

## プロローグ

# 進化するハード・ディスク・ドライブ

その誕生から最新テクノロジーまで

ハード・ディスク・ドライブ(Hard Disk Drive, 本書では以降HDDと記す)は、情報化社会を支えるストレージ装置の中心として広く使われています。

近年まで、HDDは主にコンピュータの周辺装置として使われてきましたが、最近ではAV機器や車載機器への組み込みなど非パソコン用が30%を越えるようになってきており、その用途はさらに拡大を続けています。

## ■ ハード・ディスク・ドライブの誕生

### ◆ 世界初のHDD

世界最初のHDDは、IBM社が1955年に発表したIBM-350 RAMAC(Random Access Method of Accounting and Control)です。これは、直径24インチ(約64 cm)のディスクを50枚搭載し、記録容量は5 Mバイトでした。写真1にRAMACを示します。

今どきのHDDと比較すると小容量に感じますが、当時の記録メディアとして主流だったパンチ・カード6万枚ぶんのデータに相当します。その時代としては注目すべき大容量だったそうです。

データを読み取るヘッド・アームは1本だけで、このアームが上下前後に動いて、50枚のディスク全面をスキャンするものでした。装置の高さは2 m近くもあり、とても現在の小型HDDの先祖とは思えないような大きな装置でした。ヘッドの浮上方式は、圧縮空気をノズルから噴出する静圧方式でした。



写真1 IBM-350 RAMAC

[写真提供：日本アイ・ビー・エム(株)]



写真2 ディスク・パック

[写真提供：日本アイ・ビー・エム(株)]

#### ◆ ディスク交換型HDDの登場

その後1963年には、同じくIBM社からディスク・パックと呼ばれるディスク交換型のHDDが登場しました。一つのディスク・パックには、直径14インチのディスクが6枚付いていて、記録容量は2.69 Mバイトでした。写真2にディスク・パックを示します。

ディスクを交換型にしたことで、複数のメーカーからディスク・パックが発売されるようになり、価格が下がっていきました。扱うデータ量が増えたときには、ディスク・パックだけを買えばよいということも大きなメリットでした。

しかし、装置の特性のばらつきなどから、ディスク・パック間の互換性確保が難

## 第 1 章

# ハード・ディスク・ドライブのあらまし

## 内部の構造と仕様に関するキーワード

ここでは、ハード・ディスク・ドライブの内部構造について簡単に説明したあと、記録密度の向上に関連するさまざまな技術を概観します。さらに、ドライブの仕様に関するキーワードを整理して解説します。メカニズムの詳細については次章で解説します。

### 1-1 ハード・ディスク・ドライブの内部

図1-1にHDDの分解図を示します。図1-1は最近の2.5インチHDDの例ですが、3.5インチHDDでも本質的に違いはありません。主要な構成部品について、以下に簡単に説明しましょう。

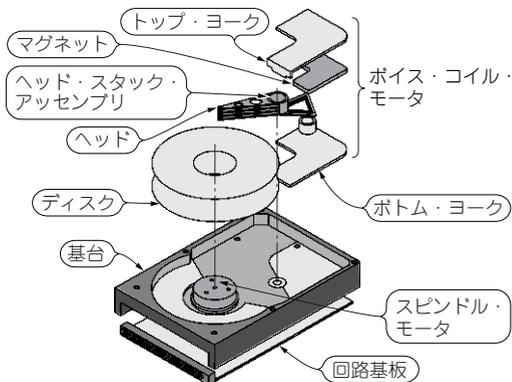


図1-1 HDDの分解図

## ◆ ヘッドとディスク

HDDの記録再生に直接かかわる、もっとも重要な部品です。

現在のヘッド素子は、後述するTMR (Tunneling Magneto Resitive)再生ヘッドと記録ヘッドを一体化したものが主流です。これがヘッド・スライダ後端部に形成されています。「ヘッド」という場合、ヘッド素子部を指す場合と、ヘッド・スライダ全体を指す場合があります。

ディスクは、基板の上にCoCr系の合金をスパッタリングで薄膜形成したものが、現在の主流です。基板材料は、2.5インチ以下のHDDではガラスが使われ、3.5インチではアルミ合金が使われてきましたが、近年、3.5インチでもガラスが使われ始めています。

なお、ディスクのことを、メディア、単板、媒体、またはプラッタ(platter)と呼ぶことがあります。

## ◆ ボイス・コイル・モータ

ヘッドを所定の位置に移動する駆動力を発生します。図1-2にボイス・コイル・モータ(VCM: Voice Coil Motor)を示します。VCMは、コイル、マグネット、ヨークの三つの部品で構成されています。

