誤った $\{\epsilon_k\}$ を算出するリスクは低下する．一方，急峻な位相変化に対する追従性は低下するため，記録再生系の SNR やテープ媒体の搬送速度変動の大きさに応じて最適なフィードバック遅延量 Δ を採用することが重要となる．

3.2.2 位相オフセット算出部

位相オフセット算出部では位相誤差系列 $\{\epsilon_k\}$ をもとに，位相オフセット系列 $\{\tau_k\}$ を算出する．一般に位相オフセット系列 $\{\tau_k\}$ の算出には，その動作安定性から 2nd order PLL の構成法が用いられることが多く，これによれば $\{\tau_k\}$ は次式で与えられる [41]．

$$\left. \begin{aligned} \theta_k &= \theta_{k-1} + \beta \epsilon_k \\ \tau_{k+1} &= \tau_k + \alpha \epsilon_k + \theta_k \end{aligned} \right\} \quad (3-2)$$

ここで $\{\theta_k\}$ は周波数オフセット系列であり $\{\tau_k\}$ の微分項に相当する。また、 α と β は、それぞれ $\{\tau_k\}$ と $\{\theta_k\}$ に対応した PLL のゲインパラメータであり、これらの設定値によりタイミング・リカバリ回路全体の動作帯域と収束率が決定される。ゲインパラメータに大きな値を設定することで帯域が広がり、急峻なテープ速度変動に伴う位相変動への追従性は高くなるが、一方で高域ノイズの影響を受けやすくなるデメリットもあるため、前述のフィードバック遅延量 Δ と同様に、それぞれの記録再生系に適した値を設定することが重要となる。

3.2.3 補間フィルタ部

補間フィルタ部では、オーバーサンプリングクロック T_s 間隔でサンプリングされた等化器出力系列 $\{x_k\}$ における位相のズレ量を補正するための補間フィルタを適用することで、記録再生系のクロック T と同期した検出器入力系列 $\{y_k\}$ を生成する。このときの補間フィルタ係数は位相オフセット系列 $\{\tau_k\}$ を基に決定される。ここで注意すべきは、 $\{\tau_k\}$ はクロック T の時間軸において算出された値であるが、 $\{\tau_k\}$ に基づいて決定される適正なサンプリング位置は T_s の時間軸における内挿値となることである。従って、 T_s の時間軸における位相オフセット量を算出するためにはサンプリング位置のインデックス系列 $\{t_k\}$ を以下の式から求める必要がある。

$$t_k = kT + \tau_k = (m_k + \mu_k)T_s \quad (3-3)$$

なお、上式の $\{m_k\}$ は基準クロックのインデックスであり、次式で与えられる整数値をとる。

$$m_k = \lfloor (kT + \tau_k) / T_s \rfloor \quad (3-4)$$

ここで $\lfloor x \rfloor$ は x の床関数であり、 x を超えない最大の整数値を意味する。一方、 $\{\mu_k\}$ は $\{m_k\}$

に対応した小数点以下の補正系列であり,

$$\mu_k = (kT + \tau_k)/T_s - m_k \quad (0 \leq \mu_k < 1) \quad (3-5)$$

で与えられる. これらを用いることで, 例えばサンプリング時刻 $(m+\mu)T_s$ における $\{x_k\}$ の内挿値 $x_\mu(m)$ は,

$$x_\mu(m) = x(t)|_{mT_s + \mu T_s} = \sum_{k=-\infty}^{\infty} x(kT_s) \frac{\sin((mT_s + \mu T_s - kT_s)\pi/T_s)}{((mT_s + \mu T_s - kT_s)\pi/T_s)} \quad (3-6)$$

より求められ, これは系列 $\{x_k\}$ に対して次式で与えられる補間フィルタ $f_\mu(m)$ を重畳することと等価である.

$$f_\mu(m) = f_\mu(mT_s, \mu T_s) = \frac{\sin((mT_s + \mu T_s - kT_s)\pi/T_s)}{((mT_s + \mu T_s - kT_s)\pi/T_s)} \quad (m = \dots, -1, 0, 1, \dots) \quad (3-7)$$

実際にはフィルタのタップ数は有限である必要があるが, タップ数が 8 以上あればそれ以上のタップ数を採用することで得られる利得は少ないため, 本検討では補間フィルタのタップ数は 11 ($m = -5, -4, \dots, 0, \dots, 4, 5$) とした.

3.3 実験系の概要

前述のタイミング・リカバリ回路をソフトウェアで構築し、実際のテープ媒体記録再生信号に適用した。本節では具体的な実験条件について説明する。

本検討では、搬送速度安定性の異なる以下2条件で取得したテープ媒体の記録再生信号を用いた。

- ① サーボ制御を施した市販のテープドライブを用い、3.0 m/s でテープ媒体を搬送させた際の記録再生信号
- ② サーボ制御のないループテストを用い、4.1 m/s で搬送させた際の記録再生信号

図 3.2 に①、②のそれぞれに関し、記録再生信号の位相から見積もった周波数変動のデータを示す。搬送中のテープの速度変動に由来する信号の周波数変動はいずれも概ね1%以内となっていることが確認できるため、十分なマージンを見込んだ上でA/D変換時のオーバーサンプリングレートは、クロック×1.25とした。A/D変換後のデータ系列 $\{r_k\}$ は、まずEPR4特性に波形等化され、等化器出力系列 $\{x_k\}$ が生成される。媒体の速度変動の影響を受けた $\{x_k\}$ の位相は、前述のタイミング・リカバリ回路により位相調整され記録再生系のクロック T と同期した系列 $\{y_k\}$ が生成される。なお、本検討では位相オフセット系列 $\{\tau_k\}$ の算出に採用した2nd order PLLのゲインパラメータ α, β に関し、検出点におけるSNRが最大となるよう、それぞれ最適な値を選定した。ここでSNRは位相調整回路出力 y と y の理想値 y_{ideal} を用いて次式で定義した。

$$SNR \equiv 10 \log \left(\frac{E[y_{ideal}^2]}{E[(y - y_{ideal})^2]} \right) \quad [\text{dB}] \quad (3-8)$$

ここでの $E[y]$ は y の平均値を意味する。

図 3.3、及び図 3.4 にそれぞれサーボ制御機構を有するテープドライブ、サーボ制御がないループテストで取得した記録再生信号を用い、タイミング・リカバリ回路を動作さ

せた際の各 α 、及び β における SNR の等高線プロットを示す。いずれも今回検討した線記録密度、及びフィードバック遅延ビットの範囲内において最適なフィードバック定数の組み合わせが概ね変わらないことを確認した上で、本検討ではそれぞれ表 3.1 の値を採用した。なお、オープンテストに対してサーボ制御したテープドライブの方が α 、 β の最適値が小さいのは、後者の方がテープの搬送速度変動が小さく、タイミング・リカバリ回路の動作帯域を低く設定することが可能なためである。

