

わかりやすいHDD講座

— HDDの構造と動作原理 —

目次

① 13:00～14:00
(10分間 休憩)

② 14:10～15:10
(10分間 休憩)

③ 15:20～16:00

1. HDD概要

- (1) HDDの位置付け
- (2) 他の記憶装置との性能比較
- (3) HDD発展の歴史
- (4) HDDの性能

2. HDD各部の構造と動作原理

3. 技術動向と今後の展開

4. 修了テスト 16:00頃 終了予定

講師: IDEMA JAPAN 協賛会員
博士(工学) 吉田武史

IDEMAの紹介

- International Disk drive Equipment & Materials Association
 - 米国カリフォルニア州サンノゼで1986年に創立。
 - 日本では1992年に国際ディスクドライブ協会 (IDEMA Japan) として発足。
 - 全世界で49社が加盟。個人・アカデミア会員は11名(2022年6月30日現在)。
 - 2005年1月に米国、アジア-太平洋、日本の3極独立体制を統一し、Global IDEMAとして新たに発足。アジア-太平洋はその後活動終了。
- IDEMAの目的
 - HDD業界の協調と健全な発展に資する。
 - HDD業界の縦横のつながりを深める。
- 活動
 - DISKCON JAPAN (国際ディスクフォーラム、展示会)の主催
 - スタンダードコミッティ (技術委員会)による業界標準の策定
 - ヘッド・ディスク部会、コンタミネーションESDコントロール部会、コンシューマHDD部会、データ復旧部会、アーカイブ部会
 - 教育・啓発活動
 - ESD (Electro-Static Discharge): 静電放電

オンライン・サマーセミナー

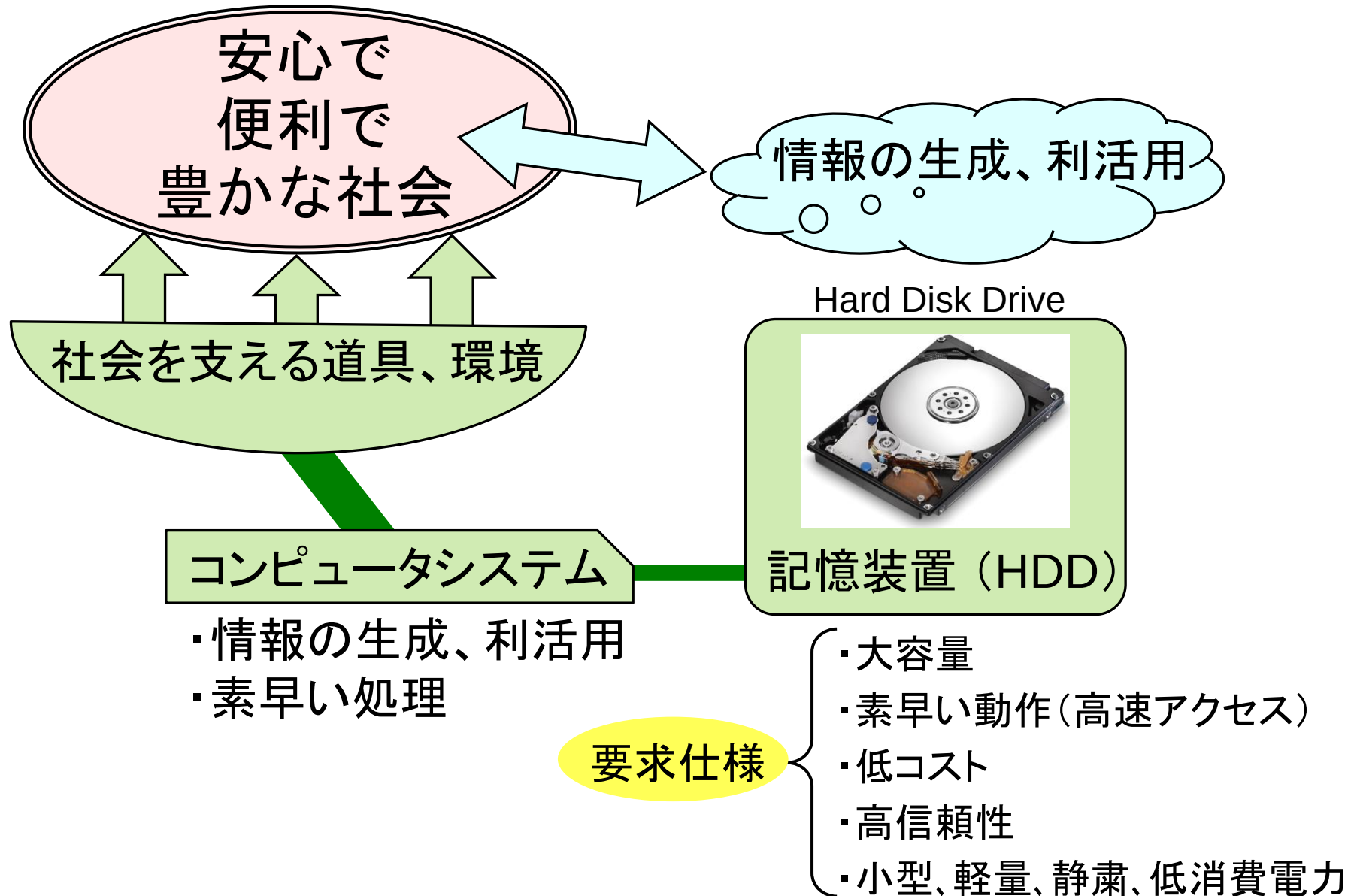
HDD信頼性講座、信号処理講座、SSD入門講座、ストレージシステム入門講座、わかりやすいHDD講座

ストレージ用語辞典

1. HDD概要

(1) HDDの位置付け

1



HDD

記憶装置
(磁気ディスク装置)

データを記録する円板を高速で回転し、データの書き込み、読み取りを行う磁気ヘッドを高速で運動させる。

磁気記録

記録したい情報を
ディスク上に
微小な磁石の列で作る

ノートブックPC



情報を記録するディスク

高速で回転中

アームの高速回転運動

磁気ヘッド
(情報の記録・再生を行う)

アームの運動の回転中心

磁気ヘッドを搭載したアーム

2022年に全世界で出荷されるHDDの内訳予想

3

2. 3.5型ニアライン

前年 3. 28%
33.6%
・高信頼性
・大容量

4. エンタープライズ 4.7%

・2.5型 SFF (Small Form Factor)
高速回転、高信頼性ハイエンド機種
(10,000 rpm、15,000 rpm)
(rpm: 毎分回転速度)

3. 2.5型モバイル

前年 1. 34%
27.6%
・ノートPC
・外付け用途
・車載

1. 3.5型ATA 34.1%

前年 2. 33%
・デスクトップPC
・HDDレコーダ
・外付け用途

2021年
全世界出荷台数:
2億5,900万台

2022年 全世界(予想)

出荷台数: 2億3,200万台(前年比 -11%)

売上高: 229億ドル(前年比 -3%)

総出荷容量: 1.54 [ZB] (前年比 +15%)

ひゃっけい
E [Exa = エクサ = 百京] = 10^{18}

じゅうがい
Z [Zetta = ゼタ = 十垓] = 10^{21}

用語の説明

- **モバイル:**
移動性、携帯性が求められる可搬型の小型・軽量情報通信機器向け。
- **ATA (AT Attachment):**
コンピュータ本体にHDDなどの外部記憶装置を接続するインターフェース規格。シリアルATA(SATA、Serial ATA)。
- **デスクトップ:**
机上据え置き用途。
- **ニアライン:**
Near-Onlineの略。業務処理データなどの利用頻度が高く、高性能処理が要求されるオンライン(Online)と、長期保存を目的とするオフライン(Offline)の中間を指す。
- **エンタープライズ:**
基幹サーバや大規模ストレージシステム向け。
- **SFF (Small Form Factor):**
3.5型高性能高速回転HDDを2.5型にダウンサイジングしたHDD。

身近に使われているHDD



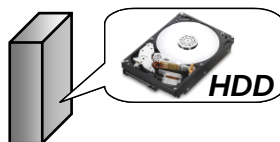
テレビ



テレビ番組録画機



リムーバブル装置

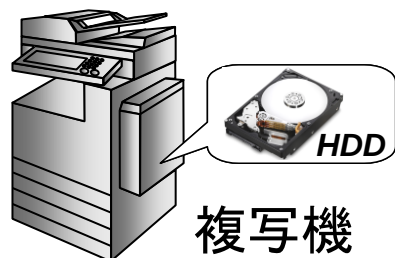


ビデオゲームプレーヤー



ノートブックPC
SSD主流へ

● SSD (Solid State Drive):
記憶媒体としてフラッシュメモリ
を用いるドライブ



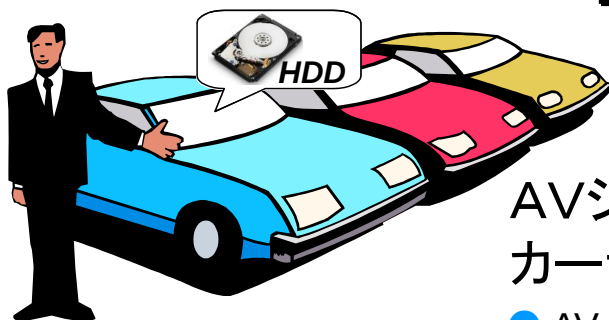
複写機



サーバ、ストレージシステム
HDD + SSD

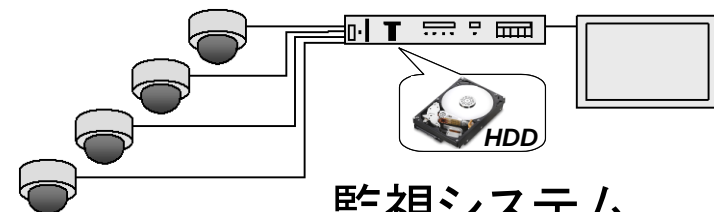


デスクトップPC
HDD + SSD



AVシステム、
カーナビゲーション

● AV (Audio / Visual): 音響と映像



監視システム

HDDからSDカード(フラッシュメモリ)へ

HDD (Hard Disk Drive: 磁気ディスク装置) の使用例

コンピュータ用途

- ・パーソナルコンピュータ(ノートブック型、デスクトップ型)
- ・コンピュータシステム(さまざまな産業、社会基盤システム)
- ・ディスクアレイシステム(データを格納、高速・大容量・高信頼性)など

コンピュータ以外の用途

- ・自動車用カーナビゲーションシステム
- ・複写機(オフィスなどに設置)
- ・ビデオゲームプレーヤ(娯楽用)
- ・ビデオレコーダ(テレビ録画用、監視カメラ情報用)
- ・リムーバブル型HDD(耐衝撃特性向上、セキュリティ機能)など

消滅した用途(フラッシュメモリの台頭により淘汰)

- ・携帯情報端末、音楽・動画プレーヤ
- ・ムービーカメラなど

各種HDDの現況



フラッシュメモリの台頭で
市場から消滅



薄型化
・7 mm厚、2 TB
5 mm厚も製造された



媒体枚数
増加
・大容量化



10,000 rpm



2.5型SFF
(Small Form
Factor) へ移行
・小型化
・省スペース
・省電力

超小型HDD(0.85型、1型、1.3型、1.8型)

- ・フラッシュメモリの台頭で市場から消滅

2.5型HDD

- ・HDD全出荷台数の1/3を占める。
多品種あり。
- ・ディスク回転速度
(5400 rpm、7200 rpm)

厚さ〔mm〕	ディスク枚数	記憶容量〔TB〕
7	1, 2	~2
9.5	1, 2, 3	~2
15	~4	~5

3.5型HDD

・デスクトップ用、サーバ用(大容量)

- ・最大記憶容量 20 TB(ヘリウムガスを充てんし、流体抵抗を減らし、省電力化したHDD)
- ・ディスク回転速度(5400 rpm、7200 rpm)
- ・搭載ディスク枚数増加による記憶容量の確保
(面記録密度を向上できないため。2.5型も同様。)

・サーバ用(高速アクセス)

- ・高速回転の3.5型の10,000 rpm、15,000 rpm 機は、ダウンサイジングし、2.5型SFF (Small Form Factor) へ移行した。
- ・小型化、省スペース、省電力

● 1 TB(テラバイト) = 10^{12} (1兆) バイト

● rpm (revolution per minute): 毎分回転速度

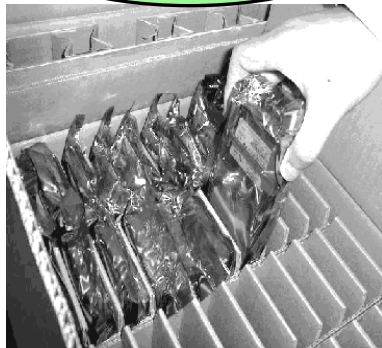
HDD取扱い上の留意点

2.5型HDDの例

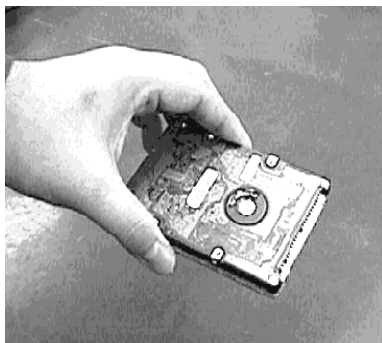
9

正しい作業

梱包と開梱



HDDの側面
を持つ



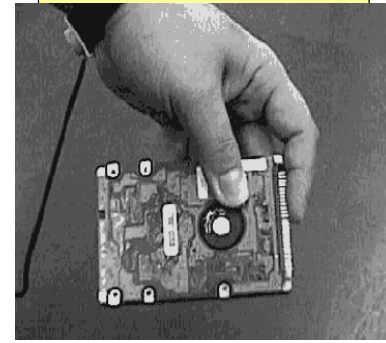
HDDは1台だけ
重ねないで持つ



不正な作業

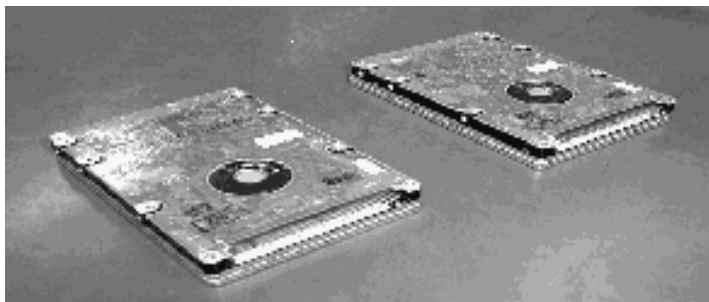
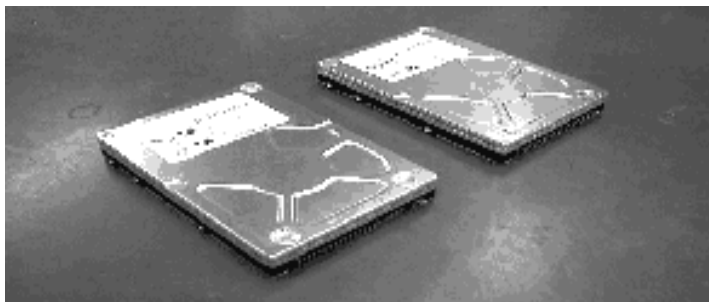