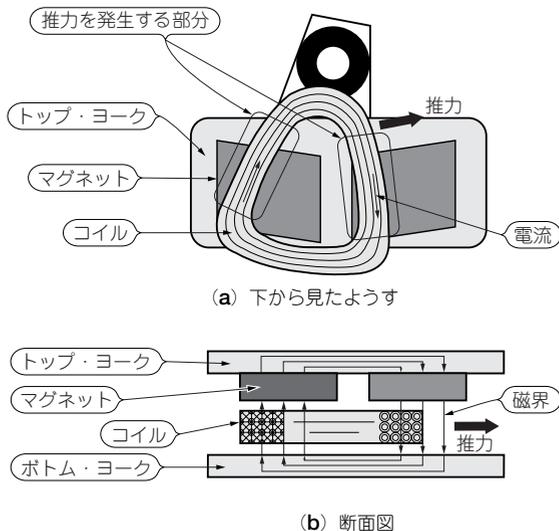


図1-2 VCMの構造

(b) 断面図

## 第2章

# ハード・ディスク・ドライブ のメカニズム

## 高速動作と高信頼性を実現するメカトロニクス

前章ではHDDの内部構造について概説しました。本章では、さらに深く立ち入ってHDDのメカニズムについて解説します。高速な動作と高い信頼性を実現するために、さまざまなメカトロニクス技術が集約されています。

### 2-1 ハード・ディスク・ドライブの構造

図2-1にHDDの内部構造を示します。HDDにはさまざまな部品や機構が備わっています。基本的な構成要素を以下で説明します。

#### ■ 基台モータ

初期のころの2.5インチHDDでは、基台とモータ部分は別個の部品でした。しかし、近年では装置の薄型化に伴い、両者は一体になりました。基台モータとトップ・カバーで密閉された機構部をHDA(Head Disk Assembly)と呼び、内部は高度な清浄度が保たれていることが要求されます。

#### ◆ 基台

基台にはスピンドル・モータのほか、ヘッド・スタック・アッセンブリ(HSA)やボイス・コイル・モータ(VCM)、ストッパなどの機構要素を精密に組み付ける必要があります。

そのため、一般にはアルミニウム合金の精密ダイキャスト品が使用されます。基台表面はHDA内への塵埃じんあいの発生を防止するため、電着などによる樹脂塗装や無電

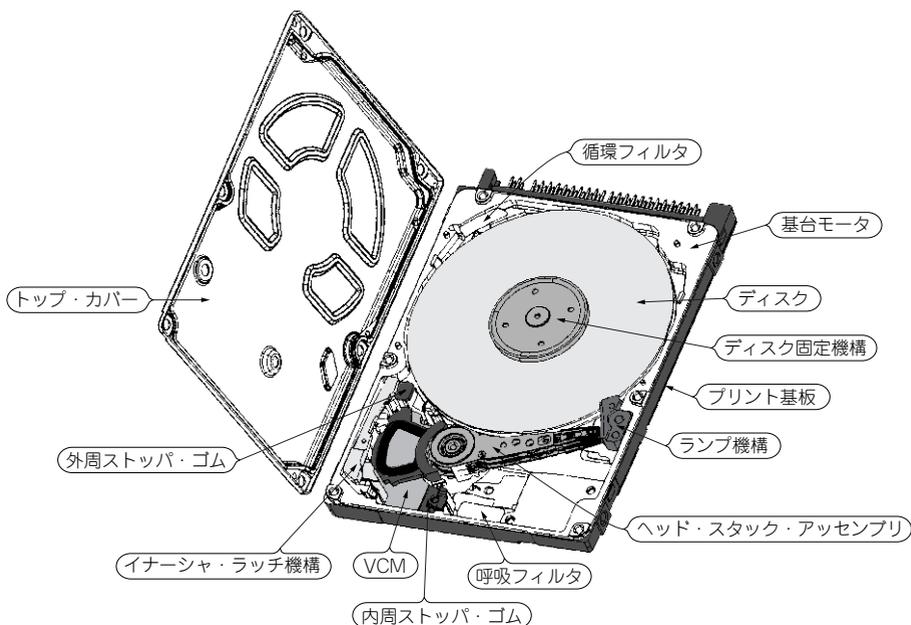


図2-1 2.5インチHDDの構造

解ニッケルめっきを施し、素材の露出を最小限に抑えています。

#### ◆ スピンドル・モータ

ディスクを回転させるためのモータです。固定側にコイルを、回転側に磁石を配置したDCブラシレス・モータを使用しています。極性切り替えのためのブラシ機構をもたない簡単な構造なので、故障の少ないことが利点です。