表 3.1

	α	β
①サーボ制御機構を有するテープドライブ	0.006	0.00002
②ループテスト	0.03	0.0003

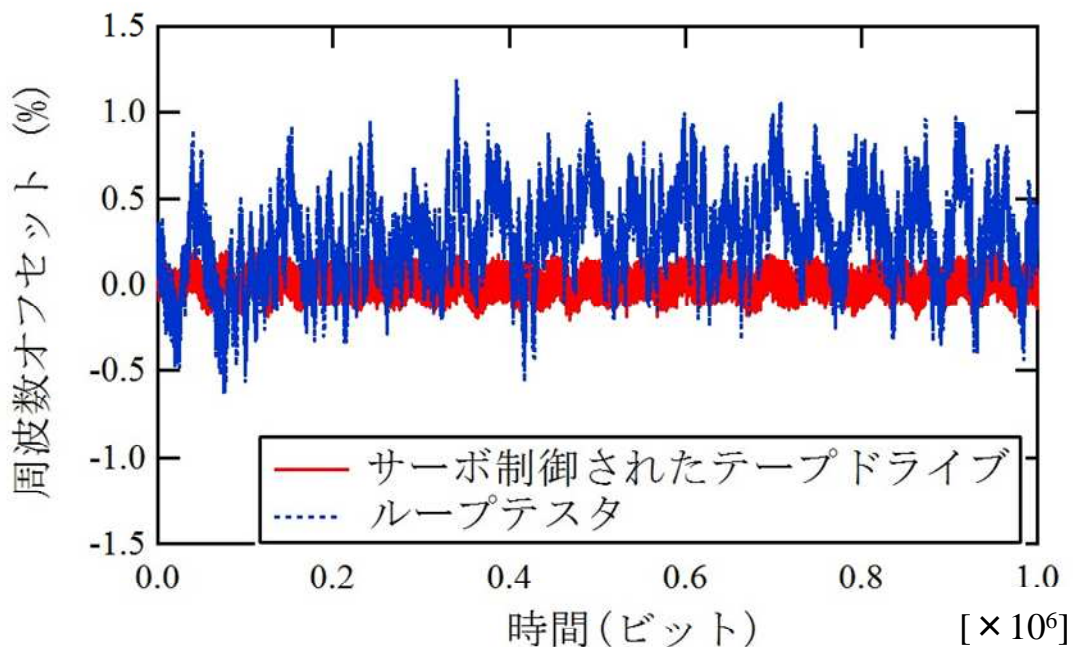


図 3.2 記録再生信号の位相から見積もった周波数変動

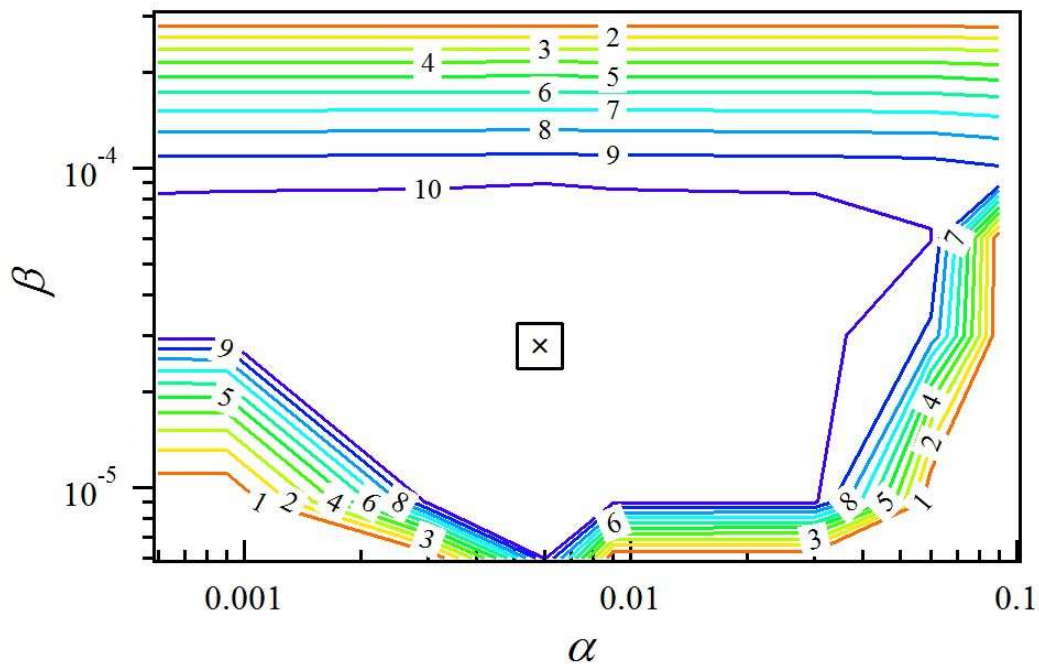


図 3.3 テープドライブ記録再生信号を用いた各 α , 及び β における SNR の値
(SNR = 10.5 dB, フィードバック遅延 = 20 bit)

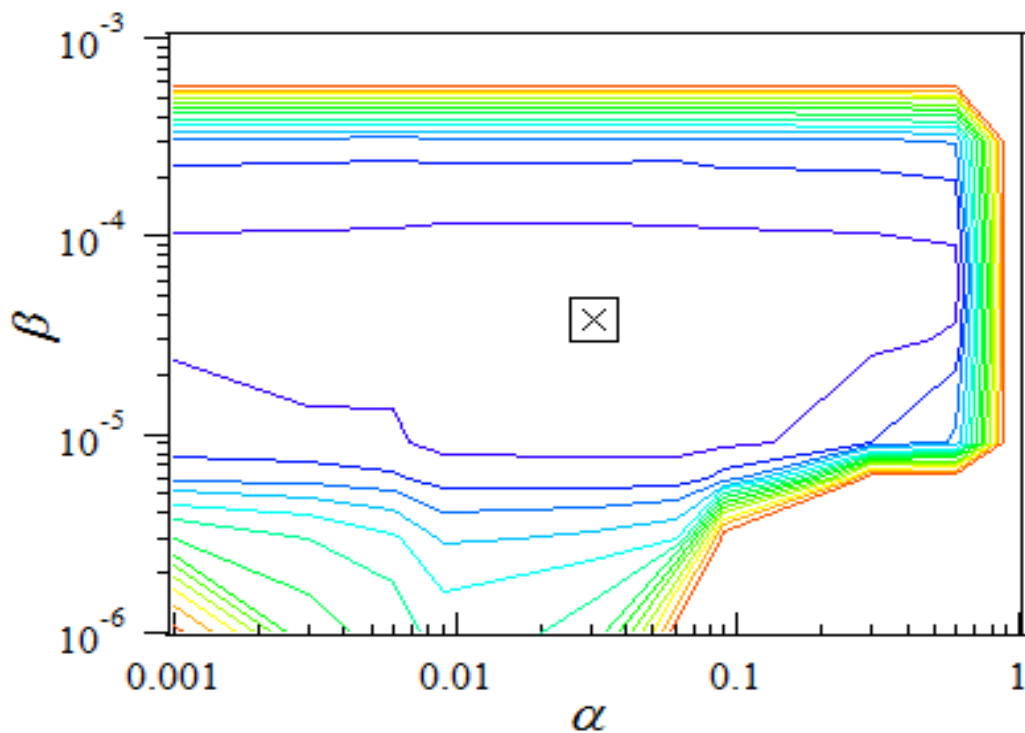


図 3.4 ループテスタ記録再生信号を用いた各 α , 及び β における SNR の値
(SNR = 12.6 dB, フィードバック遅延 = 12 bit)