コネクタには
触れない

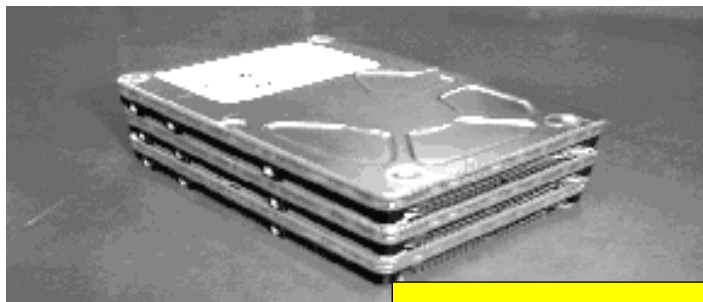


2.5型HDDの例

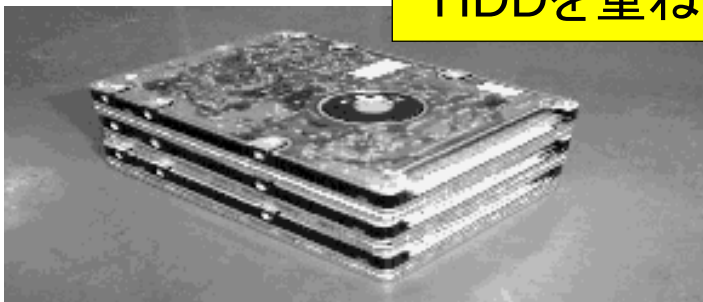
正しい置き方



不正な置き方



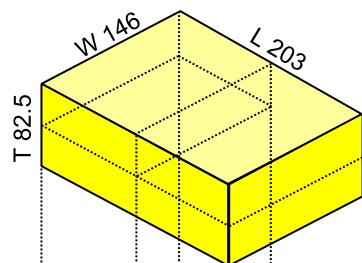
HDDを重ねない



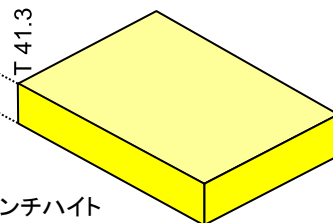
HDDのフォームファクタ

HDDの外形サイズ
(縦, 横, 高さ)を規定したもの。

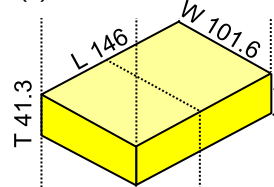
(1) 5.25型、フルハイト



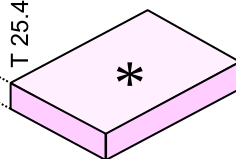
(2) 5.25型、ハーフハイト



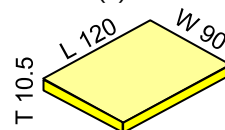
(3) 3.5型、1.6インチハイト



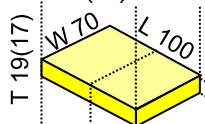
(4) 3.5型、1インチハイト



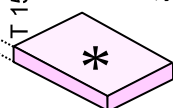
(5) 3型



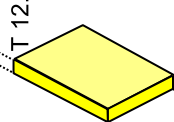
(6) 2.5型、
19(17) mm 厚



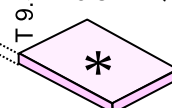
(7) 2.5型、
15 mm 厚



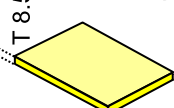
(8) 2.5型、
12.5 mm 厚



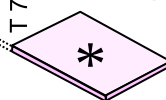
(9) 2.5型、
9.5 mm 厚



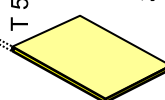
(10) 2.5型、
8.5 mm 厚



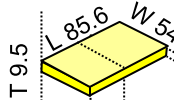
(11) 2.5型、
7 mm 厚



(12) 2.5型、
5 mm 厚



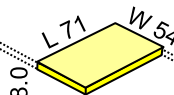
(13) 1.8型、
9.5 mm 厚



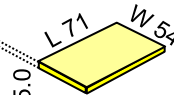
(14) 1.8型、
8.0 mm 厚



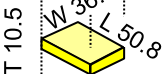
(15) 1.8型、
8.0 mm 厚



(16) 1.8型、
5.0 mm 厚



(17) 1.3型



(18) 1型



(21) 1型



(20) 0.85型



L : 長さ [mm]
W : 幅 [mm]
T : 厚さ [mm]

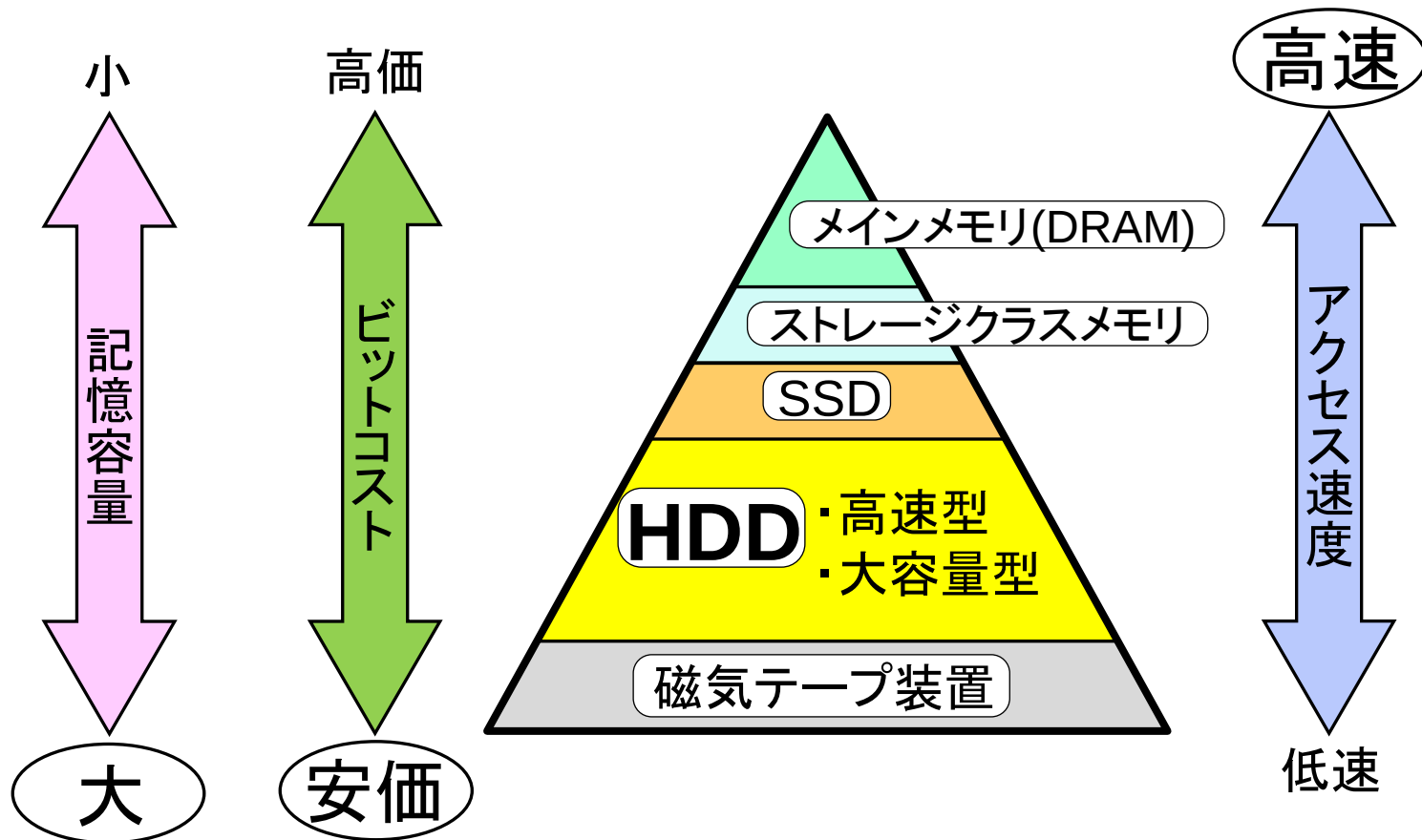
記号 * は現在量産中の装置を示す。

製造終了

- 「フォームファクタ」とは: HDDの外形サイズ(縦, 横, 高さ)を規定したもの。
- ディスク径が5.25インチの5.25型から始まり、その後、3.5型、3型、2.5型、1.8型、1.3型、1.0型、0.85型の装置が製品化されてきた。 ●1 インチ = 25.4 mm
- フォームファクタは、5.25型フルハイトが起点であり、その半分の高さの装置は、ハーフハイトと呼ばれた。
- 投影面積が5.25型装置の半分の装置は、3.5型で、当初は1.6インチハイト(41.3 mm)であったが、現在の3.5型はすべて1インチハイト(約26 mm)である。
- 1.6インチハイトの装置は、5.25型フルハイトの装置の1/4の体積であった。また、これよりも小さく、厚さがわずか10.5 mmの3型が製造された時期もあった。
- 投影面積が3.5型装置の約半分の装置は2.5型で、2.5型の半分強の装置は1.8型である。
- ダウンサイジングが加速され、1.8型装置の約半分のサイズの1.3型や五百円硬貨と同程度の大きさのディスクを搭載した1型も製造された。
- 1型は携帯音楽プレーヤ、ムービーカメラ、ウェアラブルコンピュータ、携帯情報端末など、多様な分野で用いられた。
- 0.85型は五円玉程度の大きさのディスクを搭載した世界最小、最軽量の装置で、携帯電話に搭載されたこともあった。
- 超小型装置は、安価なフラッシュメモリの台頭によって次第に市場から姿を消していった。現在出荷されている装置は3.5型と2.5型のみである。

(2) 他の記憶装置との性能比較

記憶階層と性能



- DRAM: Dynamic Random Access Memory
- SSD: Solid State Drive

■ 記憶装置の階層構造と性能を示す。

■ 下の階層ほど記憶容量が大きく、ビットコストも安価。

ビットコスト: 単位記憶容量当たりのコスト

【例】記憶容量が 6 TB (6,000 GB)で価格が 9,280円の3.5型HDD

ビットコスト = $9,280\text{円} / 6,000\text{ GB} = 1.5\text{円/GB}$ (1 GB当たり 1.5円)

■ 上の階層に行くほどアクセス性能が高い。 ●1 GB(ギガバイト) = 10^9 (10億)バイト

アクセス速度: データのやりとり(書き込み, 読み取り)の速さ

メインメモリ(DRAM): コンピュータ内でプログラムやデータを記憶する装置

ストレージ・クラス・メモリ:

高速アクセス性能はストレージ(HDD等)とメインメモリ(DRAM)の間の位置付け。
抵抗変化型メモリ(ReRAM)、磁気メモリ(MRAM)、相変化メモリ(PRAM)、
強誘電体メモリ(FeRAM)などが開発されている。

SSD:

Solid State Drive(ソリッド・ステート・ドライブ)。

記憶媒体としてNAND型フラッシュメモリを用いたHDD互換の記憶装置。

HDD: サーバ用(高速アクセス性能重視)、一般用(記憶容量重視)。

磁気テープ装置: アクセス速度は遅いが、大容量なので、アーカイブ等に
使われている。

SSDとHDDの得失比較

15

	<u>SSD</u>	<u>HDD</u>
信頼性(書き込み時)	△	◎
データ転送速度	◎	○
アクセス速度	◎	△
記憶容量	○	◎
消費電力	○	△
騒音	発生しない	△
耐衝撃特性	◎	△
ビットコスト	△	◎
性能コスト	◎	○
省スペース	◎	○

記号の説明:

◎ 優れている

○ 良好

△ 少し劣る

性能コスト

IOPS当たりのコスト

IOPS

1秒間に読み込み／書き込みを行える回数)

Input Output Per **S**econd

- 半導体メモリ(NANDフラッシュメモリ)を記憶素子とするストレージデバイス。
- OS(オペレーティングシステム)からはHDDのように見えるストレージデバイス。
- 形状、インターフェイスはHDDと互換性のあるものがほとんど。
- HDDと同じ接続インターフェイス(シリアルATA)を備え、HDD代替として利用可能。OSからはHDDとして認識できる。
- HDD互換にすれば新たにインフラを作る必要は無く、HDDインフラを活用できる。
- 読み書きは、「ページ」と呼ばれる複数のメモリセルをまとめた単位で行う。消去は、「ブロック」と呼ばれる複数のページをまとめた単位で行う。
- HDDのようなディスク回転駆動機構やヘッド位置決め機構を持たないため、ディスク回転待ち時間やヘッド位置決め時間などの動作時間が生じない。よって、高速アクセスが可能。
- 運動機構が無いため、消費電力も少ない。動作音も発生しない。
- 機構部品が無く、軽いため、衝撃にも強い。
- 現在のところ、単位容量あたりの価格はHDDよりも高いが、価格差は徐々に縮まりつつある。



■ 世界最初の磁気ディスク装置 RAMAC誕生（1956年）、米国IBM。
（500万文字、5 MB相当、直径60 cmのディスク50枚積層）

● RAMAC: Random Access Method of Accounting and Control

● 1 MB(メガバイト) = 10^6 (100万) バイト

HDDの発展の経緯

- ① 大型磁気ディスク装置のダウンサイジング。
- ② 小型磁気ディスク装置の登場とダウンサイジングの加速。
外形サイズ(縦、横、高さ)を「フォームファクタ」で規定。
- ③ 高密度記録による大容量化の伸展。
- ④ 超小型HDD(0.85型、1型、1.3型、1.8型)の躍進。
フラッシュメモリの台頭による超小型HDDの淘汰。
- ⑤ 各装置におけるさらなる薄型化。
搭載ディスク枚数の増加(高密度実装)。
面記録密度の伸びが鈍化。
新しい記録方式(エネルギーアシスト記録等)への取り組み。

HDDは、装置のダウンサイジング(小型・薄型・軽量化、可搬性)、記憶容量の増大のほか、以下の点で発展してきた。信頼性、低コスト、高速・高精度アクセス、高速データ転送、低発熱、低消費電力、静粛性(静音化)、環境変化などの外乱に対する安定特性(温度、湿度、振動、衝撃、電氣的ノイズ)、量産性、メンテナンス性、環境性(環境基準値達成、ライフサイクルデザイン)など。

(4) HDDの性能

各種装置における最高性能例

- ① 大容量 20 TB (20兆バイト)
〔エンタープライズ用 3.5型〕

シリンダ数 50万本

〔3.5型〕

(ディスク直径 97 mm)

新聞(朝刊、夕刊、1日合計
56ページ)を40,000年分

ディスク片面当たりの
トラック全長 112 km、
装置1台当たり 2,000 km

- ② 高速アクセス

リード時平均シーク時間 3 ms

〔エンタープライズ用 2.5型〕

$$1 \text{ ms} = \frac{1}{1000} \text{ 秒}$$

1/300 秒

- ③ 高速データ転送

250 MB/s (サステインデータ転送速度)

〔サーバ用 3.5型〕

新聞5か月分/秒

① 記憶容量

キロ
メガ
ギガ
テラ
ペタ
エクサ
ゼタ
ヨタ

1 kB (kilo-byte)	= 10^3 (千)	バイト
1 MB (Mega-byte)	= 10^6 (百万)	バイト
1 GB (Giga-byte)	= 10^9 (十億)	バイト
1 TB (Tera-byte)	= 10^{12} (一兆)	バイト
1 PB (Peta-byte)	= 10^{15} (千兆)	バイト
1 EB (Exa-byte)	= 10^{18} (百京) ^(けい)	バイト
1 ZB (Zetta-byte)	= 10^{21} (十垓) ^(がい)	バイト
1 YB (Yotta-byte)	= 10^{24} (一秭) ^(じよ)	バイト

20

1 GB (ギガバイト) = 10億バイト = 10^9 バイト

≡ A4サイズの書類 100万枚

≡ 新聞 約2年分(朝刊、夕刊合わせて56ページ/日)