従来は、ホール・センサによる回転数制御を行っていましたが、近年のものは、モータ内に発生する逆起電力を利用して回転を制御するセンサレス・モータになっています。

スピンドル・モータの構造を図2-2に示します。機構部の小型化や高密度実装を実現するため、ディスクを保持するハブという部品の内側に、コイル・ステータとマグネットをもつ構造のインハブ・モータです。

従来は軸受けに玉軸受けが使われていましたが、現在は後述する流体軸受け(FDB：Fluid Dynamic Bearing)に置き換わっています。図2-2に示すように、ラジアル軸受け部とスラスト軸受け部には、微小な溝が彫られています。溝が狭くなる方向にオイルが集められ、回転軸がスリーブから浮き上がります。

## 第 3 章

# ハード・ディスク・ドライブの サーボ制御技術

## トラックを正確にトレースするためのしくみ

データの書き込み/読み出しを確実にを行うためには、記録面を移動するヘッドの位置を正確に制御しなければなりません。そのため、記録面にはユーザ・データのほかにサーボ・データが記録されています。

磁気記録の世界では、1インチの間に記録できるトラック(track)の本数を表すとき、tpi(track per inch)という単位を使います。トラックとは、ヘッドがトレースするメディア上の道筋のことです。メディアにはたくさんの同心円状のトラックが描かれており、ヘッドは、このトラック上に運ばれてデータを記録したり、再生したりしています。

最近のメディアのトラック密度は250 ktpi以上あり、半径方向1 cmの範囲に約10万本のトラックが詰め込まれています。HDDはわずか0.1  $\mu\text{m}$ 幅程度のトラック上にヘッドを運び、その位置を制御しています。

この高精度な制御には、自動制御の一種である「サーボ制御」が利用されており、その技術は高記録密度化、装置の小型化とともに大きく変化しています。本章では、HDDのヘッドの制御技術について説明します。

### 3-1 メディア上のデータのアドレスを知る方法

#### ■ メディアに書き込まれた住所情報「サーボ・データ」

図3-1に示すように、メディアには放射状にサーボ・データと呼ばれる信号パタ

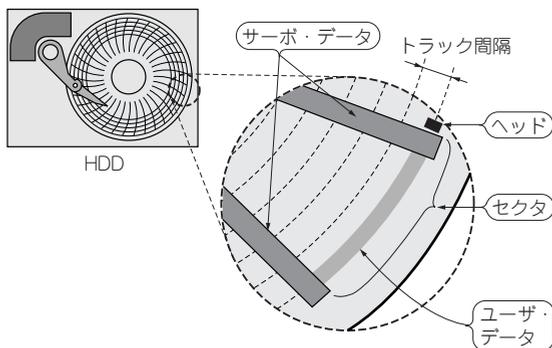


図3-1 同じメディア面にユーザ・データとサーボ・データ  
が書き込まれているデータ面サーボ方式

ーンが書き込まれています。サーボ・データは次の情報をもっています。

▶ **トラック・データ**

トラック番号が書き込まれています。

▶ **セクタ・データ**

セクタ番号が書き込まれています。一つのトラックはいくつかのデータ領域に分かれており、この一つの領域をセクタ (sector) と呼びます。セクタ番号は、トラック上の何番目の領域かを示す値です。ヘッドは、移動中もトラック・データとセクタ・データを読み取っています。

▶ **バースト信号**

この信号の振幅から、トラックの中心とヘッドの位置の相対的な位置を計算できます。

\*

HDDは、ホスト・コンピュータから書き込み命令と書き込み先のアドレスを受け取ると、サーボ・データを読み込んでヘッドの現在位置を知り、目的のアドレスにヘッドを移動して、ユーザ・データを記録したり再生したりします。ユーザ・データは、サーボ・データとサーボ・データの間の領域に記録します。

## ■ サーボ・データの書き込み方式

### ◆ 種類と特徴

サーボ・データの書き込み方式にはいくつかの種類があります。現在主流の3.5インチまたは2.5インチHDDには、データ面サーボと呼ばれる方式が採用されてい

## 第4章

# ホスト・インターフェースの種類と歴史

ドライブの進化に伴って高速/高機能化を進めてきた

HDDとPCなどのホストを接続する電氣的/機械的仕様がホスト・インターフェースです。ドライブ自体の高速化に伴って、ホスト・インターフェースにも高速化と高機能化が求められ、現在に至っています。