3.4 高記録密度における位相同期回路の課題

媒体の速度変動に伴い変化する位相に追従するためには、位相誤差系列 $\{\epsilon_k\}$ を即座に見積もり、算出された $\{\alpha_k\}$ から、 $\{x_k\}$ の位相ずれを補正する必要がある。しかし、前述の通り、ここで検出器推定値系列 $\{d_k\}$ を得るのに要する遅延が問題となる。図 3.5 に、ビタビ復号時のトレリス線図(PR4 チャンネルの場合)を示す。図中で示される複数の競合するパスの中から予め規定した遅延ビットが経過した時点で最もパスメトリックの値が小さいパスが最尤パスとして選択される。このとき、ビタビ復号器が正しい判定をする確率 p_k は、パスメトリックの最小値 PM^1 と、その他競合するパスのパスメトリック PM^i を用いて次式で与えられる。

$$p_k = e^{-PM^1} / \sum_i e^{-PM^i} \quad (3-9)$$

一般に、遅延ビットを長くとるほど最尤パスと競合パスのパスメトリックの差が開くため、ビタビ復号器における仮判定の確からしさ p_k の値は大きくなるが、その間に発生した媒体の急峻な速度変動等に追従することができない。このため、比較的速度変動の大きいテープシステムでは許容可能な遅延ビットに関し制約を負うことになる。テープの速度変動に追従できない、あるいはフィードバック制御の基となる判定に誤りがある場合にタイミング・リカバリ回路のロックが外れる現象が発生し、これを Loss-of-lock と呼ぶ。一例として、ループテスタで取得した SNR = 12.6 dB の記録再生信号を用い、タイミング・リカバリ回路を動作させた場合を図 3.6 に示す。本来の正しい位相を点線、位相オフセット算出部が算出した位相を太い実線で示している。また、細い実線はノイズを示しており、ここではビタビ復号記の入力段における理想信号と実際に得られた信号との差分をノイズと定義した。なお、ビタビ復号において判定誤りが発生したことを示すエラーフラグは○マークで示している。本来の位相（点線）に対して、実際に検出された位相（太い実線）が乖離し、最終的に 1 ビット分ずれた位相に収束している様子が確認される。更に詳細に観察すると、位相が乖離する直前にビタビ復号において判定

誤りが発生したことを示すエラーフラグが確認される。このことから、ビタビ復号の判定が誤りによってタイミング・リカバリ回路のフィードバックループが適正に動作せず、更なる位相誤差を生んだことで Loss-of-lock が発生したことがわかる。

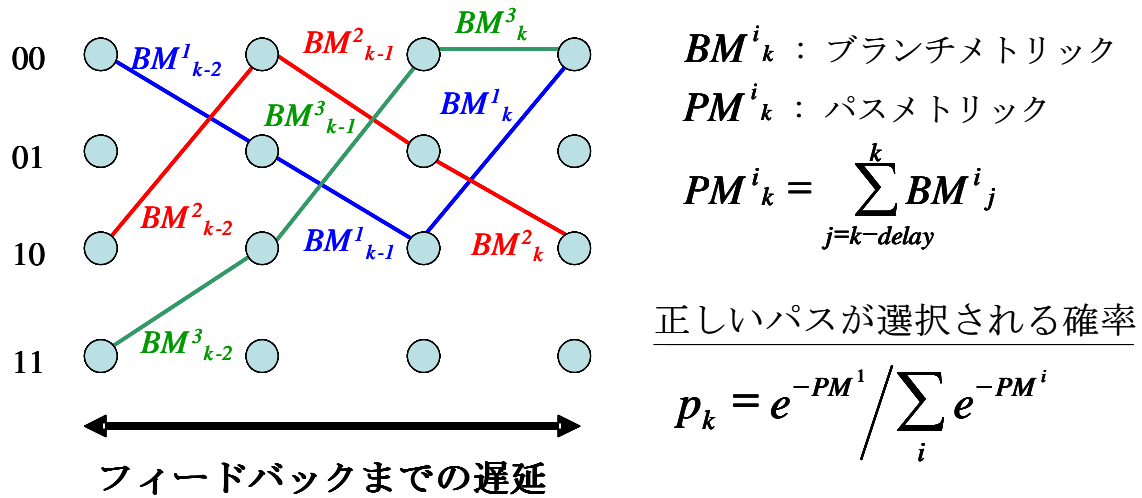


図 3.5 ビタビ復号のトレリス線図(PR4)