≡ テレビ放送録画 1時間

3 GB ≡ ビデオ映像 135分(映画1本分)

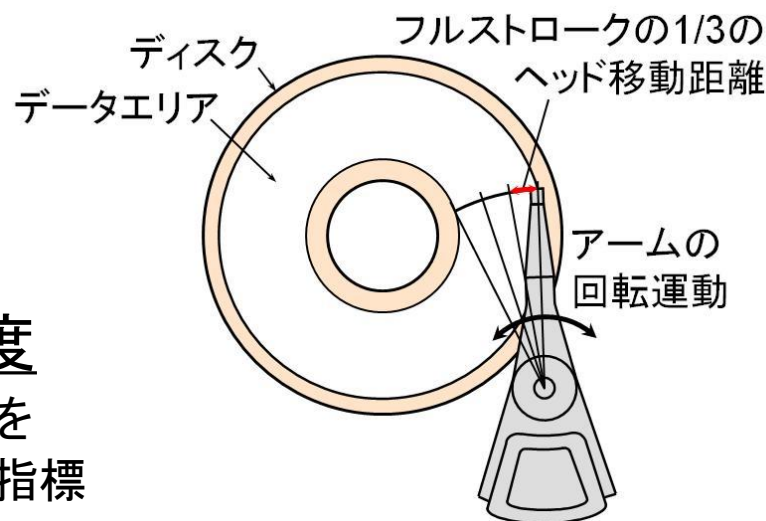
10 GB ≡ BSデジタルハイビジョン放送 約1時間

② 平均シーク時間 (Seek)

= フルストロークの1/3を移動して
ヘッド位置決めに要する時間

③ サステインデータ転送速度

連続的にどれだけの速度でデータを
出力(または入力)できるかを表す指標



- ④ 高精度ヘッド位置決め
7 nm (統計和 $\pm 3\sigma$)
〔2.5型〕

1億分の1 m
(タバコの煙の粒子の
1/10～1/100の大きさ)

- ⑤ 極低浮上
(ヘッド搭載スライダ)
1 nm未満 (熱膨張制御時)
〔2.5型〕

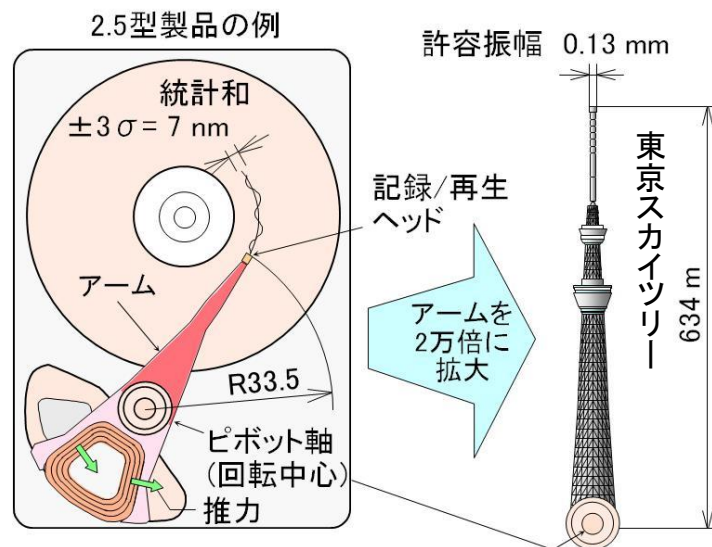
10億分の1 m
(常温, 大気圧における
空気分子の平均自由行程の1/60)

● $1\text{nm} = 10^{-9}\text{ m} = 10\text{億分の}1\text{ m}$

- ⑥ 環境変化に強く, 信頼性が高い
■ 気温 -30～85°C (動作時)
-40～95°C (非動作時)
〔車載用 2.5型〕

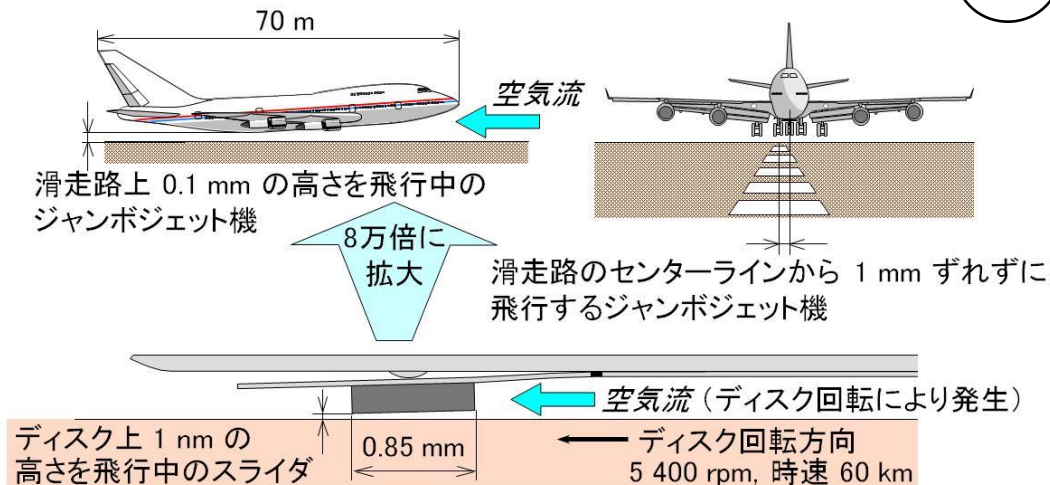
冬の北極から
灼熱のサハラ砂漠まで

④ ヘッド位置決め精度



⑤ 極低浮上

22



⑥ 環境条件 装置仕様 (2.5型HDD 機器仕様書)

- $1\text{nm} = 10^{-9}\text{ m}$
= 10億分の1 m
- 1 フィート = 30 cm

		ノートPC用HDD	車載用HDD
高度[m]	動作時	-300～3,050 (～高地、1万フィート)	-300～5,000
	非動作時	-300～12,200 (～4万フィート)	-300～15,000
温度[°C]	動作時	0～60	-30～85
	非動作時	-40～65	-40～95

環境条件には、温度、湿度、振動、衝撃、雰囲気、騒音、高度(海拔)、外部磁界等がある。

⑥ 環境変化に強く、信頼性が高い（続き）

■ 高度 5,500 m (動作時)
〔車載用 2.5型〕

富士山の1.5倍の高度、
0.5気圧

■ 耐衝撃 400 G (動作時、2 ms、ハーフサイン波)
〔2.5型〕

重力加速度の400倍

■ 連続運転 365日以上
〔サーバ用 3.5型〕

ヘッド飛行距離 90万km/年
(1年で地球から月まで1往復半)

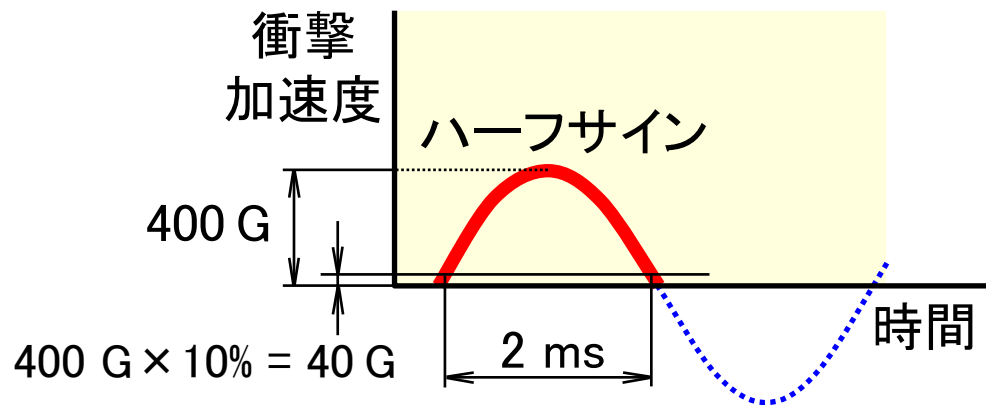
⑦ 安価 1 GBが1.5円
〔デスクトップ用 3.5型〕
¥9,280 (6 TB)

A4サイズの文書100万枚分
(束ねると幅 90 m)
の記憶容量が1.5円

耐衝撃特性

装置仕様

- ・衝撃(印加時間)
 - ・動作時 400 G (2 ms)
 - 200 G (1 ms)
 - ・非動作時 1000 G (1 ms)



正弦半波衝撃波形の作用時間
＝最大衝撃加速度の10%をクロスする時間

2. HDD各部の構造と動作原理

HDDの構造(2.5型の例)



装置 表

ディスクの
回転運動

ディスク
(情報を記録)

カバー

ベース

プリント基板
アセンブリ



装置 裏

アームの
揺動運動

アームの揺動運動の
回転中心

ヘッド(情報の記録・再生を行う)
を搭載したアーム

記憶容量: 1 TB(テラバイト)、ディスク枚数: 2枚、ヘッド: 4個
装置サイズ: 縦 100 × 幅 70 × 厚さ 9.5 mm

- ベースとカバーで覆われた密閉空間内に機構部分がある。
- 装置下部には電子回路を備えたプリント基板アセンブリ (PCBA: **P**rinted **C**ircuit **B**oard **A**ssembly) がねじで固定されている。
- ディスクには同心円状にトラックが形成されており、データが記録される。
本例ではフォーマット時の総記憶容量は1 TB(テラバイト)
 $1 \text{ TB} = 10^{12}$ (1兆)バイト
- ベースにはディスクを回転支持する滑り軸受(流体軸受や FDB: **F**luid **D**ynamic **B**earingとも呼ばれる)と
ディスクを回転駆動するスピンドルモータが組み込まれている。
- ディスクは毎分何回転という速度で回転している(図では反時計回り)。
本例では5,400 rpm (rpm: **r**evolution **p**er **m**inute)
- ヘッドを搭載した可動部は、回転軸まわりに自由に揺動できるように支持されている。
- ヘッドはディスクの外周側から内周側までのデータエリア内を運動し、データの読み書きを行う。

[カバー内側には
ブリーザフィルタ、
シール材有り]

PCBA(プリント基板アセンブリ、電子回路)

(PCBA: Printed Circuit Board Assembly)

ネジの形状

一般の電化製品用ネジ



十字穴

HDD用ネジ (ヘックスローブ)



星型穴

ロード直後の状態

ランプ(ロード・アンロード機構)

HGA(ヘッド・ジンバル・アセンブリ、
サスペンションとフレクシャで構成)
(HGA: Head-Gimbals Assembly)

FPC(可撓性プリント基板)
(FPC: Flexible Printed Circuit)
(別称: フレックス・ケーブル・アセンブリ)

循環フィルタ

スピンドルモータ

・トップクランプ
・ディスクスペーサ

ディスク

締結ねじ

ベース

アーム

ラッチ機構

アウトストップ

ピボットアセンブリ

ボイスコイルモータ

(VCM: Voice Coil Motor)

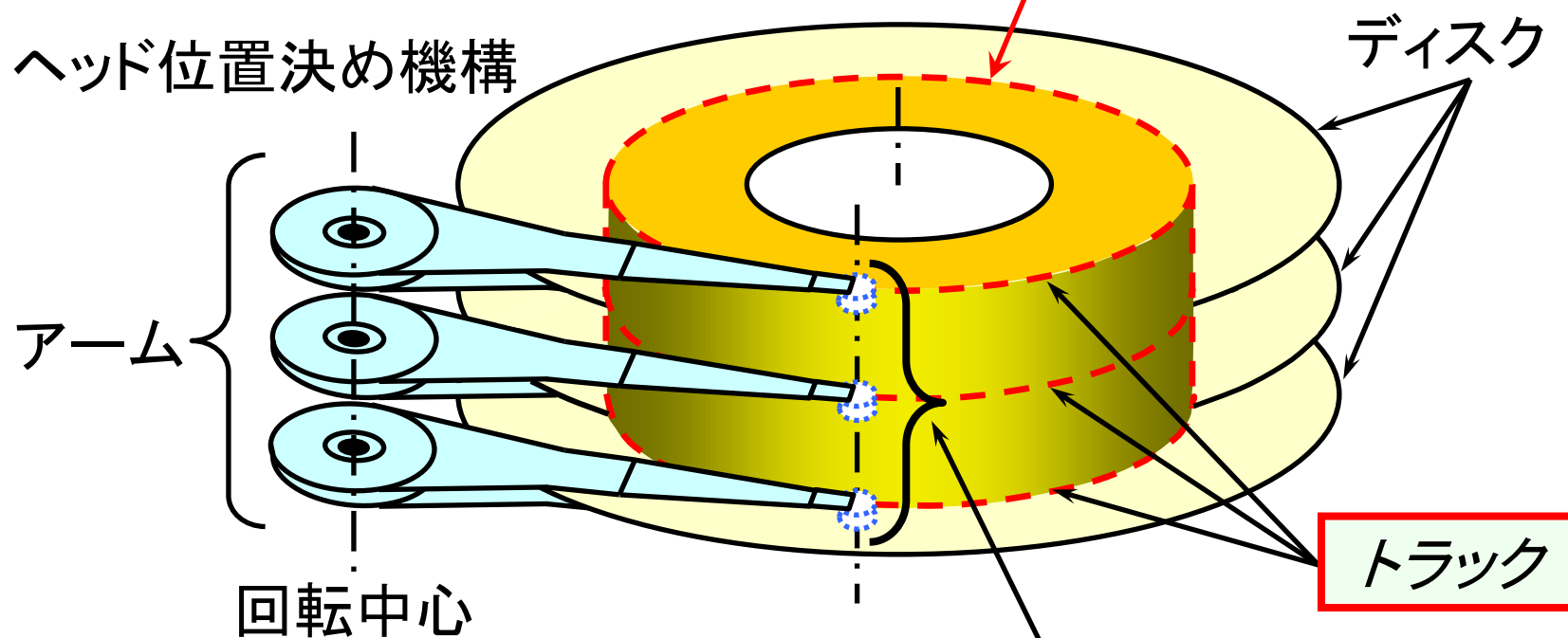
ヘッドプリアンプ

コネクタ

- **ロード・アンロード機構**: ヘッドが形成されたスライダはディスクの外に待機。情報の読み書きの指令を受けるとディスクに入り込み(ロード)、処理が終われば、また元の待機位置まで退避(アンロード)する。
- 可動部のアームには、サスペンションを介してスライダが設けられている。ディスク回転(図では反時計回り)に伴う空気流によってスライダはディスク上を数nm (ナノメートル)という微小隙間を隔てて浮上している。
 $1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m} = 10\text{億分の}1 \text{ m}$
- ヘッドは薄膜形成技術によってスライダに作り込まれている。
- 本例の4個のヘッドは同時に動作するのではない。ヘッド切り換えによってひとつのヘッドを選択し、記録・再生動作が行われる。
- 可動部を回転支持するピボットアセンブリは、軸と玉軸受で構成されている。
- 可動部の駆動は、駆動コイルと磁石・ヨークアセンブリから成るVCM(Voice Coil Motor)で行う。
- 非動作時にHDDに外部から衝撃が作用すると、場合によっては可動部がロード・アンロード用のランプ上のホームポジションから逸脱し、損傷する可能性がある。ヘッドを搭載した可動部を守るため、可動部をロックする「ラッチ機構」を備えている。
- 装置内に浮遊する塵埃は「循環フィルタ」で捕獲する。
- 活性炭を充填したフィルタアセンブリ(別称:ブリーザフィルタ)は「呼吸孔」を有し、内外気圧調整、装置内部の湿度制御、各部品からの発ガスの吸収を行う。

トラックとシリンダ

シリンダ (トラックを含む円筒状空間)



ディスク面鉛直方向に整列した状態で
アームに固定されているヘッド

装置の主な仕様(2.5型HDDの例)