## 4-1 ホスト・インターフェースとは

一口にインターフェース(interface)といっても、ドライブの中にはいくつかのインターフェースが存在します。例えば、ヘッドとメディアのインターフェース、メカとエレキのインターフェースなどです。

すなわち「インターフェース」とは、異なるものが出会う場所(領域)を指します。本章でお話するインターフェースは、正しくは「ホスト・インターフェース」と呼ばれます。これは目に見える物として、接続するためのケーブルだったりコネクタだったりするわけです。実際にはそのケーブルの両端にあるはずの電子回路や論理的取り決め(プロトコル)も必要です。

これらの要素が正常に機能していれば、ケーブル上では高速でデータのやりとりが行われます。

ホスト・インターフェースは、磁気ディスク装置(ディスク・ドライブ)が誕生したのと同時に必要になったはずですが、そこで、いきなりコマンドや信号レベルなど、現状のインターフェースの取り決めをお話するまえに、昔から今に至るまでの歴史をたどってみたいと思います。

先輩方の苦勞を追いかけていくことで、うまくすれば覚えにくかった信号名，レジスタ名，そのほかの決めごとが抵抗なく記憶に残っていくかもしれません。

まず，頻繁に出てくるドライブ創世期の有名な人物たちと，彼らの設立した会社をまとめて紹介することから始めましょう。

## 4-2                      ドライブ・メーカーの系譜

何はさておき，ドライブのことをお話しするためにはIBMを避けては通れません。これはインターフェースについても同じことです。

### ■ Alan Shugart と Finis Conner

図4-1を見てください。1956年にIBMは，世界初の磁気ディスク装置である“RAMAC”(Random - Access Method of Accounting and Control)を開発しました。この設計に従事したAlan Shugart氏はMemorex社の誘いを受けて1965年にIBMを退社し，その後1973年に自らShugart社を作ります。これが後のSCSIの元になるSASI(Shugart Associates System Interface)の頭文字になっているShugart社です。

Shugart氏は，その後Finis Conner氏とともにSeagate社を1979年に設立します。Conner氏は1986年にSeagateを去り，Conner Peripherals社を設立しました。

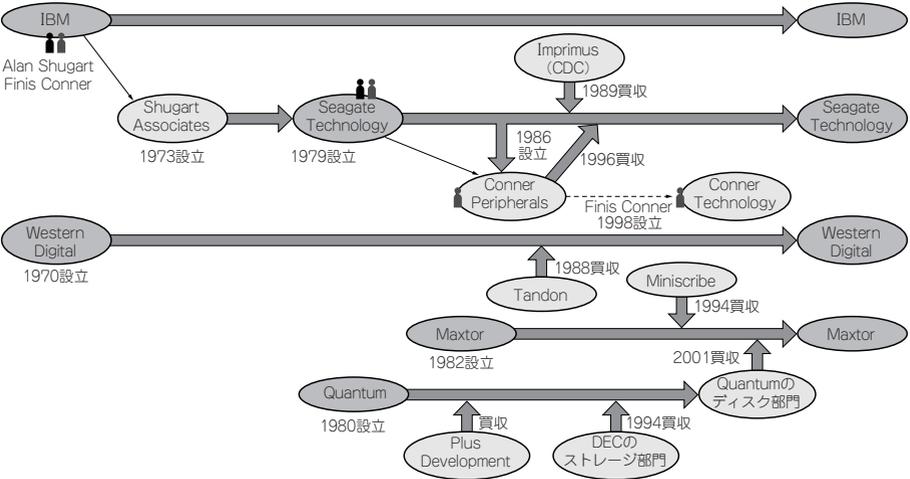


図4-1 ハード・ディスク・ドライブ・メーカーの系譜



## 第5章

# IDE & ATA, SATA インターフェースの実用知識

## コネクタ仕様からコマンド・セットまで

HDDとホストを接続するためのインターフェース仕様には、コネクタの形状と信号配置、各信号の電氣的仕様、個々の信号の意味やプロトコル、そして各種の制御コマンドとその処理内容までが含まれます。

1984年に米国IBM社が発表したPC/ATにおいて、ハード・ディスク装置が搭載されたときには、ハード・ディスク装置とのインターフェース部分を指して「ATインターフェース」と呼ばれました。この当時、ハード・ディスク装置は現在の機構部のみで、これをコントロールするための部分はディスク・コントローラと呼ばれ、ハード・ディスク装置とは別の扱いをされていました。