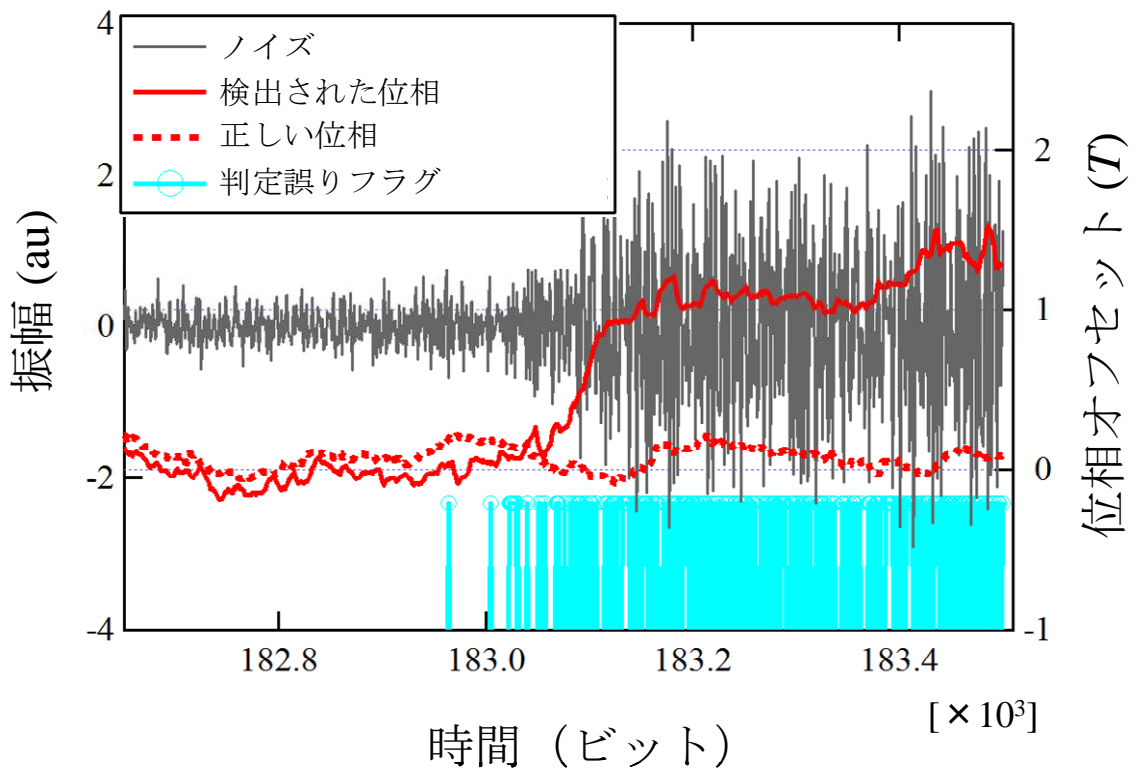


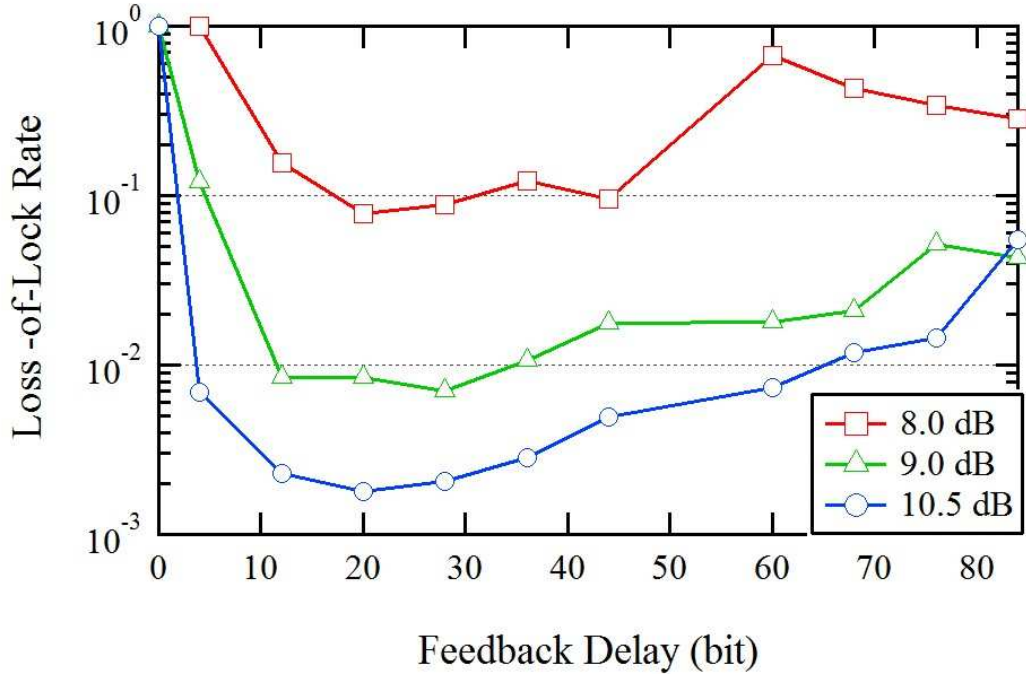
図 3.6 Loss-of-lock の例 (ループテスタ, SNR = 12.6 dB)

本検討では、タイミング・リカバリ回路の動作安定性を評価する指標として Loss-of-lock の発生頻度(Loss-of-lock rate)を用いた。ここで、Loss-of-lock rate は1セクタ = 1024 bit としたときに、Loss-of-lock が発生したセクタの割合（即ち実質的なセクタエラーレート）として定義した。なお、通常のランダム性のエラーと Loss-of-lock によるバーストエラーとを区別するために、本検討では連続した 50 バイト中、35 バイト以上がエラーとなった場合に Loss-of-lock が発生したものと判断した。この定義においてランダム性のエラーを Loss-of-lock として誤って判断する確率は問題とする Loss-of-lock rate に対して十分に低いことを予め確認している。

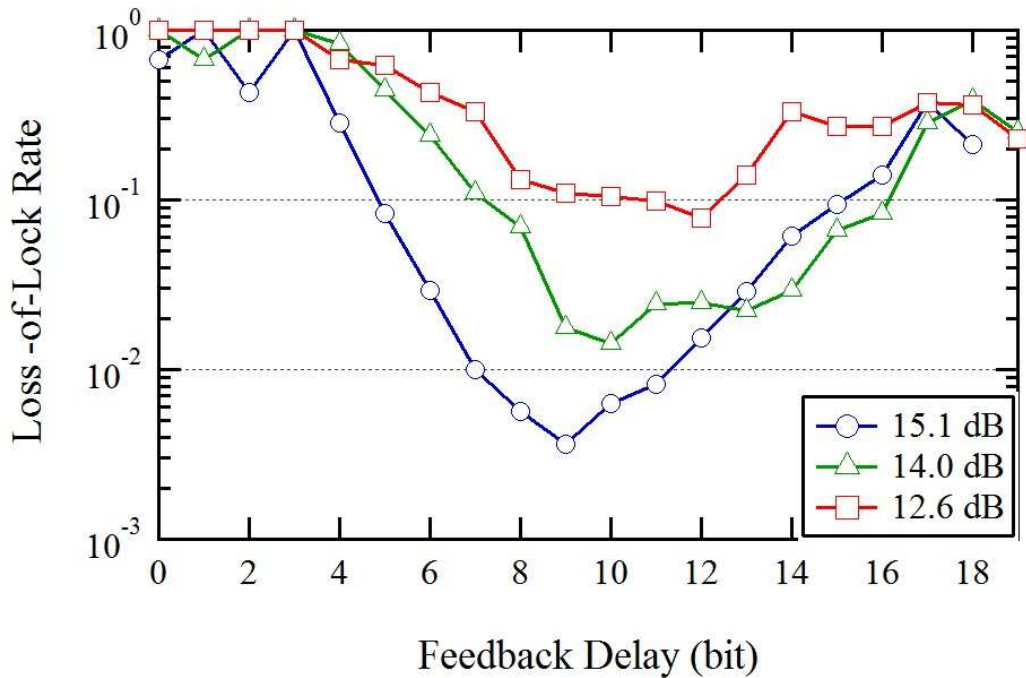
Loss-of-lock が一度発生すると、そのセクタは全滅してしまうため、記録時にそれが発生した場合は再度同じデータを記録し直す動作(Rewrite)を取る必要があり、再生時に発生した場合は (Reed-Solomon 符号のエラー訂正能力で賄えない場合) 一度動作を停止した上で再度同一箇所を読み直す動作（バックヒッチ）をしなければならない。これらが高頻度で発生するとデータ転送速度の大幅な低下に直結するため、特に記録再生系の SNR が低くなる高記録密度のテープシステムにおいて解決すべき課題となる。①サーボ制御機構を有するテープドライブと、②ループテストでそれぞれ取得した記録再生信号に関し Loss-of-lock rate と、タイミング・リカバリ回路におけるフィードバック遅延量との関係を図 3.7, 及び図 3.8 に示す。それぞれ、記録再生時の線記録密度を変更することで、異なる SNR の条件において処理を行っている。いずれもフィードバック遅延量が大きいと、テープの搬送速度の変動に回路が追随できず、Loss-of-lock rate が悪化する傾向が確認できるが、速度変動の大きいオープンテストではこの傾向がより顕著なる。一方、フィードバックをかけるまでの遅延量が小さ過ぎても、フィードバックの基となる検出器判定において誤る確率が高くなり、Loss-of-lock rate の悪化を招く。なお、オープンテストで取得した信号の Loss-of-lock rate はテープドライブと比べて同等の SNR で比較しても 2 桁程度高く、タイミング・リカバリ回路を適正に動作させる上で、媒体の搬送速度を安定させることが重要であるとわかる。

次節以降は、より実機に近い系での評価を目的として、サーボ制御機構を有するテープドライブ信号にて検討を行った。なお、記録再生系の SNR 最適によらず、ほぼ最適な

Loss-of-lock rate が得られる条件として遅延量は 20 ビットとした.



(a) テープドライブ



(b) ループテスト

図 3.7 Loss-of-lock rate とフィードバック遅延量との関係

3.5 SOVA 復号器の軟出力情報を利用した位相同期方式

低 SNR の記録再生系におけるタイミング・リカバリ方式の検討については、いくつかの先行する研究結果が発表されているが、多くは現実にテープシステムで採用する場合はバッファメモリの増大に伴うハードウェアコストの増加が避けられない[29]-[31]. これに対し、Ö. Sedat らは同時に複数の素子で記録再生を行うテープの特長を活かし、複数素子の再生信号を基に正しい位相を算出することでテープ媒体の搬送速度変動の影響を抑制する方式を提案している[32].