関連

スライド番号



①9

④6

②9 ③2

⑤2

⑥1

⑤1

④9

⑤0

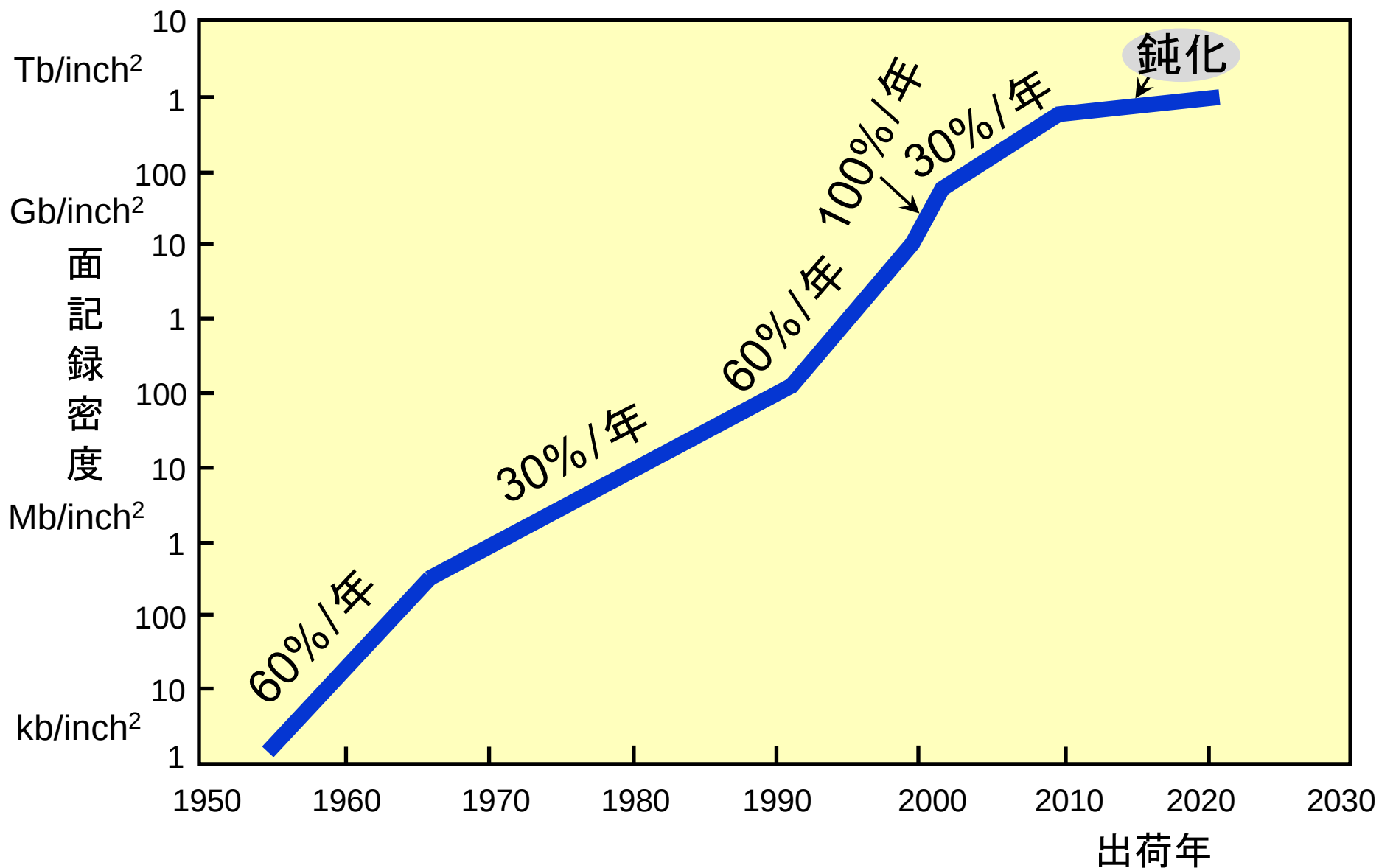
③2

③2

③2

項 目		仕 様
記憶容量(フォーマット時)		1 TB (1000 GB)
セクタ容量		512 Bytes
ディスク枚数, ヘッド个数		2枚, 4個
シリンダ数		248,875
シーク時間 (リード時)	平均	12 ms
	フルストローク	20 ms
	1トラックジャンプ	1 ms
データバッファ容量		8 MB
ロード/アンロード回数		60万回
平均回転待ち時間		5.5 ms
ディスク回転速度		5400 rpm
最大面記録密度		1.08 Pb/m ² (694 Gb/inch ²)
最大線記録密度		71.9 Mb/m (1825 kbits/inch)
最大トラック密度		15.0 Mtracks/m (380 ktracks/inch)

HDD面記録密度の推移



記録密度

2.5型HDDの例 1 TB、5,400 rpm

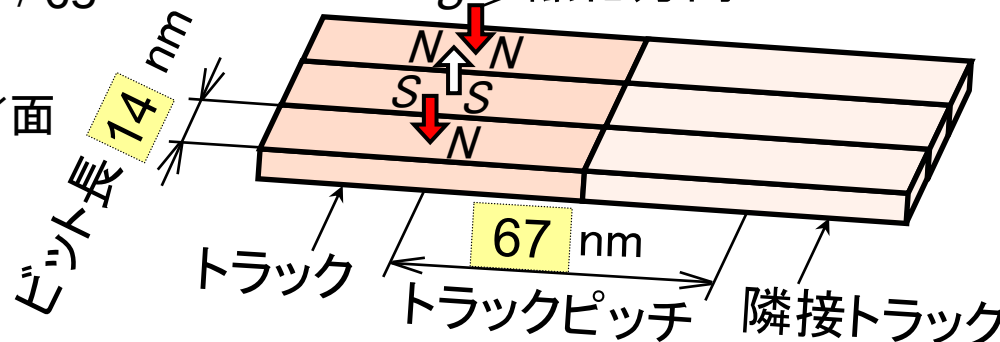
32

$$\begin{aligned}\text{面記録密度} &= \text{線記録密度} \times \text{トラック密度} [1.08 \text{ Pb/m}^2] \\ &= 1,825 \text{ kbp} \times 380 \text{ ktp} = 694 \text{ Gb/inch}^2\end{aligned}$$

線記録密度
bpi (bits per inch) 1,825 kbp

トラック密度
tpi (tracks per inch) 380 ktp

ディスク外径 $\phi 65$
トラック本数
248,875本/面



inch: インチ = 25.4 mm
nm: ナノメートル
= 10億分の1メートル
= 10^{-9} m

記録密度の向上は、①小型、②大容量、③低コスト
という要求性能を同時に満たすことができる。

ビット長とトラックピッチ

2.5型HDDの例
5,400 rpm、1 TB

ビット長 l_b

$$\begin{aligned} l_b &= \frac{1 [inch]}{1,825 [kb]} \\ &= \frac{25.4 \times 10^{-3} [m]}{1,825 \times 10^3 [b]} \\ &= 13.9 \times 10^{-9} [m] \\ &= 14 [nm] \end{aligned}$$

トラックピッチ p_t

$$\begin{aligned} p_t &= \frac{1 [inch]}{380 [kt]} \\ &= \frac{25.4 \times 10^{-3} [m]}{380 \times 10^3 [t]} \\ &= 67 \times 10^{-9} [m] \\ &= 67 [nm] \end{aligned}$$

k: kilo = 1,000
nm: ナノメートル = 10億分の1メートル = 10^{-9} m
b: bit
t: track

面記録密度 d_a = 線記録密度 d_l × トラック密度 d_t

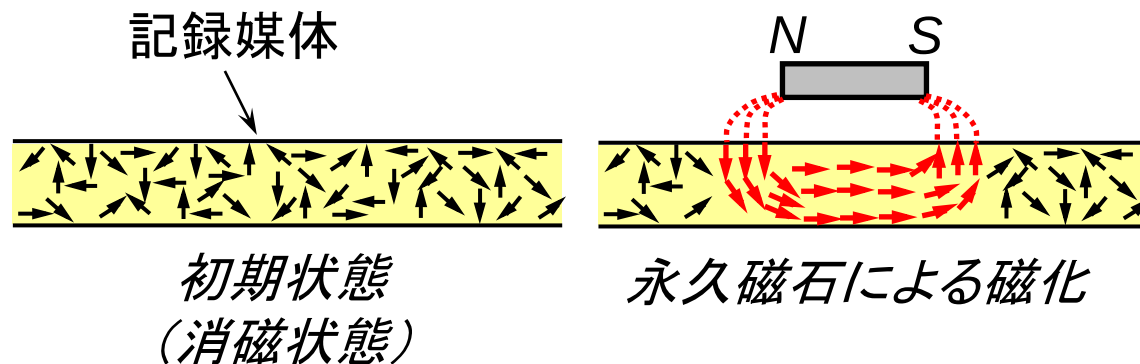
〔インチ単位系で計算〕

$$\begin{aligned} d_a &= d_l \times d_t \\ &= 1,825 [kb / inch] \times 380 [kt / inch] \\ &= 694 \times 10^9 [b / inch^2] \\ &= 694 [Gb / inch^2] \end{aligned}$$

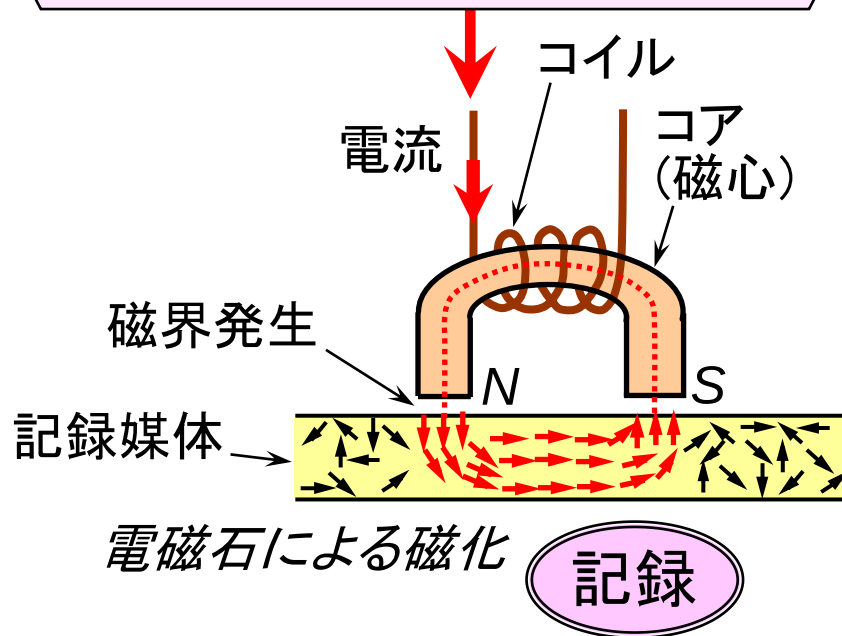
〔SI単位系で計算〕

$$\begin{aligned} d_a &= d_l \times d_t \\ &= 71.9 [Mb / m] \times 15.0 [Mt / m] \\ &= 1.08 \times 10^{15} [b / m^2] \\ &= 1.08 [Pb / m^2] \end{aligned}$$

磁気記録の原理

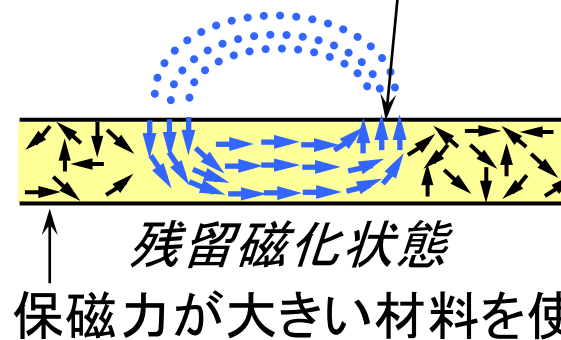


流す電流の向きを変えれば
磁化の方向を変えることができる。



外部磁界を取り除いても
磁化が残る。
これを検知する。

再生



データの書き込みと再生

データの書き込み

データを符号(コード)に変換 $\equiv$ 変調(符号化)

変調されたデータ: 符号化データ



データ再生

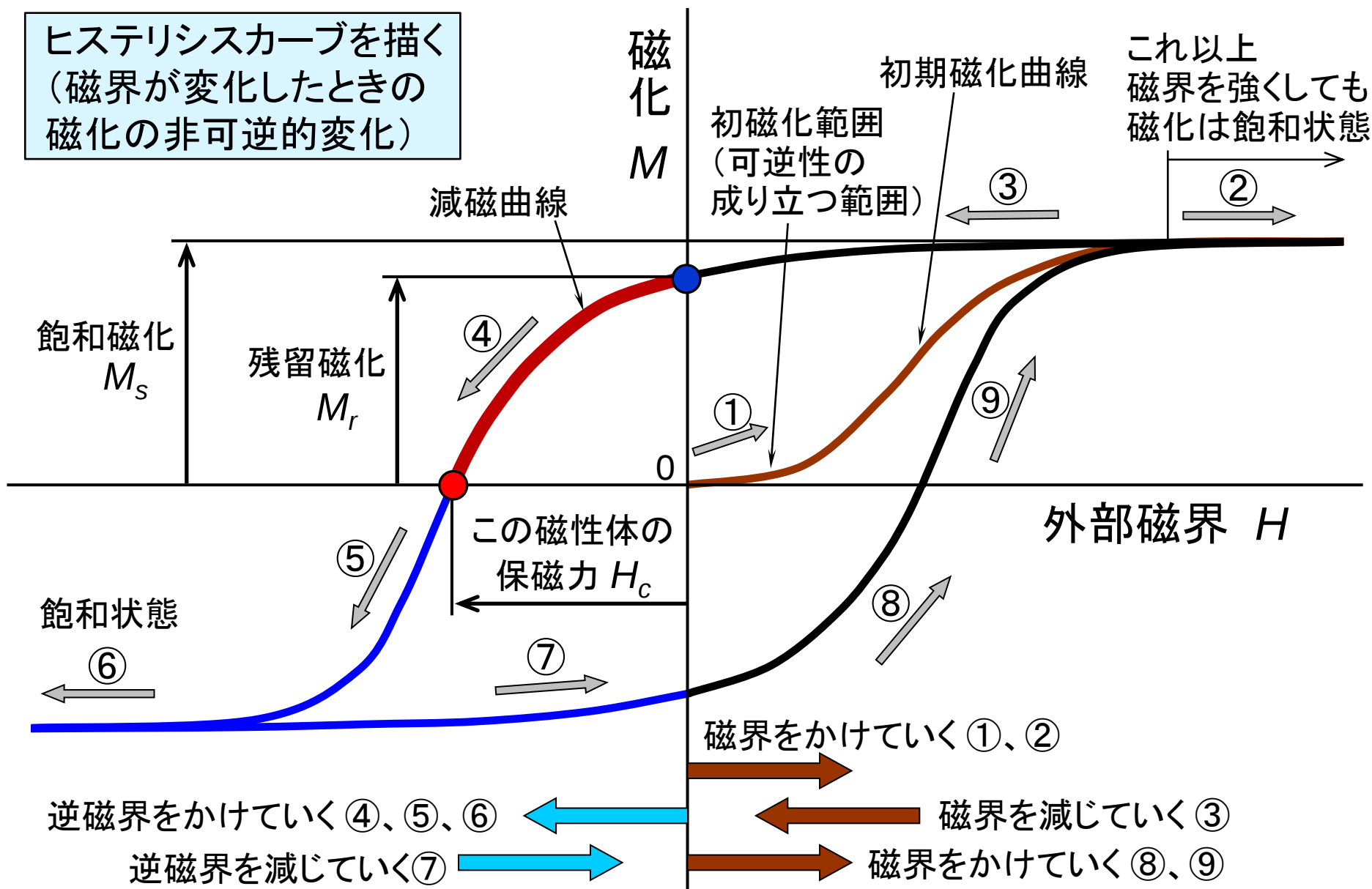
変調されたデータを元に戻す $\equiv$ 復調(復号化)

磁化曲線

磁性体に外部から磁界を与えると
磁性体が磁化されていく様子を示す

37

ヒステリシスカーブを描く
(磁界が変化したときの
磁化の非可逆的变化)