その後、半導体技術の向上により、ディスク・コントローラ部分をハード・ディスク装置自体に搭載することが可能となり、現在のハード・ディスク装置の構成となりました。

### 5-1 AT/IDE/EIDE/SATAインターフェースの変遷

筆者がハード・ディスク装置の開発に携わったのはハード・ディスク・コントローラがハード・ディスク装置に内蔵されるようになってからのことですが、その当時は「ディスク・コントローラ内蔵型ハード・ディスク」と呼ばれていました。これがIDE(Integrated Drive Electronics)ディスク・ドライブです。

この当時のインターフェース仕様は現在のものとは異なり、機構部のコントロールを詳細に実施するための指定などが存在しました。その例としては、ヘッドを所

定のトラックに移動させるためのシーク・コマンドに、ヘッドを移動させるためのステップ・レートを指定することがあったり、書き込み補償を行うためのレジスタが存在していた、というものが挙げられます。書き込み補償のための設定を行うレジスタはライト・プリコンペンセーション・レジスタという名前でしたが、現在はフィーチャ・レジスタと名前が改められています。

PC/ATはオープン・アーキテクチャを採用していたため、互換機が作られることとなり、ATインターフェースも普及することとなります。これに伴いAT Attachment (ATA)として1989年にANSIで標準化が行われました。その後、ATA-2、ATA-3、…と規格が更新され、現在(2008年)はATA-8が審議中の状況にあります。

一方、“EIDE”はEnhanced IDEの意味ですが、ATA規格のどの段階からこのように呼ぶようになったかということに関しては、各ハード・ディスク・メーカーにより異なっています。しかし、一般には次に挙げる仕様をもつ装置からEIDEと呼ぶことが多いようです。

- (1) PIO Mode 4(16.6 Mバイト/秒)をサポートしている
- (2) 504 Mバイトの容量制限が8.4 Gバイトに拡張されている
- (3) プライマリ、セカンダリの二つのI/Oアドレスが使用可能となっている

また、実際には、規格の標準化前に一部の主要機能の仕様がほぼ固まった段階で、例えば「ATA-5準拠」というような呼び名で装置が出荷されているのが現状で、特に仕様の切り替え時期などはデータ転送レートなどの主要部分は別として、細かい部分は各社によって異なっていることが少なくありません。

## ■ ATAの各仕様

次に、ATA各仕様の特徴的な変更点について簡単に述べます。細かいコマンド仕様などの見直しや変更もありますが、ごく特徴的な部分についてのみここでは触れることにします。

### ◆ ATA-1 制定前～ATA-1

基本的にはIBM社製PC/ATのディスク・コントローラ仕様ですが、ディスク・コントローラがハード・ディスク装置に搭載されるようになったことで、ハード・ディスク装置が自身の特性に合わせた制御やアドレス構成をもつようになりました。

一般的な互換性を保つため、ホスト側に示すシリンダ本数、ヘッド本数、トラック当たりのセクタ数を、ハード・ディスク装置が実際にもっているヘッド構成とは異なる仕様で示す、あるいは、ホストによって都合の良い数を設定できるような機

## 第6章

# パフォーマンス指標と セキュリティ機能

## 高速かつ安全なアクセスを実現するための技術

昨今のHDDは大容量化が進み、さらに高速なリード/ライト・アクセスが求められています。また、データ保護のための機能も重要です。ここでは、スキューやキャッシュ、セキュリティ・コマンド、欠陥処理について解説します。

この章では、一般的なハード・ディスク装置のパフォーマンスについての指標から、信頼性やセキュリティに対する機能について解説します。

### 6-1 ハード・ディスク装置のパフォーマンス

ハード・ディスク装置のパフォーマンスを表すための指標にはいろいろなものがあります。例えば、記録メディアの回転速度やシーク時間ももっとも基本的なものです。

しかし最近では、これらの値だけではそのハード・ディスク装置が「速い」のかどうかがわからなくなってきています。この節では、ハード・ディスクのパフォーマンスの向上を行うために実施されている技術について説明を行います。

#### ■ ハード・ディスク装置の基本性能

##### ◆ 記録メディアの回転速度について

ハード・ディスク装置は、回転する記録メディア上に同心円状に配置されたトラック内に設けた、セクタと呼ばれる最小記憶単位で記録を行っています。あるセクタを読み書きの対象とする際には、まずヘッドをそのトラックに移動し、目標とな