本研究では、ビタビ復号器から得られる復号器判定の尤度を用いてフィードバックを制御することで誤ったフィードバックの弊害を抑制することを検討した. 前述したとおり、ビタビ復号器において、仮判定時に正しいパスが選択される確率は式(3-9)で与えられる. ただし、実際には競合するパスの中には問題とする過去のビットの値が最尤パスと共通するものも含まれる. このため過去における特定ビットが 0, 1 である確率を見積もる上で式(3-9)は必ずしも最適ではなく、SOVA(Soft Output Viterbi Algorithm)[42]を用いることがより有効となる. SOVA 復号器を用いた場合、過去ビット A_k の値がそれぞれ 0, 1 となる確率は、 A_k の値が共通となる全てパスに関して場合分けをした上、次式で与えられ、

$$\left. \begin{aligned} P_k^{A_k=0} &= \frac{\sum_i e^{-PM_i^{a=0}}}{\sum_i e^{-PM_i}} \\ P_k^{A_k=1} &= \frac{\sum_i e^{-PM_i^{a=1}}}{\sum_i e^{-PM_i}} \end{aligned} \right\} \quad (3-10)$$

それぞれ $P_k^{A=0} \geq P_k^{A=1}$ のときには $A_k = 0$, $P_k^{A=0} < P_k^{A=1}$ のときには $A_k = 1$ と判定する. このとき、式(3-10)から求めた仮判定の尤度 P_k と、SOVA 復号時に誤判定が発生した箇

所（フラグ）との対応を図 3.9 に示す。両者は良く対応しており，SOVA 復号時に判定誤りが発生した箇所では， P_k の値が大きく低下している様子がわかる。本結果は即ち， P_k の値が低いビットではタイミング・リカバリ回路に誤った判定結果がフィードバックされるリスクが高いことを示すものであり，これら誤ったフィードバックは前述のとおり Loss-of-lock の発生要因となり得る。本検討では P_k の値から，事前に復号器の判定結果の確からしさを評価し，これに基づいたフィードバック制御を行うことで，誤った判定結果がフィードバックされることの弊害を抑制することとした。ここで，タイミング・リカバリ回路へのフィードバック量は尤度 P_k の関数 $g(P_k)$ として定義され，具体的にいくつかの検討を行っている。このとき，位相オフセット量を算出するための式(3-2)は，次式となる。

$$\left. \begin{aligned} \theta_k &= \theta_{k-1} + \beta \varepsilon_k g(P_k) \\ \tau_{k+1} &= \tau_k + \alpha \varepsilon_k g(P_k) + \theta_k. \end{aligned} \right\} \quad (3-11)$$

ここではロバストネスと実装容易性を重視した上，次式で表わされる閾値判定を採用することとした。

$$g(P_k) = \begin{cases} 0 & \text{if } P_k \leq \gamma \\ 1 & \text{if } P_k > \gamma \end{cases} \quad (3-12)$$

即ち， P_k が閾値 γ 以下となったときには誤検出のリスクが高いと判断し，当該ビットにおいてはフィードバック制御を行わない（位相誤差が発生したかったものとみなす）こととした。

3.6 性能評価

実際のテープドライブ再生信号を用いて，本研究で提案する SOVA 復号器から得られた尤度情報を利用してタイミング・リカバリ回路のフィードバック制御を行う方式と，従来方式の性能を比較した．図 3.10 にその結果を示す．ここで尤度情報に基づいたフィードバック可否判断の閾値は， $\gamma = 0.96$ とした．従来方式（点線）に対して，提案方式（実線）では，検出点での SNR が 8.0~10.5 dB の範囲において，いずれも明確な改善効果が確認された．これは，前者に対して，後者は復号時の誤判定によって生じる誤ったフィードバックの弊害と，それによる Loss-of-lock の発生を抑制できているためである．