■ 飽和磁化 M_s

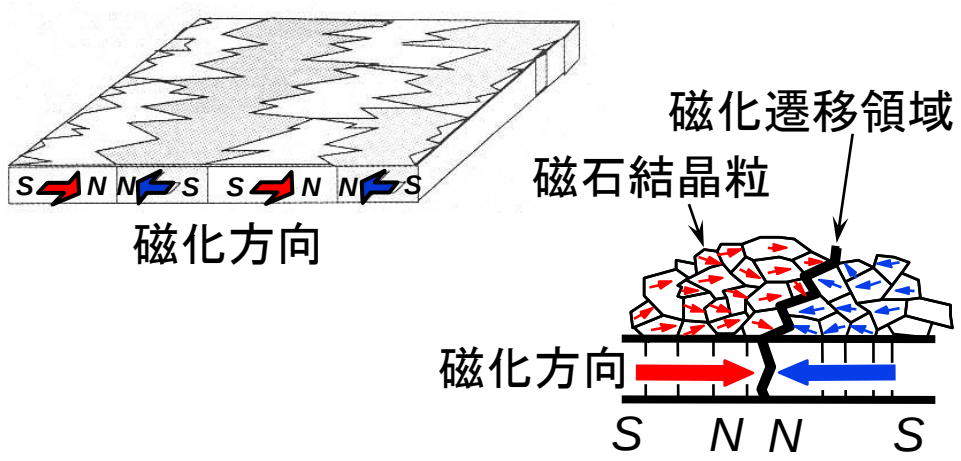
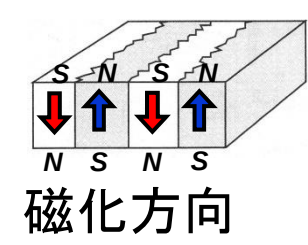
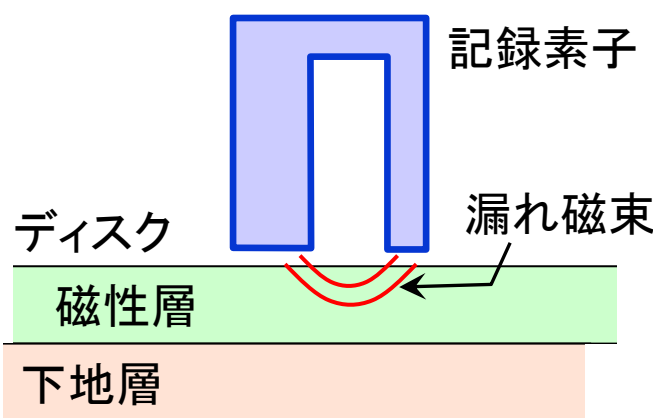
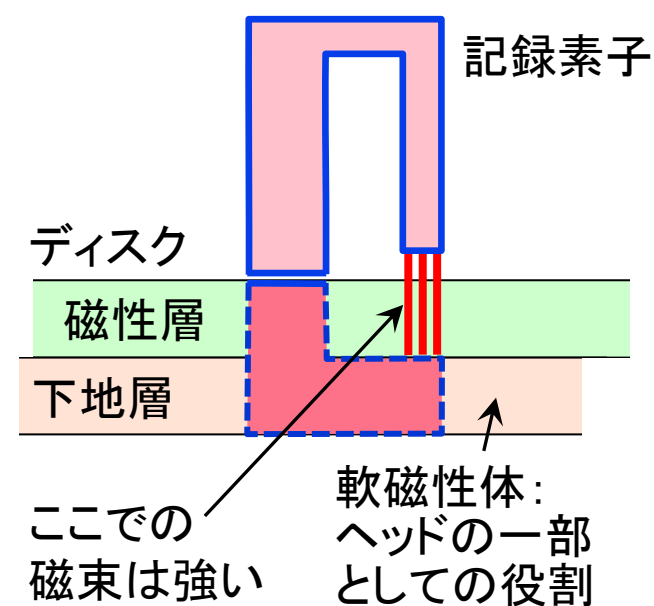
磁性体に外部から磁界を与えると磁性体が磁化されていくが、磁界を強くしても磁化の増加が鈍り、磁化がほとんど増加しなくなった時点での自発磁化の強さを飽和磁化という。

■ 残留磁化 M_r

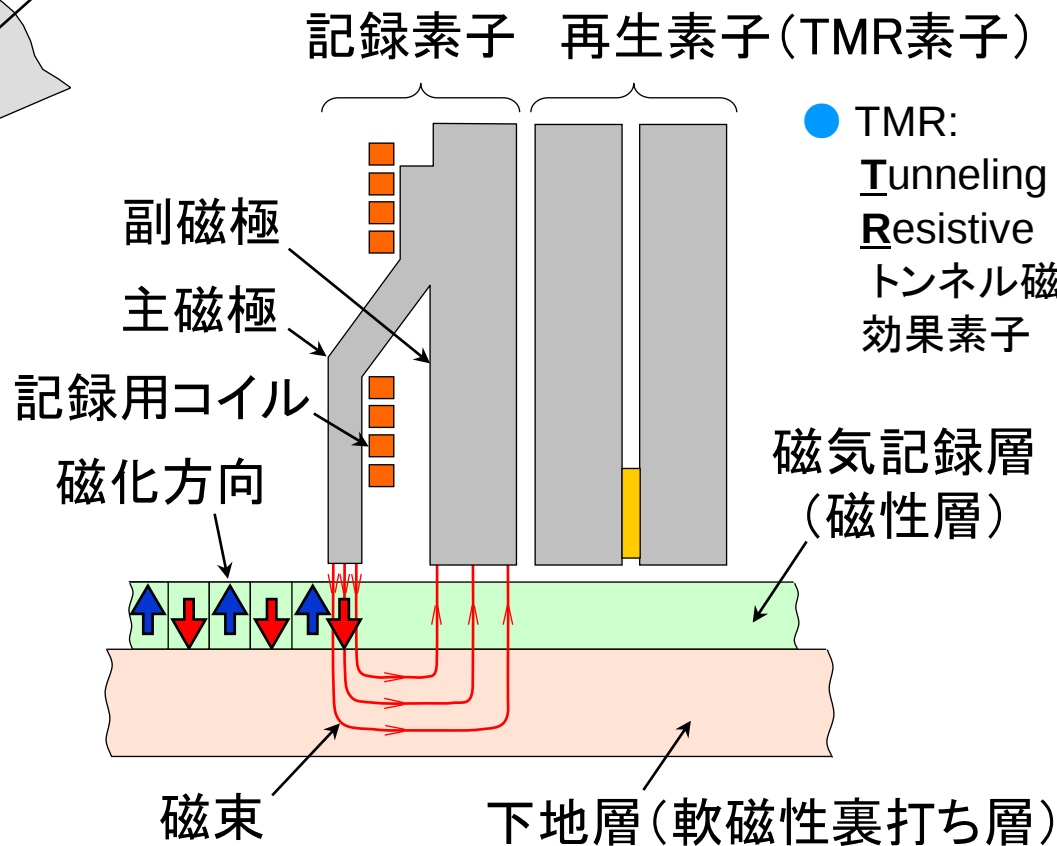
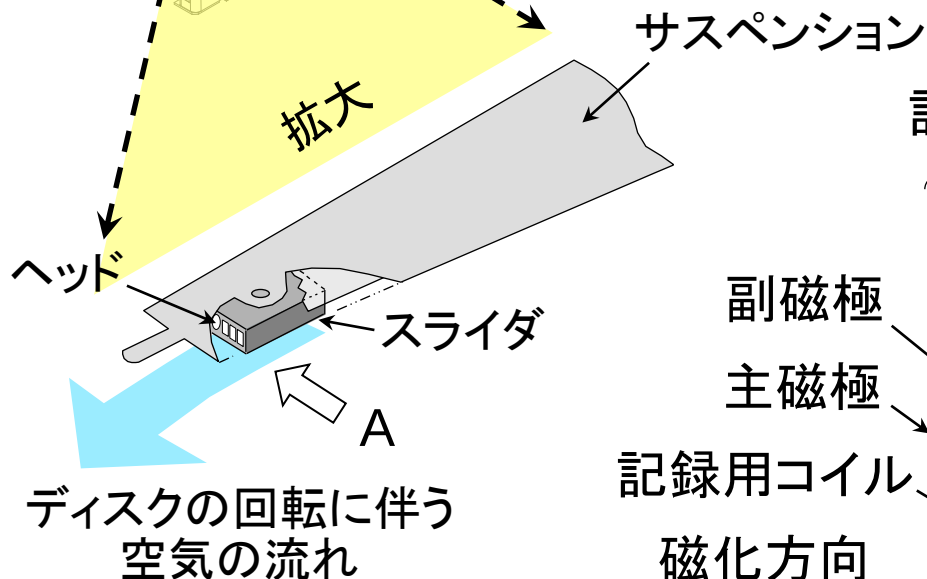
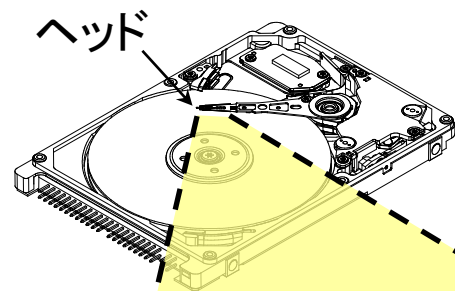
磁性体に外部から磁界を与えて磁化した後、磁界をゼロにした時に残る磁化のこと。

■ 磁性体の保磁力 H_c

- ・磁化された磁性体を磁化されていない状態に戻すために必要な反対向きの外部磁界の強さ。
- ・逆向きの磁界をかけ、残留磁化がゼロになった時の外部磁界の強さ。

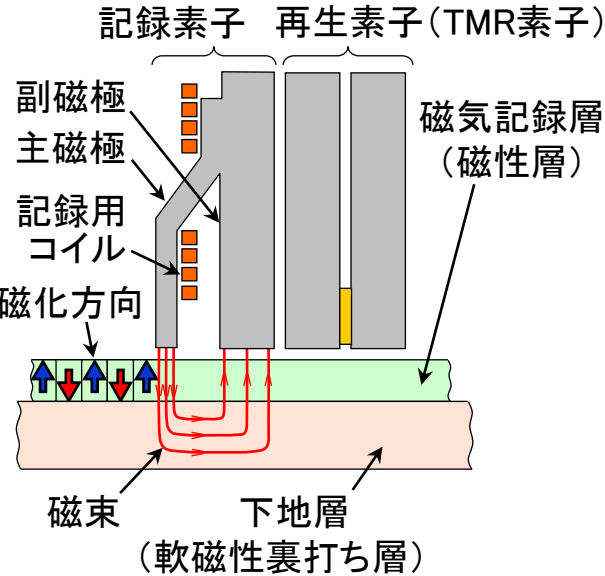
	面内磁気記録方式	垂直磁気記録方式
記録方式	 磁化遷移領域 磁石結晶粒 磁化方向 磁化方向 S N N S	 磁化方向 S N S N N S N S 磁化方向
ヘッド構造	 記録素子 ディスク 磁性層 下地層 漏れ磁束	 記録素子 ディスク 磁性層 下地層 軟磁性体：ヘッドの一部としての役割 ここでの磁束は強い

ヘッドの断面構造(A視図)