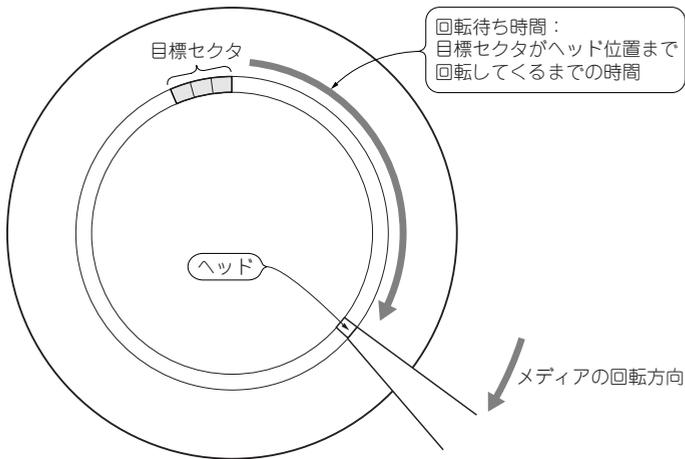


図6-1 ディスクの回転待ち時間

るセクタがヘッドの位置まで回転してくるのを待たなければなりません。目標トラックへのヘッドの移動が完了してから目標セクタが巡ってくるまでの時間を回転待ち時間と呼びます。平均的には記録メディアの1回転の半分の時間になります。

回転速度が速ければ、回転待ち時間は当然短くなりますので、特にランダムにデータを読み書きするような場合に有利です(図6-1)。

#### ◆ トラック/ヘッド・スキューと内部転送速度

1トラック上のセクタをアクセスし終わったあとには、次のトラックにヘッドを移動させることになります。この場合、同じ記録メディア上の隣のトラックに移動したり、同じシリンダ番号をもつ異なる記録メディア上のトラックに移動したりします。このために必要な時間を考慮して、セクタの位置をずらすということが行われています。図6-2は、1トラックのアクセスが終了したら、同一記録メディア面上の一つ内側のトラックに移動する場合を示しています。

ハード・ディスク装置のデータ転送速度を示す項目として内部転送速度があります。内部転送速度には2通りの表現方法があります。

まず最初が、データの記録/再生の内部転送速度です。CDR技術(第8章参照)により、記録メディア面が記録周波数の異なる領域に分けられていますが、この記録周波数に応じた速度です。一般的に内部転送速度という場合、こちらの表現が使われることが多いようです。

もう一つは、前述のトラック/ヘッド・スキューを考慮した内部(平均)転送速度

## 第7章

# メディアへの 記録/再生の原理

## 面内磁気記録から垂直磁気記録への進化と展望

ここでは、ハード・ディスク装置(HDD)の誕生から50年にわたって記録を担ってきた面内磁気記録方式と、さらに高い記録密度を達成するために2005年に新しく導入された垂直磁気記録方式について説明します。

## 7-1

## 記録/再生の原理

### ■ 面内磁気記録

#### ◆ 信号の記録

HDDでは、ガラスやアルミ製の円盤状基板に記録磁性層を形成したディスクを使用します。記録すべき信号に合わせて変調された電流が、記録ヘッドのコイルに流されます。電磁石の原理によって電流磁界がヘッド磁極内に磁束を発生させ、ディスクに対向した部分に設けられた磁気ギャップからの漏れ磁界(ヘッド記録磁界 $H_h$ )により、回転するディスクの記録磁性層の磁化 $M$ を信号に合わせて所定の方向に磁化します。これが、記録の原理です。次に、具体的に見ていきましょう。

記録ヘッドの構造と形状を図7-1に示します。記録ヘッド磁界 $H_h$ は、リング状の記録磁極に形成された微小ギャップ(空隙)から漏れ出す磁界のことです。記録ヘッド磁界は、ディスク記録層の磁化を十分に飽和するに足る磁界であることが前提です。

ディスク記録層の磁化曲線を図7-2に示します。記録ヘッドとディスクが相対的

に移動すると、まずディスク記録層の磁化が記録ギャップ直下のヘッド磁界により飽和レベルまで磁化されます。記録信号に合わせてヘッドの記録磁界が反転すると、記録ギャップ後端付近において記録磁界が大きく減衰し、ディスク記録層の保磁力  $H_c$  と一致する点に磁化転移が形成されます。