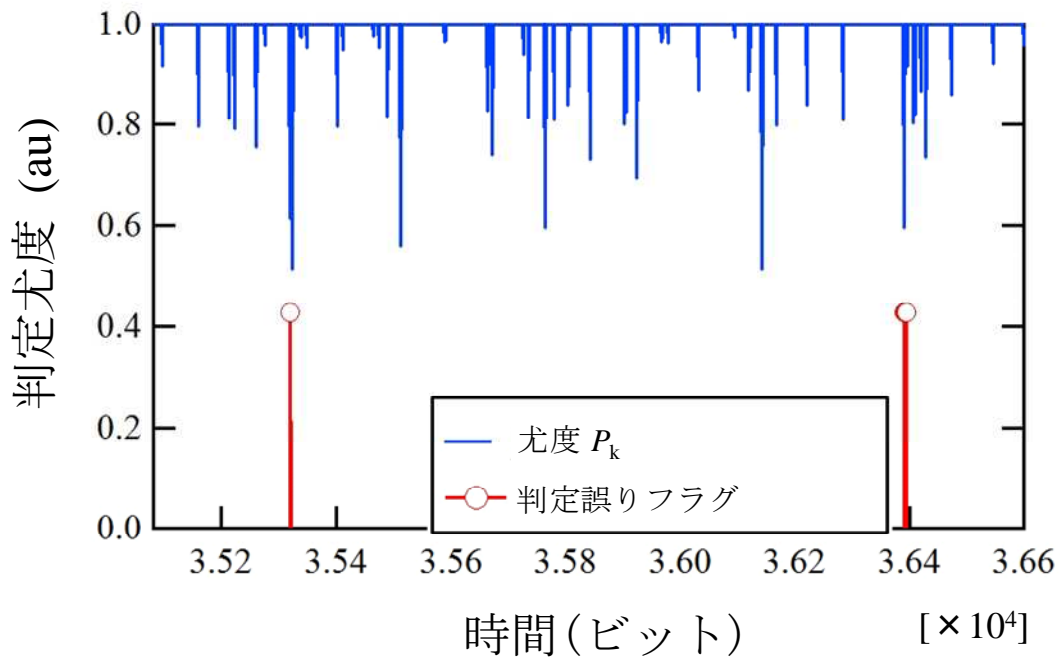


図 3.8 尤度 P_k と，SOVA 復号時に誤判定が発生した箇所との対応

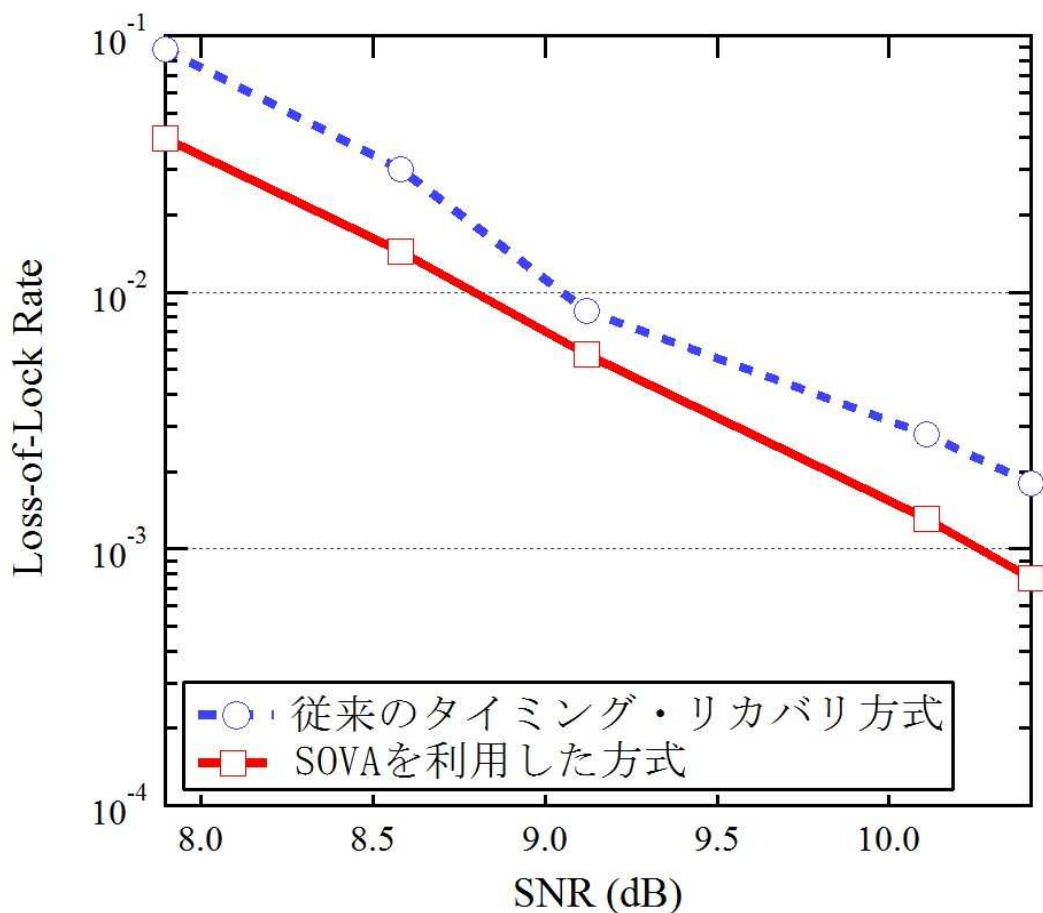


図 3.9 SOVA 復号器によるフィードバック制御を行う方式と従来方式との比較

3.7 まとめ

高記録密度磁気テープシステムでの動作を前提に，SOVA 復号器から得られた尤度情報を利用してタイミング・リカバリ回路中のフィードバック制御を行うことで，従来方式に対する Loss-of-lock rate の改善効果を確認した．今後，テープシステムでも繰返し復号法の導入によって，より高いエラーレートでもシステムが成り立つようになることが想定される．そのような状況において，記録密度向上の律速となり得るのはタイミング・リカバリ回路の動作安定性であり，本結果は，今回提案する方式が同課題解決に有効で

あることを示すものである。復号器の軟出力情報を利用することで、タイミング・リカバリ回路の性能向上を検討した先行例はいくつかあるが、本検討で用いた方法は繰返し復号を前提としないため、バッファメモリ含め従来から採用されてきた信号処理の回路構成に対して、全く新規に導入が必要な機構が存在しない。このため、比較的小さな修正のみで実現でき、実装が容易なことが大きな特徴である。これは、HDD と異なり、多数の記録再生チャンネルを搭載する磁気テープシステムにおいては実装コスト上、大きなメリットとなる。

第4章 結論

4.1 結果の概要

世界中で、年々増大するデジタルデータを長期に渡って安全、安価に保存したいという社会からの要求に応えることが本研究の上位目的である。保存したデータの長期安定性、信頼性（低ビットエラーレート）、コストパフォーマンス（低容量単価、省電力）の観点から、大容量な磁気テープストレージシステムを構築することがこれらに対する解決策となり得る。磁気テープシステムの大容量化を実現するためには、媒体、磁気ヘッド、高精度サーボトラッキング、信号処理等の技術開発が重要となるが、本研究では、これらの中でも技術開発の余地が大きく、容量向上への寄与が大きいと期待される信号処理方式の検討を行った。

以下、章ごとに研究成果をまとめる。

第2章 垂直配向バリウムフェライトテープに適したPRターゲットの検討

本章では、それぞれ配向の異なる単磁性層バリウムフェライトテープ媒体に関し、記録再生信号の解析と、最適なPRターゲットの検討を行った。記録再生信号の周波数特性に関し、垂直配向、無配向媒体は長手配向媒体に対して、低域成分が低下することが確認された。一般にSULを用いた垂直記録ハードディスク媒体では、SULの存在により、再生ヘッドの感度関数が広がるため、再生信号の低域成分が増大するが、単磁性層テープ媒体においては、配向方向によって記録再生信号の周波数特性は大きく変わらないことが本結果から確認された。また、前述の理由から、垂直記録ハードディスク装置では再生信号の低域エネルギーを活用するため、DC成分を有するPRターゲットの採用が検討されてきたのに対し、これらは垂直配向した単層バリウムフェライトテープ媒体には必ずしも最適ではなく、従来長手配向媒体で採用されてきたDC成分も持たないPR4ターゲットが比較的良好な特性を示すことを確認した。

第 3 章 高記録密度テープシステムに適したタイミング・リカバリ方式の検討

本章では、HDD と比べ、走行速度変動が大きい磁気テープ媒体において、高記録密度でも安定に動作するタイミング・リカバリ方式について検討を行った。タイミング・リカバリ回路の同期が外れる (Loss-of-lock) 原因はビタビ復号器の判定誤りにより、誤った信号が同期ループにフィードバックされることであるため、SOVA 復号器の軟情報出力を利用し、復号結果の尤度に応じてフィードバック量の制御を行う方法を検討した。その結果、SNR が 8.0~10.5 dB の範囲において同期が外れる頻度 (Loss-of-lock rate) が低減することを確認した。現状、磁気テープシステムではタイミング・リカバリ回路の動作安定性が律速となり SNR の下限が決まっている。本結果は今回提案する方式により、現行の磁気テープシステムに採用されている信号処理の回路規模を大幅に増大させることなく、更なる高記録密度化が可能であることを示している。

4.2 今後の展望

2014 年 10 月に 1 カートリッジあたり 10 TB の容量を持つ塗布型バリウムフェライトテープ媒体が製品化された。現時点で技術的には面記録密度で 123 Gbit/in²、1 カートリッジあたり 220 TB の容量実現の見通しがついており [19]、INSIC(International Storage Industry Consortium)のロードマップによれば、2025 年頃にはこれら磁気テープ媒体が製品化される可能性がある [43]。一方で、現時点で最新の HDD 製品と比較した場合、2025 年頃のテープ面記録密度はこれでも 1 桁程度低い [43]。可換媒体であるが故の制約はあるものの、ビットサイズ微細化の物理的限界に直面する NAND フラッシュや HDD と比較して、磁気テープは当面の間、大容量化のトレンドを維持することが可能と推定される。ただし、これにはビットサイズの微細化に伴う SNR の低下や、塗布型媒体特有の不均一性、搬送時のジッターといった、高密度化に伴い影響が顕在化する各種外乱への対処が必須となる。本稿で提案した方式をはじめとし、HDD で検討さ

れてきた各種信号処理方式を磁気テープシステムに適した形態で実装することの重要性は今後益々高まると考えている.