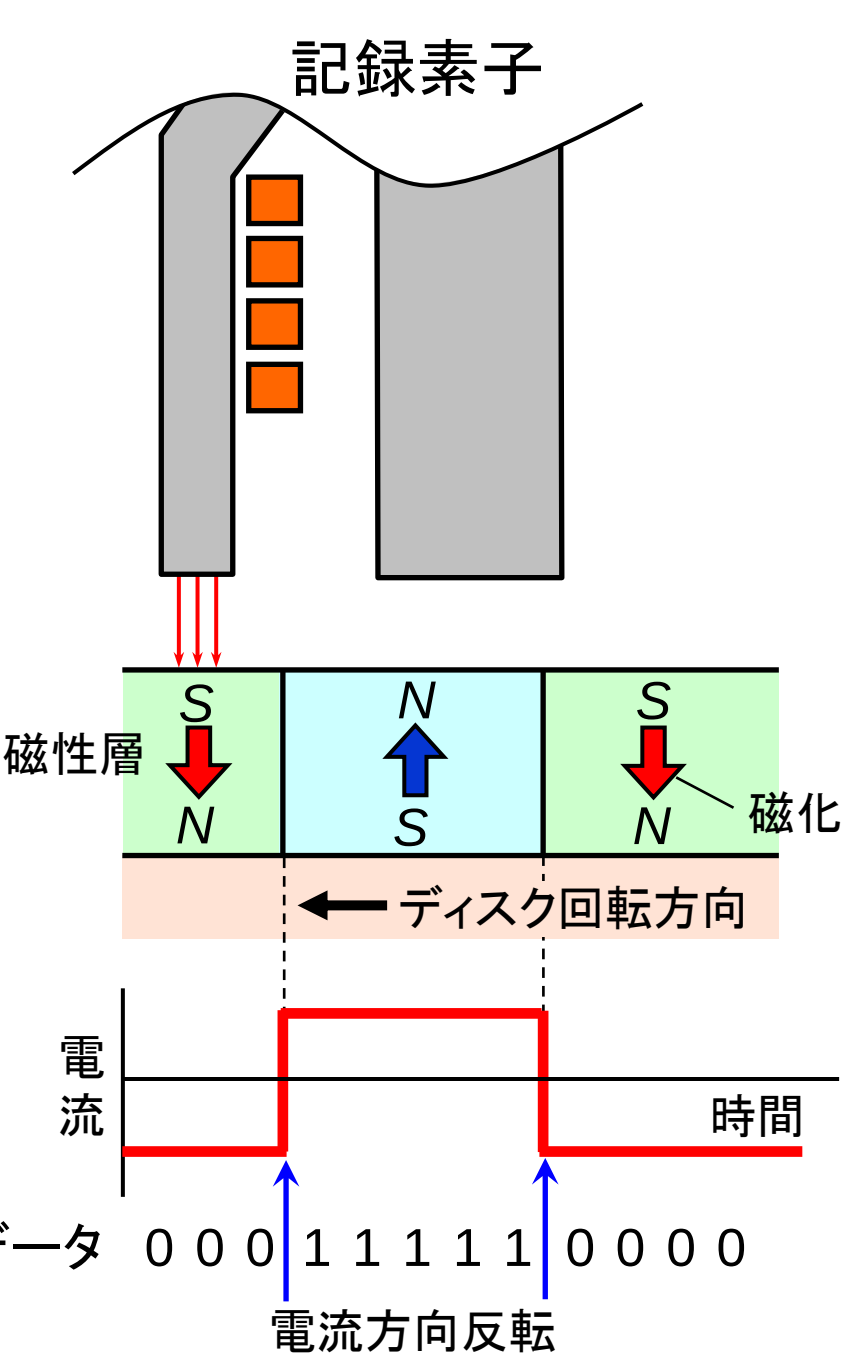


● TMR:
Tunneling Magneto-
Resistive
 トンネル磁気抵抗
 効果素子

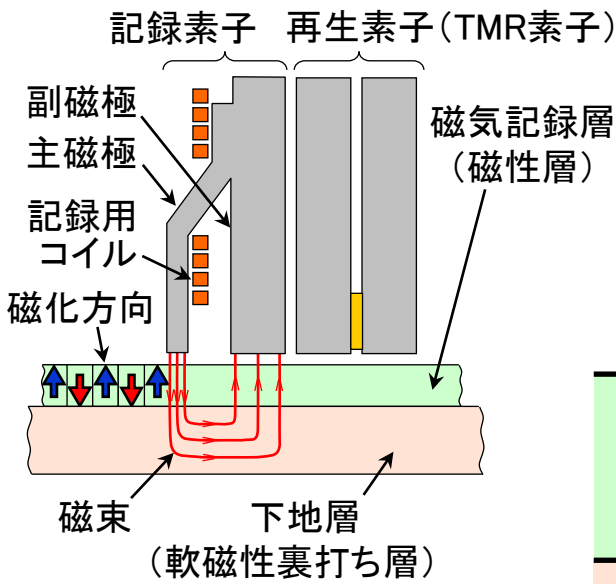
垂直磁気記録方式の 書込みの原理



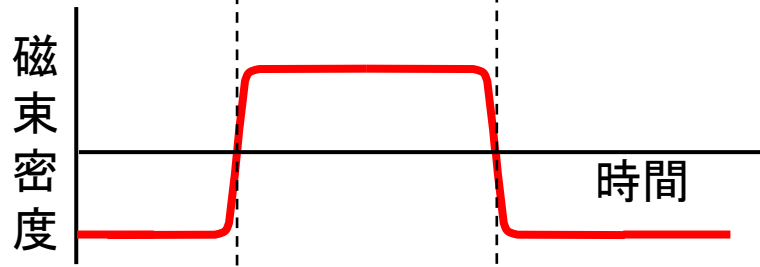
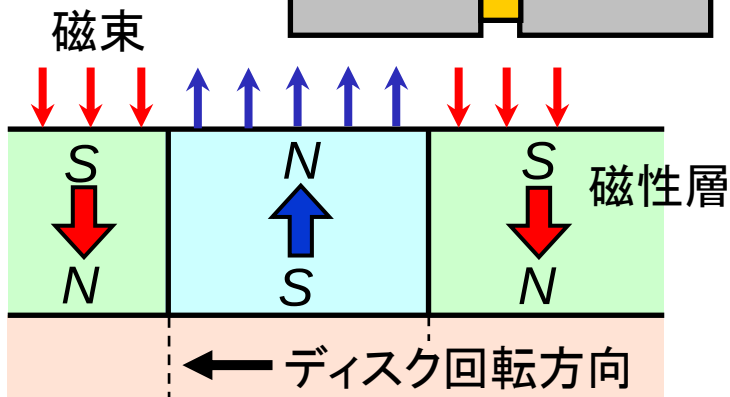
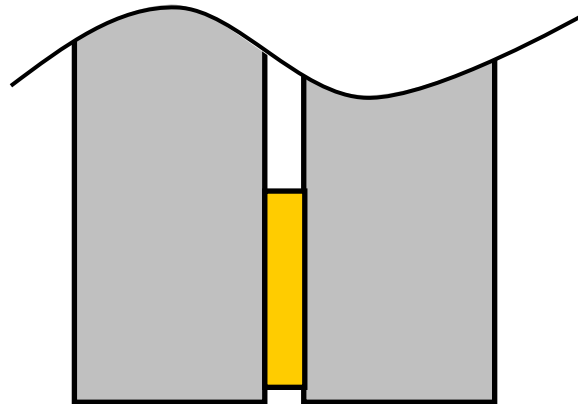
書くデータは、
磁気ヘッドコイルの電流に変換



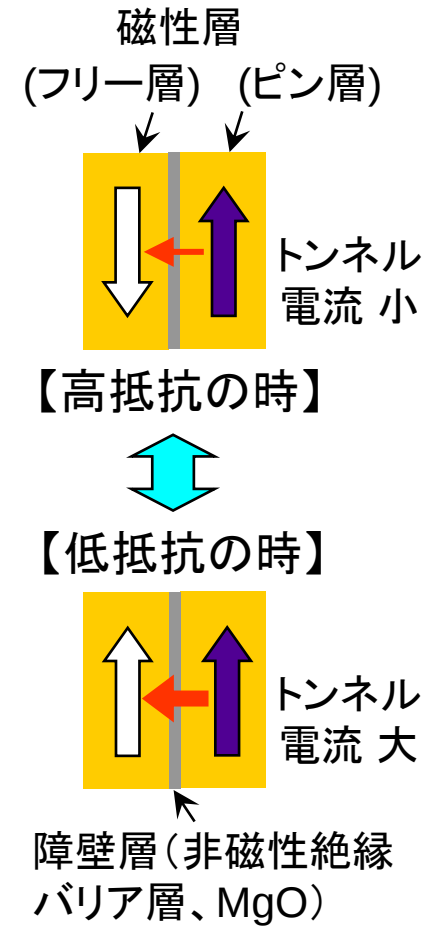
垂直磁気記録方式 における再生の原理



再生素子 (TMR素子)



再生信号 0 0 0 1 1 1 1 1 0 0 0 0



外部磁界によって 磁性層の磁化方向が決まる。2つの強磁性層の相対的な磁化方向の違いによってトンネル電流の値が変化する。

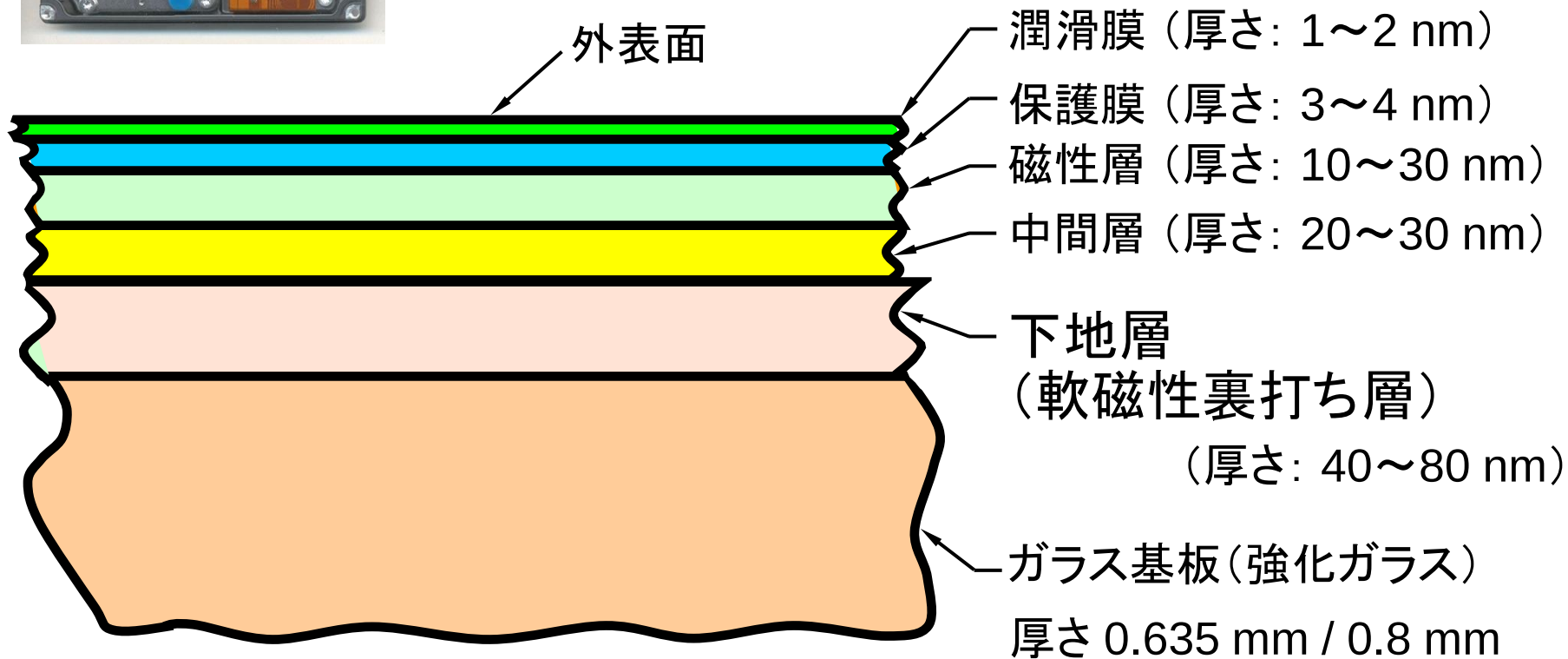
ディスク(垂直磁気記録媒体)



性能向上の取り組み

- ・ 磁性素子の微小化
- ・ 磁化反転を容易に確実にする
- ・ 浮上量の低減
- ・ 浮上安定化
- ・ 材質強化

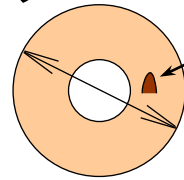
外表面



ディスク断面構造(2.5型HDDの例)

ディスクの許容表面粗さ

2.5型ディスク
 $\phi 65$



許容突起高さ
< 1 nm

1千万倍
に拡大

日本



許容突起高さ
< 1 cm

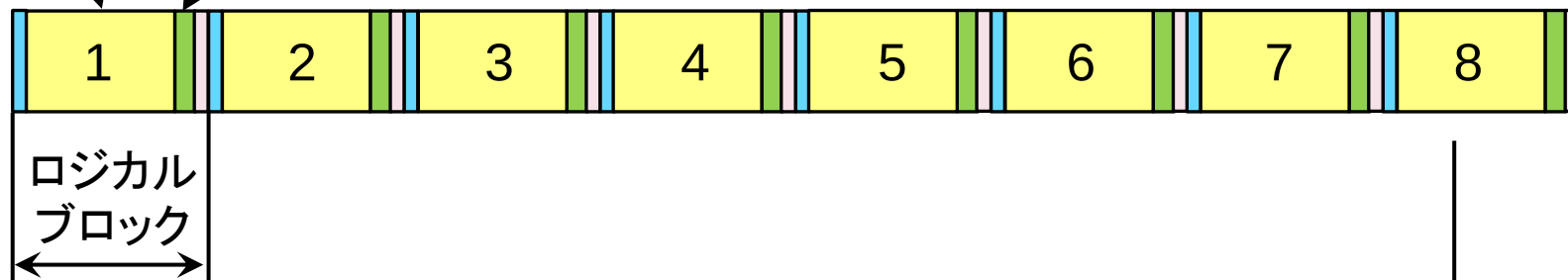
$\phi 694$ km

日本国土と等価な円

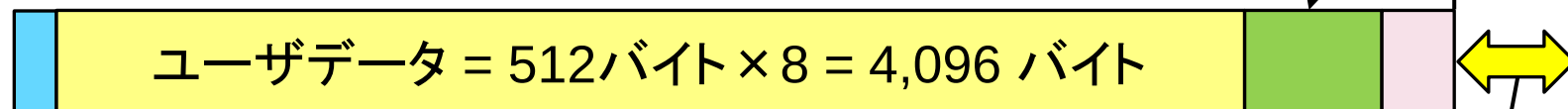
アドバンスト・フォーマットのレイアウト

512バイトの
ユーザデータ ECC
 (誤り訂正符号)

従来方式



4 kB アドバンスト・フォーマット



長いECC
(誤り訂正符号)

● ECC (Error Correction Code): 誤り訂正符号

フォーマット効率が上がり
ユーザデータが増える

■ セクターサイズを従来の512バイトから4,096バイトに拡張

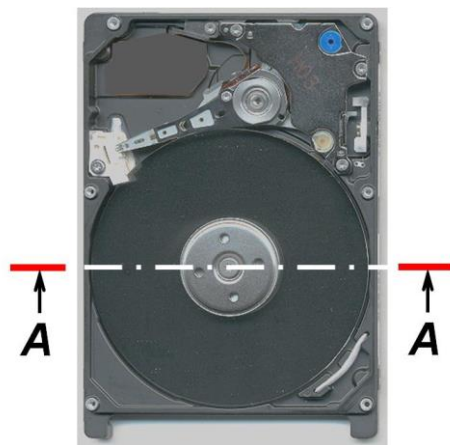
- ・記憶エリアを高い効率で使える
- ・記憶容量の増大
- ・高記録密度でのデータ信頼性を向上

滑り(流体)軸受を用いたスピンドルモータ

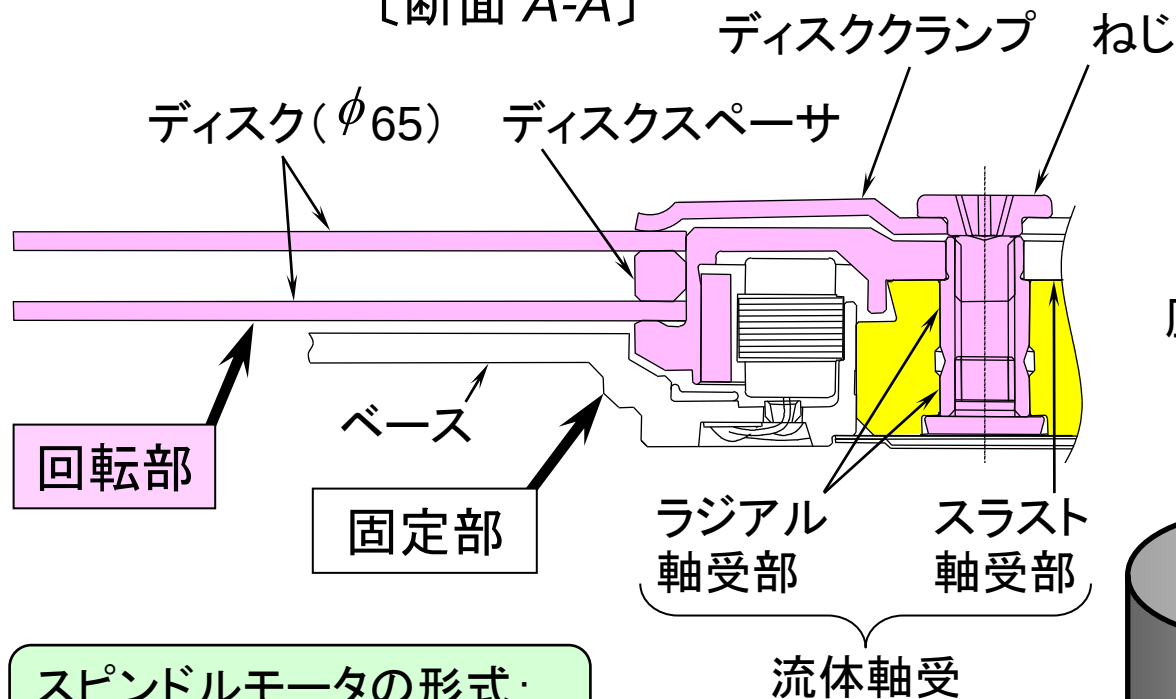
FDB: Fluid Dynamic Bearing (2.5型HDDの例)

特徴

- (1) 低騒音(静粛性)
- (2) 耐衝撃特性向上(面圧向上)