ディスク記録層の磁化を  $M$ ，そこに印加されるヘッド磁界を  $H_h(x)$ ，記録層磁化  $M$  による減磁界を  $H_d(x)$  とすると，記録層の磁化転移の状況は以下の式で決まります。

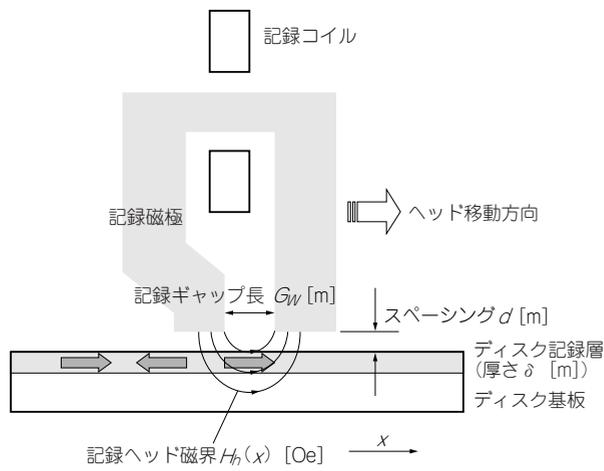


図 7-1 記録ヘッドの構造

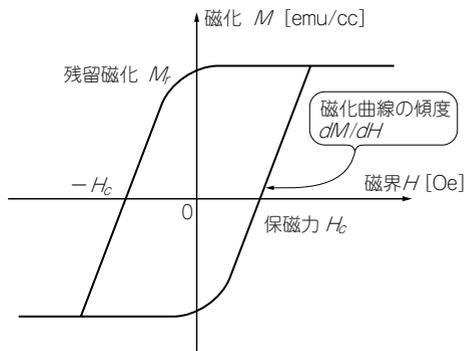


図 7-2 ディスク記録層の磁化曲線

## 第 8 章

# ハードウェアと 信号処理技術

## データ信号の流れとその処理方法

LSIの発達に伴って集積化が進み、ハード・ディスク・ドライブ(HDD)のエレクトロニクス・ハードウェアは、たった4～5個のLSIで構成されています。今後、半導体のプロセスが進化し、さらに集積化が進むと考えられています。

HDDに内蔵されている回路は、大きく次の四つの機能ブロックに分けられます。

- ① 信号処理やモータを制御するアナログ回路
- ② マイコンおよびエラー訂正や各種制御を行うロジック回路
- ③ スピンドル・モータ (SPM : Spindle Motor) やボイス・コイル・モータ (VCM : Voice Coil Motor) を駆動するパワー回路
- ④ データ・バッファやプログラムで使用するメモリ

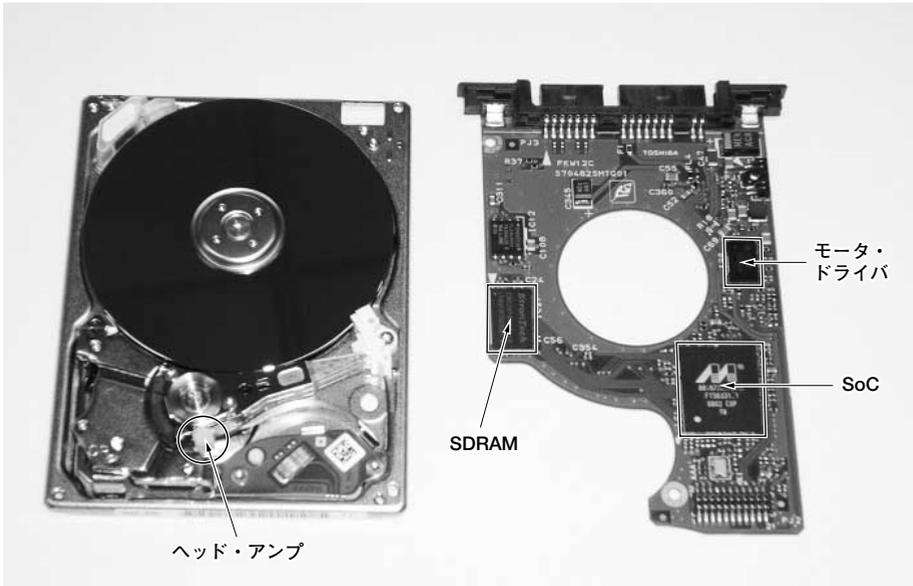
この章では、これらの回路ブロックに使われているLSIの動作のあらましを解説しましょう。