謝辞

本研究を遂行するにあたり，多くの方々の御指導，御協力を頂きました．ここに厚く御礼申し上げます．

まず，最初に感謝致しますのは，愛媛大学 岡本好弘教授と仲村泰明准教授です．先生方とは私が愛媛大学に入学する前から，共同研究をさせていただいており，磁気記録における信号処理に関して全く無知だった私に丁寧な御指導をしてくださいました．また，社会人学生として，信号処理研究の道を進むことを勧めてください，本論文，並びに在学中に発表した各論文につきましても，丁寧な御指導を賜りました．また，愛媛大学 大澤壽名誉教授には，直接御指導を賜る機会はありませんでしたが，研究会などの場で，温かい励ましのお言葉をかけていただきました．深く感謝いたします．愛媛大学の小林真也教授，山田芳郎教授には在学中，通信システム工学特論の講義にて御指導を賜りました．日ごろの業務の中では触れる機会がなかった論文や，技術に接することができ，自分の視野が広がったと感じております．ありがとうございました．

富士フイルム社内の方々にも多くの御指導，御協力をいただきました．私の入社当時の指導員でもある清水氏には，今回，社会人学生の道を進むきっかけを与えていただきました．また，日ごろから様々な観点で有意義なアドバイスをいただき，励ましていただきました．業務の傍ら，本研究を進めることができたのも清水氏の御協力があったことです．柴田事業部長，野口所長，榊原統括マネージャー，浅井マネージャーには本研究を進める機会を提供いただきました．社外発表の御裁可，研究時間の捻出等，様々な点で御理解，御配慮いただいたこと，この場をお借りして御礼申し上げます．

最後になりますが，本研究を進めることを理解し，常に私を支えてくれた家族に感謝します．

参考文献

- [1] 井上理, “ファーストサーバ障害、深刻化する大規模「データ消失」,” 日本経済新聞
http://www.nikkei.com/article/DGXNASFK2600L_W2A620C1000000?df=2, Jun. 24, 2012.
- [2] J. Jackson, “Most network data sits untouched,” Government Computer News,
<http://gcn.com/Articles/2008/07/01/Most-network-data-sits-untouched.aspx>, Jul. 1, 2008.
- [3] “Total cost of ownership – tape versus disk,” Spectra Logic Corporation,
<https://edge.spectralogic.com/index.cfm?fuseaction=home.displayFile&DocID=4617>, Jun. 2014.
- [4] 井上陽治, “テープシステム技術資料 第1章 テープストレージの未来,” JEITA 情報産業システム部会 テープストレージ専門委員会,
http://home.jeita.or.jp/upload_file/20130924142151_WbQPI2w6x4.pdf, Jun. 24, 2016.
- [5] D. M. Smith, “The cost of lost data,” Pepperdine University,
<https://gbr.pepperdine.edu/2010/08/the-cost-of-lost-data/>, Aug. 2008.
- [6] T. Hoff, “How Google backs up the internet along with exabytes of other data,”
<http://highscalability.com/blog/2014/2/3/how-google-backs-up-the-internet-along-with-exabytes-of-othe.html>, Feb. 3, 2014.
- [7] “テープシステム技術資料 第5章 ライト・リードの高い信頼性を支える技術,” JEITA 情報産業システム部会 テープストレージ専門委員会,
http://home.jeita.or.jp/upload_file/20110908181308_34jzwpY2GE.pdf, Jun. 24, 2016.
- [8] M.L. Watson, R.A. Beard, and S.M. Kientz, “Investigation of thermal demagnetization effects in data recorded on advanced barium ferrite recording media,” IEEE Trans. Magn. vol.44, no.11, pp.3568–3571, Nov. 2008. DOI:

10.1109/TMAG.2008.2001591

- [9] O. Shimizu, Y. Murata, Y. Kurihashi, T. Harasawa, M. Asai, M. Sueki, and H. Noguchi, "Long-term archival stability of barium ferrite magnetic tape," *J. Magn. Soc. Jpn.* vol.36, no.1_1, pp.1–4, Dec. 2012. DOI: 10.3379/msjmag.1112R001
- [10] Y. Kurihashi, O. Shimizu, Y. Murata, M. Asai, and H. Noguchi, "Effect of thermal conditions on bit error rate for barium-ferrite particulate media," *IEEE Trans. Magn.* vol.49, no.7, pp.3760–3762, Jul. 2013. DOI: 10.1109/TMAG.2013.2243119
- [11] K. Katayama, Y. Chinda, O. Shimizu, Y. Goto, M. Suzuki, and H. Noguchi, "Long term stabilities of magnetic tape for data storage in office environment," *J. Appl. Phys.*, vol.117, 17E305, Feb. 2015. DOI: 10.1063/1.4907769
- [13] "Tape drive technology comparison," Spectra Logic Corporation, <https://edge.spectralogic.com/index.cfm?fuseaction=home.displayFile&DocID=4617>, Oct. 2014.
- [14] "Archive HDD data sheet," Seagate Technology, <http://www.seagate.com/www-content/product-content/hdd-fam/seagate-archive-hdd/en-us/docs/archive-hdd-dS1834-3-1411us.pdf>, Nov. 2014.
- [15] "Case study NCSA(National Center for Supercomputing Applications)," <http://www.activearchive.com/common/pdf/AA-Case-Study-NCSA.pdf>, Jun.24, 2016.
- [16] D. Berman, R. Biskeborn, N. Bui, E. Childers, R. D. Cideciyan, W. Dyer, E. Eleftheriou, D. Hellman, R. Hutchins, W. Imano, G. Jaquette, J. Jelitto, P. -O. Jubert, C. Lo, G. McClelland, S. Narayan, S. Oelcer, T. Topuria, T. Harasawa, A. Hashimoto, T. Nagata, H. Ohtsu, S. Saito, "6.7 Gb/in² recording areal density on barium ferrite tape," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 43, no. 8, pp. 3502–3508, Aug. 2007. DOI: 10.1109/TMAG.2007.899634
- [17] G. Cherubini, Roy D. Cideciyan, L. Dellmann, E. Eleftheriou, W. Haeberle, J.

- Jelitto, V. Kartik, M. A. Lantz, S. Ölcer, A. Pantazi, H. E. Rothuizen, D. Berman, W. Imano, P.-O. Jubert, G. McClelland, P. V. Koeppe, K. Tsuruta, T. Harasawa, Y. Murata, A. Musha, H. Noguchi, H. Ohtsu, O. Shimizu, R. Suzuki, “29.5-Gb/in² Recording Areal Density on Barium Ferrite Tape,” *IEEE Trans. Magn.* vol. 47, no. 1, pp. 137–147, Jan. 2011. DOI: 10.1109/TMAG.2007.899634
- [18] S. Furrer, M. A. Lantz, J. B. C. Engelen, A. Pantazi, H. E. Rothuizen, R. D. Cideciyan, G. Cherubini, W. Haerberle, J. Jelitto, E. Eleftheriou, M. Oyanagi, Y. Kurihashi, T. Ishioroshi, T. Kaneko, H. Suzuki, T. Harasawa, O. Shimizu, H. Ohtsu, H. Noguchi, “85.9 Gb/in² Recording Areal Density on Barium Ferrite Tape,” *IEEE Trans. Magn.* vol. 51, no.4, 3100207, Apr. 2015. DOI: 10.1109/TMAG.2014.2355875
- [19] M. A. Lanz, S. Furrer, J. B. C. Engelen, A. Pantazi, H. E. Rothuizen, R. D. Cideciyan, G. Cherubini, W. Haerberle, J. Jelitto, E. Eleftheriou, M. Oyanagi, A. Morooka, M. Mori, Y. Kurihashi, T. Kaneko, T. Tada, H. Suzuki, T. Harasawa, O. Shimizu, H. Ohtsu, H. Noguchi, “123 Gb/in² Recording Areal Density on Barium Ferrite Tape,” *IEEE Trans. Magn.* vol. 51, no.11, 3101304, Nov. 2015. DOI: 10.1109/TMAG.2015.2435893
- [20] T. Nagata, T. Harasawa, M. Oyanagi, N. Abe, and S. Saito, “A recording density study of advanced barium-ferrite particulate tape,” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 42, no. 10, pp. 2312–2314, Oct. 2006. DOI: 10.1109/TMAG.2006.878675
- [21] O. Shimizu, T. Harasawa, and M. Oyanagi, “Particle Orientation Effects of Barium Ferrite Particulate Media”, *IEEE Trans. Magn.* vol. 46, no. 6, pp. 1607-1609, Jun. 2010. DOI: 10.1109/TMAG.2010.2040371
- [22] G. M. McClelland, D. Berman, P.-O. Jubert, W. Imano, H. Noguchi, M. Asai, H. Takano, “Effect of tape longitudinal dynamics on timing recovery and channel performance,” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 45, no. 10, pp. 3585–3589, Oct. 2009. DOI: 10.1109/TMAG.2009.2023427