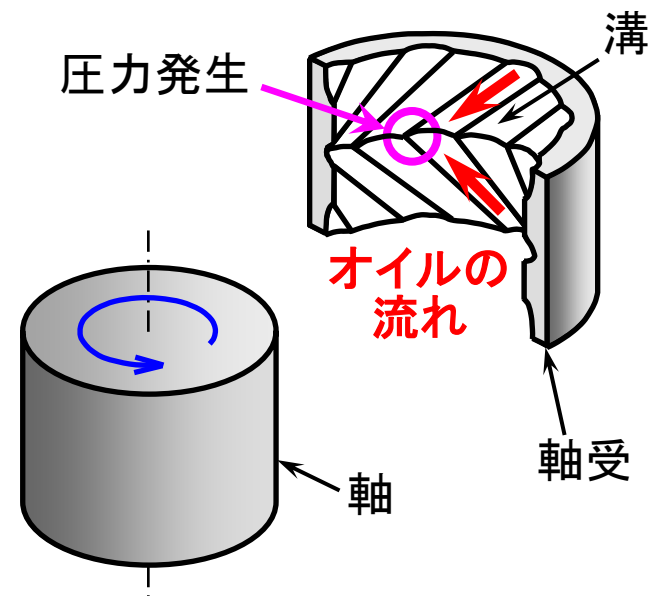


〔断面 A-A〕



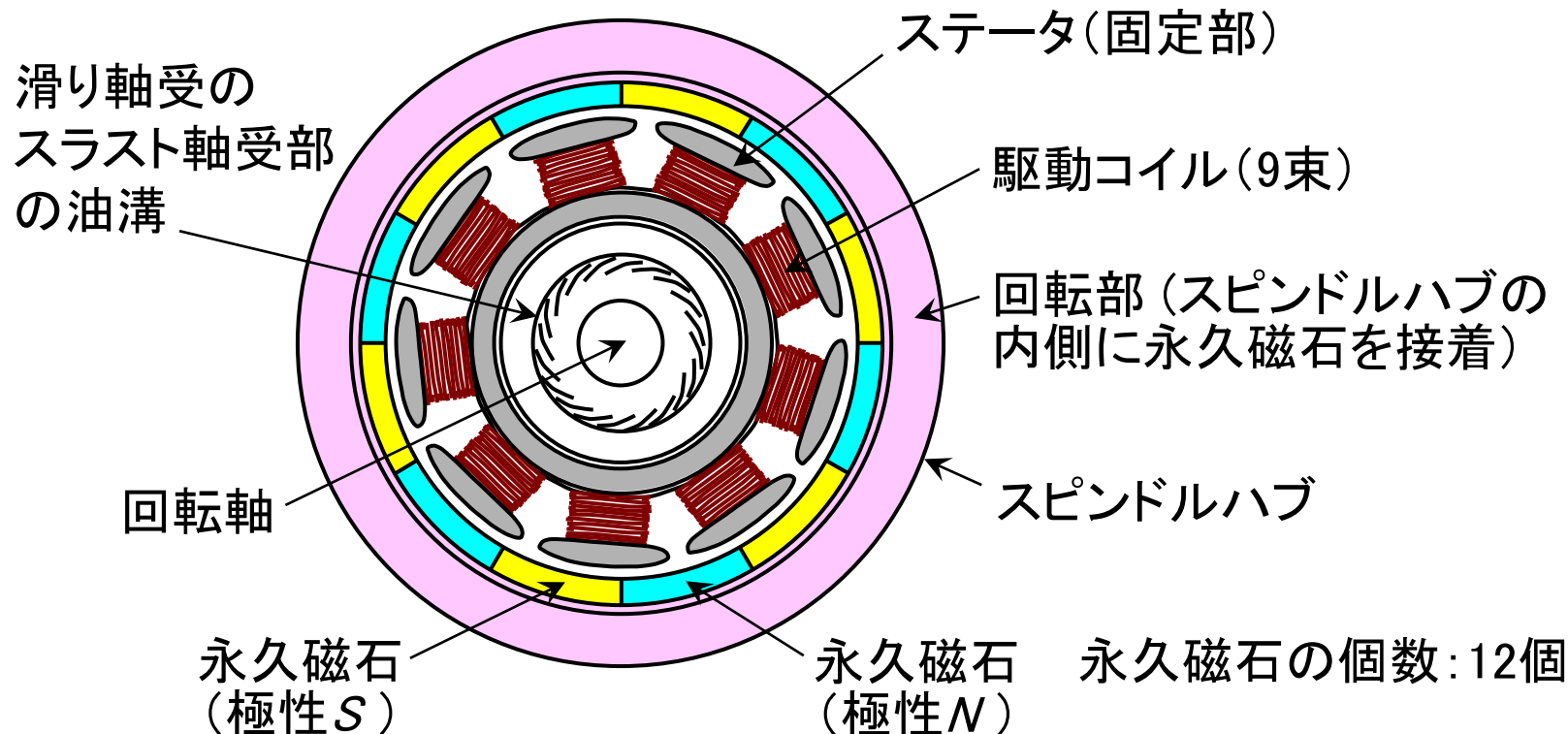
スピンドルモータの形式:
・ 3相、12極、9スロット、
DCブラシレスモータ

滑り軸受内部構造



スピンドルモータの内部構造図

2.5型HDDの例



永久磁石が発する磁界



相互作用



吸引力、反発力発生



可動部を回転駆動

駆動コイルへの
通電により生ずる磁界

スピンドルモータの形式:
3相、12極、9スロット、
DCブラシレスモータ

平均回転待ち時間 = ディスク半回転に要する時間

【5,400 rpmのHDDの例】

● rpm (revolution per minute): 毎分回転速度

毎分5,400回転だから、毎秒回転数は

$$\frac{5,400}{60\text{秒}} = 90 \text{ 回転}$$

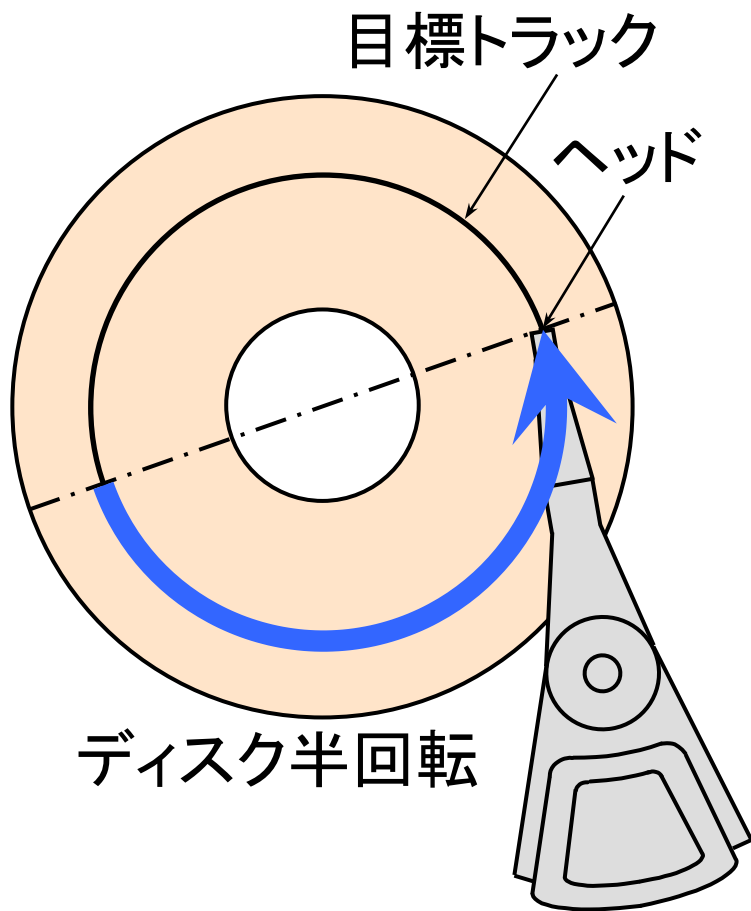
$$1\text{回転に要する時間は } \frac{1}{90} [\text{s}]$$

半回転に要する時間は、この半分

$$\frac{1}{2} \cdot \frac{1}{90} = \frac{1}{180} [\text{s}]$$

$$= 5.6 \times 10^{-3} [\text{s}]$$

$$= 5.6 [\text{ms}] \quad 1 \text{ ms} = \frac{1}{1000} \text{ 秒}$$



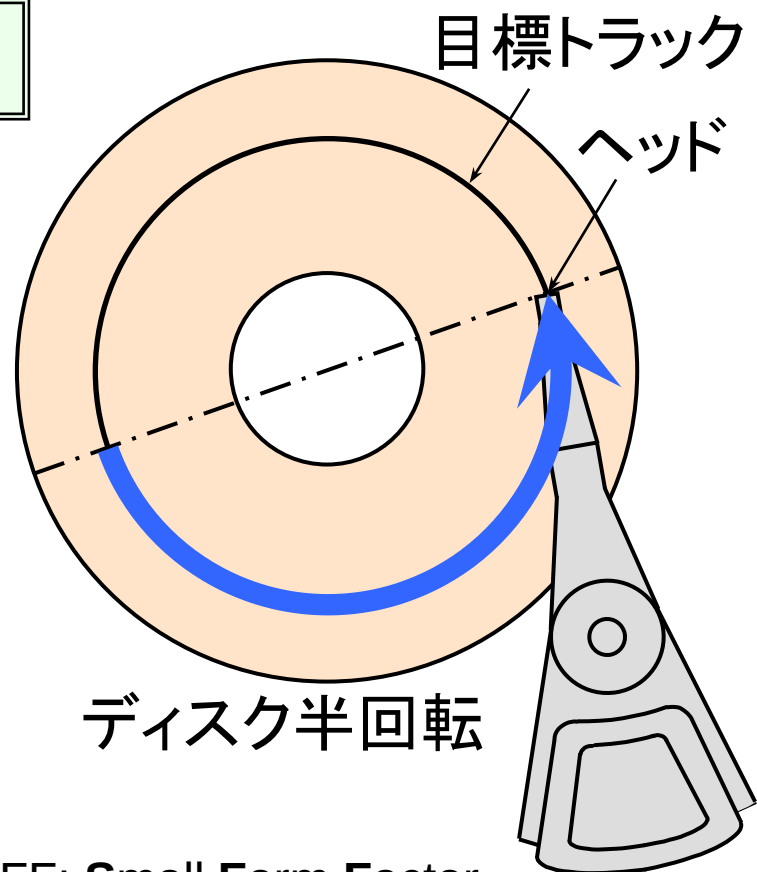
HDDのアクセス性能指標

50

平均回転待ち時間

= ディスク半回転に
要する時間

平均回転待ち時間



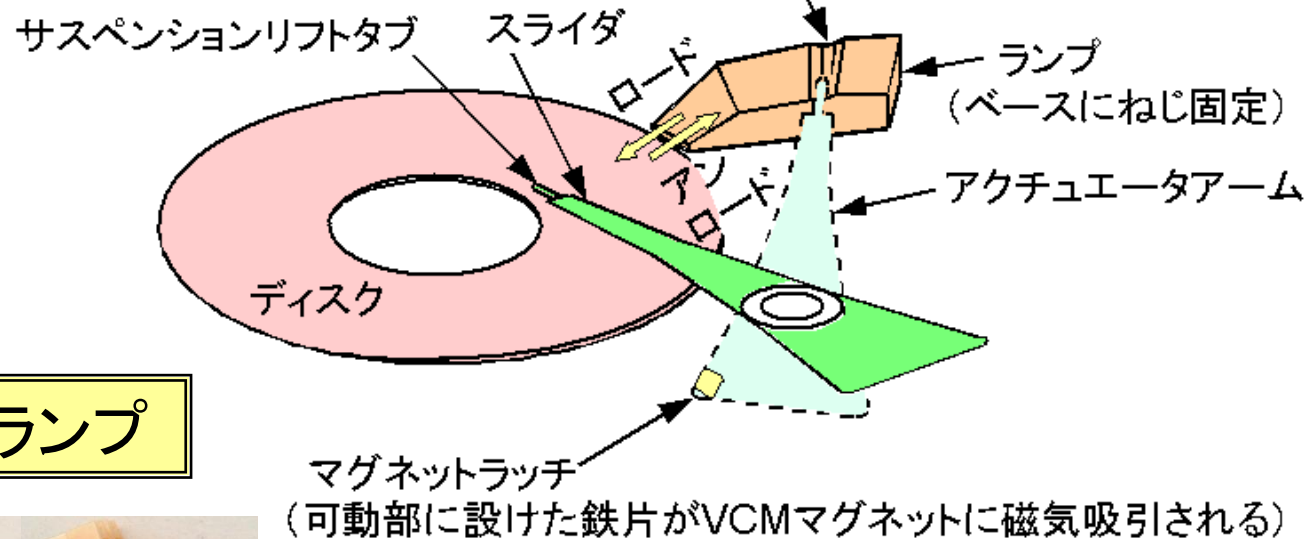
SFF: Small Form Factor

型名	1.8型	2.5型	3.5型	2.5型SFF	
回転速度 〔rpm〕	5,400	7,200	10,000	15,000	
平均回転待ち 時間〔ms〕	5.6	4.2	3.0	2.0	

(51)



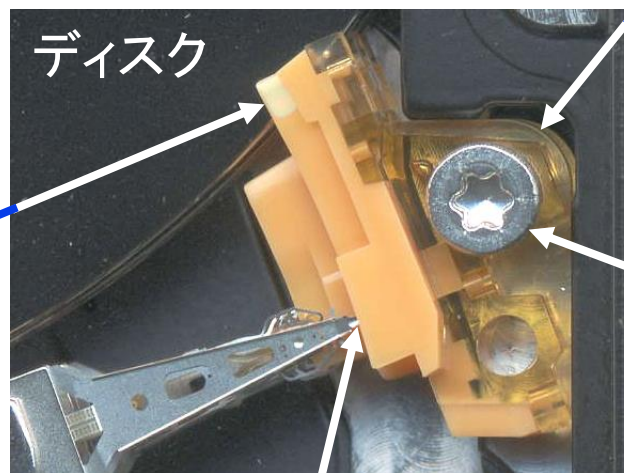
ランプ



マグネットラッチ
(可動部に設けた鉄片がVCMマグネットに磁気吸引される)

ねじ締結部

リフトタブによる 摺動部



締結ねじ

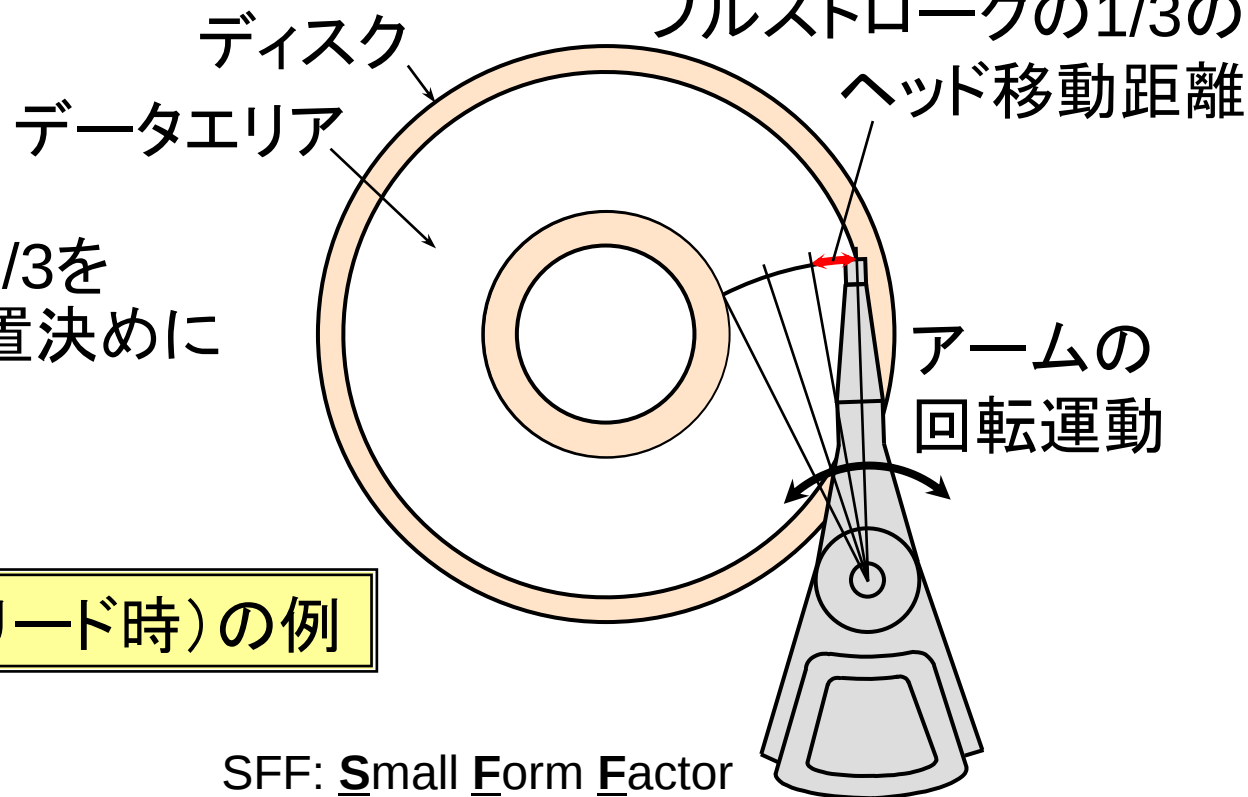
サスペンションリフトタブ

HDDのアクセス性能指標

52

平均シーク時間

= フルストロークの1/3を移動してヘッド位置決めに要する時間



平均シーク時間(リード時)の例

製造終了

型名	1.8型	2.5型		3.5型	2.5型SFF	
回転速度 〔rpm〕	5,400		7,200		10,000	15,000
平均シーク 時間〔ms〕	14	12	10	7.7	4.6	3.0