### 8-1 ハード・ディスク装置が内蔵するLSI

1.8インチHDD MK1216GSGと2.5インチHDD MK3252GSXのプリント基板とHDA(Head Disk Assembly)の外観を写真8-1に、プリント基板上に実装されている回路のブロック図を図8-1に示します。

#### ■ ヘッド・アンプIC

写真8-2に、MK1216GSGとMK3252GSXに使われているヘッド・アンプICの外



(a) 1.8インチHDD MK1216GSG



(b) 2.5インチHDD MK3252GSX

写真8-1 最新のハード・ディスク・ドライブの内観 [株東芝]

## 第9章

# 波形で学ぶHDDの 信号処理のあらまし

ノイズや符号間干渉から正確なデータを復号する

HDDの高密度化が達成された背景には、ヘッド、メカ、メディアの進化だけでなく、「PRML方式」と呼ばれる信号処理技術の採用があります。本章では、実際の信号波形を見ながら、高密度記録を支えるこの信号処理技術について解説します。

## 9-1 メディアに記録されたデータと再生信号波形

### ■ データ復元精度はヘッドの再生信号の波形品質に依存する

図9-1に、一般的なHDDの簡単なブロック図を示します。

基本構成は、カセット・テープ・レコーダと同じです。元の電気信号を磁気ので記録し、記録した磁気信号を再び電気信号として取り出します。カセット・テープ・レコーダとの違いは、取り扱う電気信号が、音声信号のようなアナログ値ではなく、“1”と“0”の2値のデジタル・データであるということです。

HDDは、メディアに記録された信号を読み出したあと、元のデジタル・データに復元する操作を行います。これを復号と呼びます。

HDDの性能を決めるもっとも重要な評価項目として、ビット・エラー・レートがあります。これは、書き込んだデータを読み出す際に生じるエラーの数の割合です。現場では、 $10^{-7}$ 程度のエラー・レートが問題にされています。ビット・エラー・レートを下げるには、メディアから読み取るアナログの再生信号の波形品質を上げる必要があります。

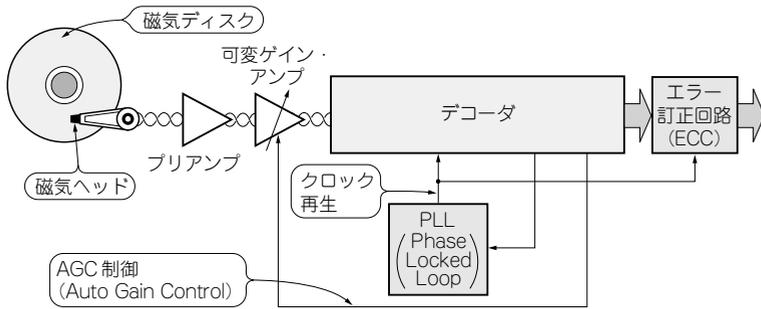


図9-1 HDDの再生系のブロック図

## 再生信号の波形

### ◆ 薄膜ヘッドからMRヘッドへ

磁気ヘッドには次の二つの機能があります。

- 記録すべき電気信号(データ)を磁気信号に変換してメディアに書き込む
- データが記録されたメディアから磁気信号を検出して電気信号に変換する

この二つの機能を同時に果たす素子の代表は電磁石です。記録密度が低い時代には、電磁石を利用した薄膜ヘッドと呼ばれるヘッドが主流でした。薄膜IC技術を利用して作られた超小型の電磁石で、書き込みと読み込みの両方を行います。

現在のHDDでは、薄膜ヘッドではなくMR(Magneto Resistive)ヘッド [主に、磁気抵抗効果の大きなGMR(Giant Magneto Resistive)ヘッドやTMR(Tunnel Magneto Resistive)ヘッドなど] を使っています。MRヘッドは、磁界の強さに応じて抵抗値が変化する半導体でできています。感度は抜群に高いのですが、読み取り機能しかないため、書き込み機能をもつ薄膜ヘッドも合わせて使用されます。薄膜ヘッドとMRヘッドの複合体というのが、現在のHDDに搭載されたヘッドの姿です。

### ◆ 薄膜ヘッドの書き込み動作とメディアの磁化の状態

図9-2に示すように、HDDでは“1”か“0”の2値でメディアに磁気記録します。データが“1”の場合には、薄膜ヘッドのコイルに正の記録電流が流れ、データが“0”の場合には負の電流が流れます。こうして、メディアは記録ヘッドに流れる電流の向きに応じた方向に磁化されます。記録された磁界は、磁化の向きに応じて反転します。