- [23] 奈良治郎, “表面粗さの国際規格の改正,” 精密機械, vol. 48, no. 2, pp. 262–267, Feb. 1982. DOI: 10.2493/jjspe1933.48.262
- [24] S. X. Wang and A. M. Taratorin, “Magnetic Information Storage Technology,” Chapter 5, pp. 88–122, Academic Press, New York, 1999.
- [25] “HPE StoreEver LTO Ultrium テープドライブ データシート,” Hewlett Packard Enterprise, <http://h50146.www5.hp.com/products/storage/catalog/pdfs/4AA0-4878JPN.pdf>, Nov. 2015.
- [26] J. D. Coker, E. Eleftheriou, R. L. Galbraith, and W. Hirt, “Noise-predictive maximum likelihood (NPML) detection,” IEEE Trans. Magn., vol. 34, no. 1, pp. 110–117, Jan. 1998. DOI: 10.1109/20.663468
- [27] “IBM TS1140 Tape Drive Technology, Features and Function Whitepaper,” IBM, http://ameres.ru/data/category_docs/505931/ibm_ts1140.pdf, Oct. 2011.
- [28] “International Storage Industry Consortium (INSIC) 2012-2022 Tape Roadmap,” INSIC, http://www.insic.org/news/2012Roadmap/PDF/25_Roadmap%20-%20Channels%20-%20FormattedV5.0.pdf, May, 2012.
- [29] A. R. Nayak, J. R. Barry, and S. W. McLaughlin, “Joint timing recovery and turbo equalization for coded partial response channels,” IEEE Trans. Magn., vol. 38, no. 5, pp. 2295–2297, Sep. 2002. DOI: 10.1109/TMAG.2002.801870
- [30] P. Kovintavewat, J. R. Barry, M. F. Erden, and E. M. Kurtas, “Robustness of per-survivor iterative timing recovery in perpendicular recording channels,” in Dig. IEEE Int. Magnetism Conf. (INTERMAG), pp. 1613–1614, Apr. 4–8, 2005. DOI: 10: 807-808
- [31] J. Moon, J. Lee, and D. Yoon, “Joint gain and timing recovery with applications to magnetic tape storage,” IEEE Trans. Magn., vol. 43, no. 6, pp. 2328–2330, Jun. 2007. DOI: 10.1109/TMAG.2007.893529

- [32] S. Ölçer, E. Eleftheriou, and R. A. Hutchins, “Compensation of PLL loop delay in read channels for tape storage systems,” *IEEE Global Telecommunications Conference 2009 (GLOBECOM 2009)*, pp. 1–5, Nov. 2009. DOI: 10.1109/GLOCOM.2009.5425364
- [33] K. J. Lee, Y. S. Kim, E. S. Kim, Y. H. Im, K. M. Lee et al., “Recording physics of perpendicular recording with single layered medium and ring head,” *J. Appl. Phys.*, vol. 91, no. 10, pp. 8700–8702, May 2002. DOI: 10.1063/1.1453358
- [34] 大沢 寿, 篠原 宜彦, 岡本 好弘, 斎藤 秀俊, 村岡 裕明, 中村 慶久, “垂直磁気記録における NPML 方式の性能評価,” *信学論 C*, vol. J86-C, no. 5, pp. 551–558, May, 2003.
- [35] Y. Okamoto, H. Osawa, H. Saito, H. Muraoka, and Y. Nakamura, “Performance of PRML systems in perpendicular magnetic recording channel with jitter-like noise,” *J. Magn. Magn. Mater.*, vol. 235, pp. 259–264, 2001. DOI: 10.1016/S0304-8853(01)00356-0
- [36] H. Sawaguchi, Y. Nishida, H. Takano, and H. Aoi, “Performance analysis of modified PRML channels for perpendicular recording systems,” *J. Magn. Magn. Mater.*, vol. 235, pp.265–272, 2001. DOI: 10.1016/S0304-8853(01)00357-2
- [37] R. D. Cideciyan, E. Eleftheriou, and T. Mittelholzer, “Perpendicular and longitudinal recording: A signal-processing and coding perspective,” *IEEE Trans. Magns.*, vol. 38, no. 4, pp. 1698–1704, 2002. DOI: 10.1109/TMAG.2002.1017759
- [38] 江原義郎, “デジタル信号処理,” pp. 97-132, 東京大学出版局, 1991.
- [39] Jin Xie , Lingyan Sun, and B. V. K. Vijaya Kumar, “Implementation-Friendly Constraint for Adaptive Finite Impulse Response Filters for Equalization,” *IEEE Trans. Magns.*, vol. 44, no. 2, pp. 319–315, Feb. 2008. DOI: 10.1109/TMAG.2007.912677
- [40] K. H. Mueller and M. Müller, “Timing recovery in digital synchronous data receivers,” *IEEE Trans. Commun.*, vol. 24, no. 5, pp. 516–531, May 1976. DOI:

10.1109/TCOM.1976.1093326

- [41] Piya Kovintavewat, John R. Barry, M.Faith Erden, Erozan M. Kurtas, “Interpolated timing recovery,” in Coding and signal processing for magnetic recording systems, Chapter27, CRC Press, Boca Raton, 2005.
- [42] J. Hagenauer,, and H. Peter, “A Viterbi algorithm with soft-decision outputs and its applications,” IEEE Global Telecommunications Conference 1989 (GLOBECOM 1989.), pp. 1680–1686, Nov. 1989. DOI: 10.1109/GLOCOM.1989.64230
- [43] “ International Storage Industry Consortium (INSIC) 2015-2025 Tape Roadmap,” INSIC,
<http://www.insic.org/news/2015%20roadmap/15pdfs/2015%20Technical%20Roadmap.pdf>, Dec. 2015.

本研究に関する発表論文

- [1] A. Musha and O. Shimizu, “A study of signal processing for barium ferrite particulate tape systems,” IEICE Trans. Electron., Vol.E96-C, no.12, pp.1474-1478, Dec. 2013. DOI: 10.1587/transle.E96.C.1474

- [2] A. Musha, O. Shimizu, Y. Nakamura, and Y. Okamoto, “A study of timing recovery for high-recording-density tape systems,” IEEE Trans. Magn., vol. 51, no. 11, Oct. 2015, Art. ID 3102004. DOI: 10.1109/TMAG.2015.2439059

その他の技術発表

- [1] 武者敦史, 清水治, “塗布型 Ba-ferrite テープシステムに適した信号処理方式の検討,” 2010 映情学全大 17-4, Aug. 2010.
- [2] 武者敦史, 清水治, 仲村泰明, 岡本好弘 “高記録密度テープシステムに適した位相同期方式の検討,” 信学技報, MR2014-32, Dec. 2014.
- [3] 武者敦史, 清水治, 仲村泰明, 岡本好弘, “高記録密度テープシステムにおけるタイミング・リカバリ方式の検討,” 信学技報, MR2015-31, Dec. 2015.
- [4] A. Musha, O. Shimizu, Y. Nakamura, and Y. Okamoto, “A study of timing recovery for high recording density tape system,” IEEE International Magnetism Conference, DF-017, Beijing, China, May 2015.