ヘッド位置決め機構

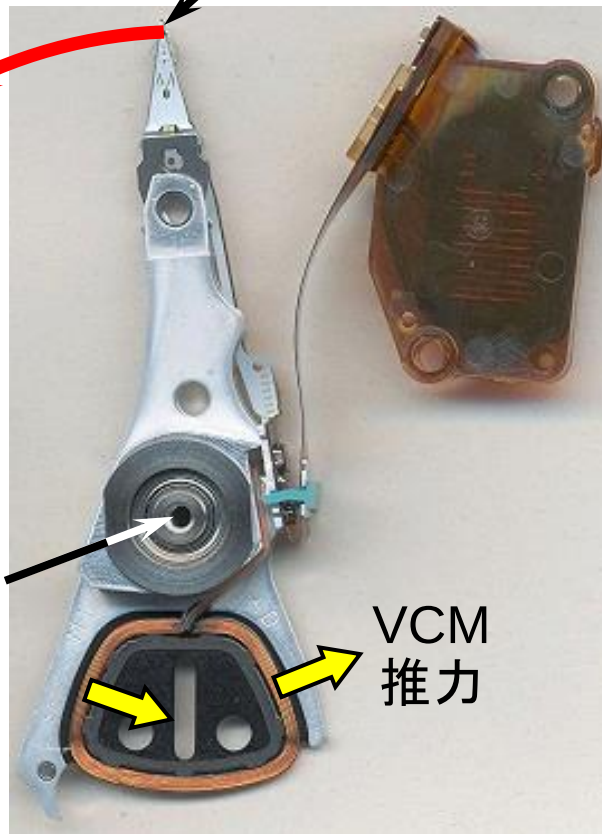


2.5型HDDの例

ヘッド
ヘッド
回転運動

ピボット軸
(回転中心)

VCM
推力



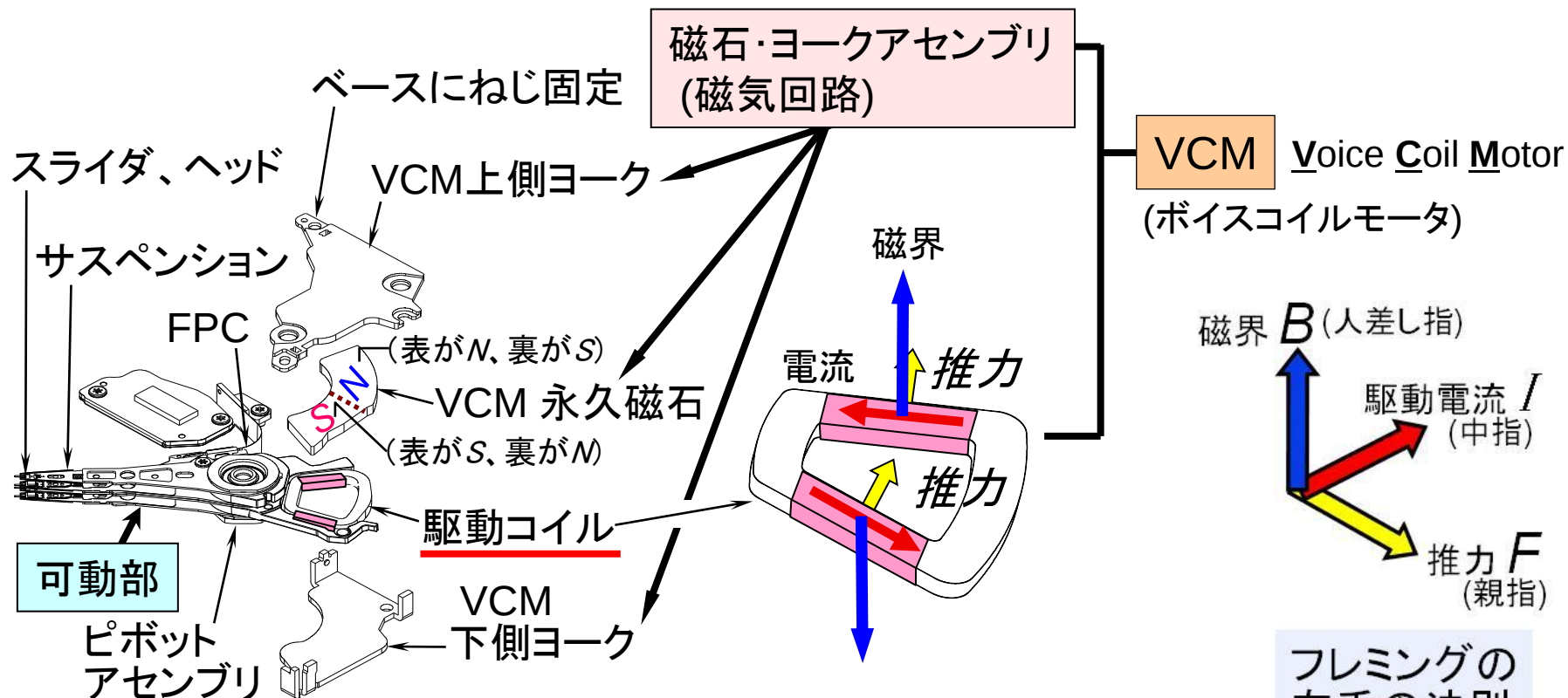
ナット
締付
ベースに、ねじで締結
ピボットアセンブリ

ヘッド位置決め機構

(2.5型HDDの例)

アームを揺動運動させるアクチュエータ
(ボイスコイルモータ〔VCM〕)の構造

54



FPC:
Flexible Printed Circuit
(プリント基板アセンブリ)

磁界作用を受けた駆動コイルに
電流を流すと、推力を発生する。

フレミングの
左手の法則

推力 $F = B_g \cdot l_e \cdot I$

B_g : ギャップ磁束密度

l_e : 有効コイル長

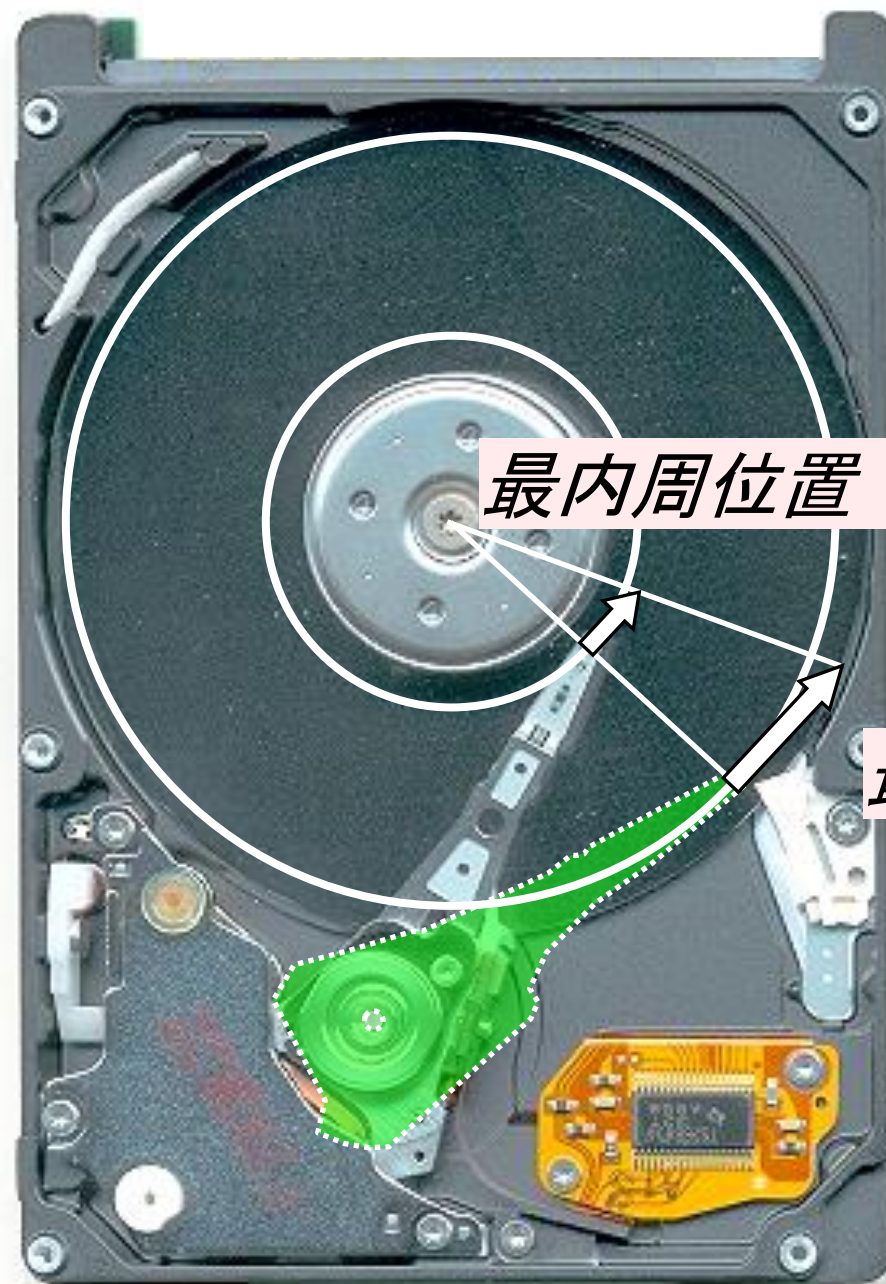
I : 駆動電流

周速度

2.5型HDDの例

回転速度
5,400 rpm
(毎分回転速度)

ディスク外径
65 mm



最内周位置

8 m/s
(毎秒8 m)
(時速30 km)
原付バイクの速度

最外周位置

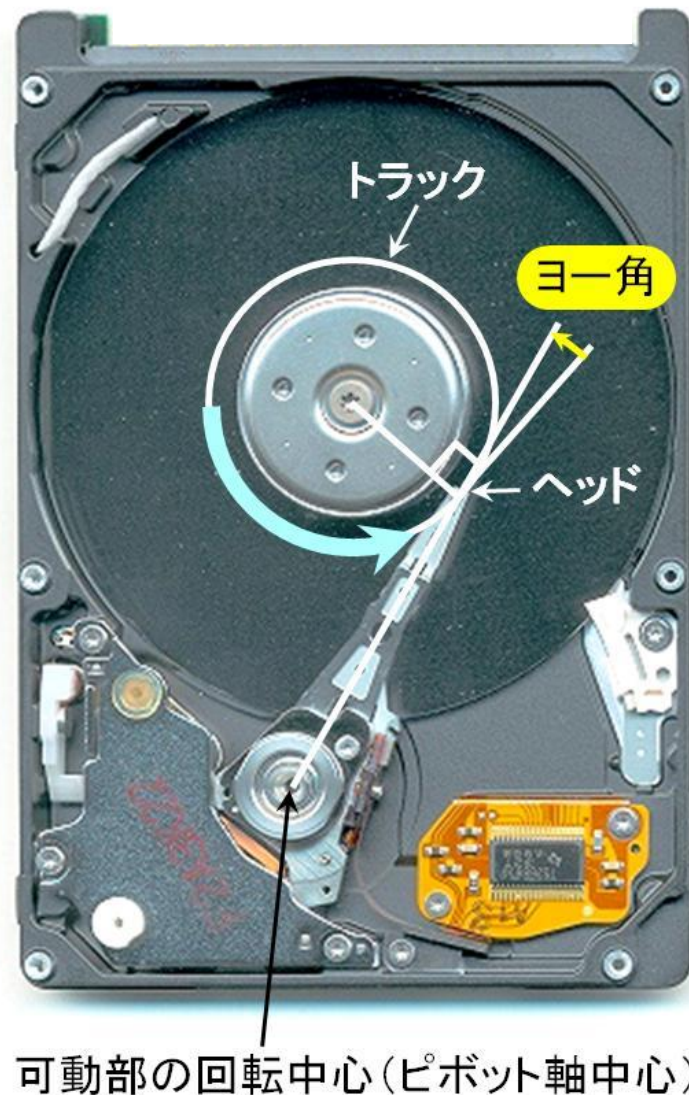
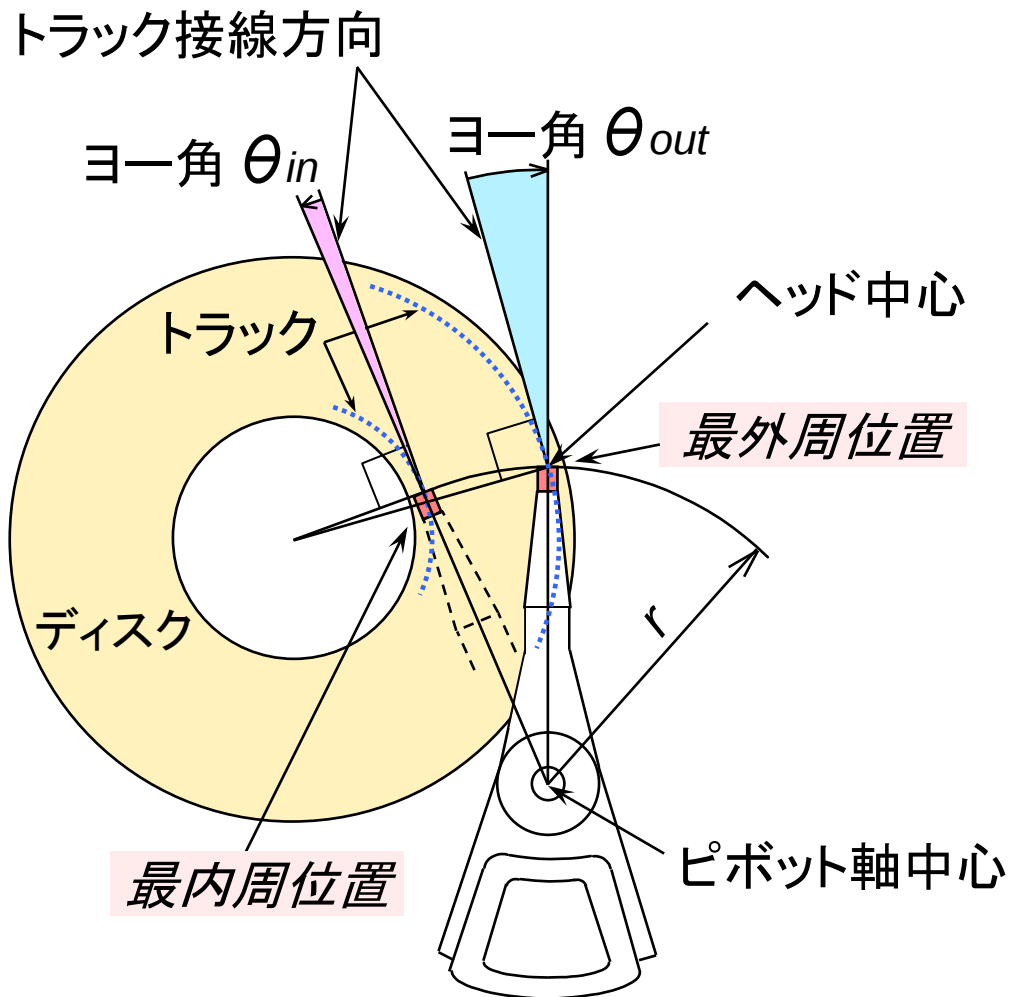
17 m/s
(毎秒17 m)
(時速60 km)
乗用車の速度

スライダのヨー角

ヘッド中心とピボット軸中心の延長線とトラック接線方向とのなす角度。

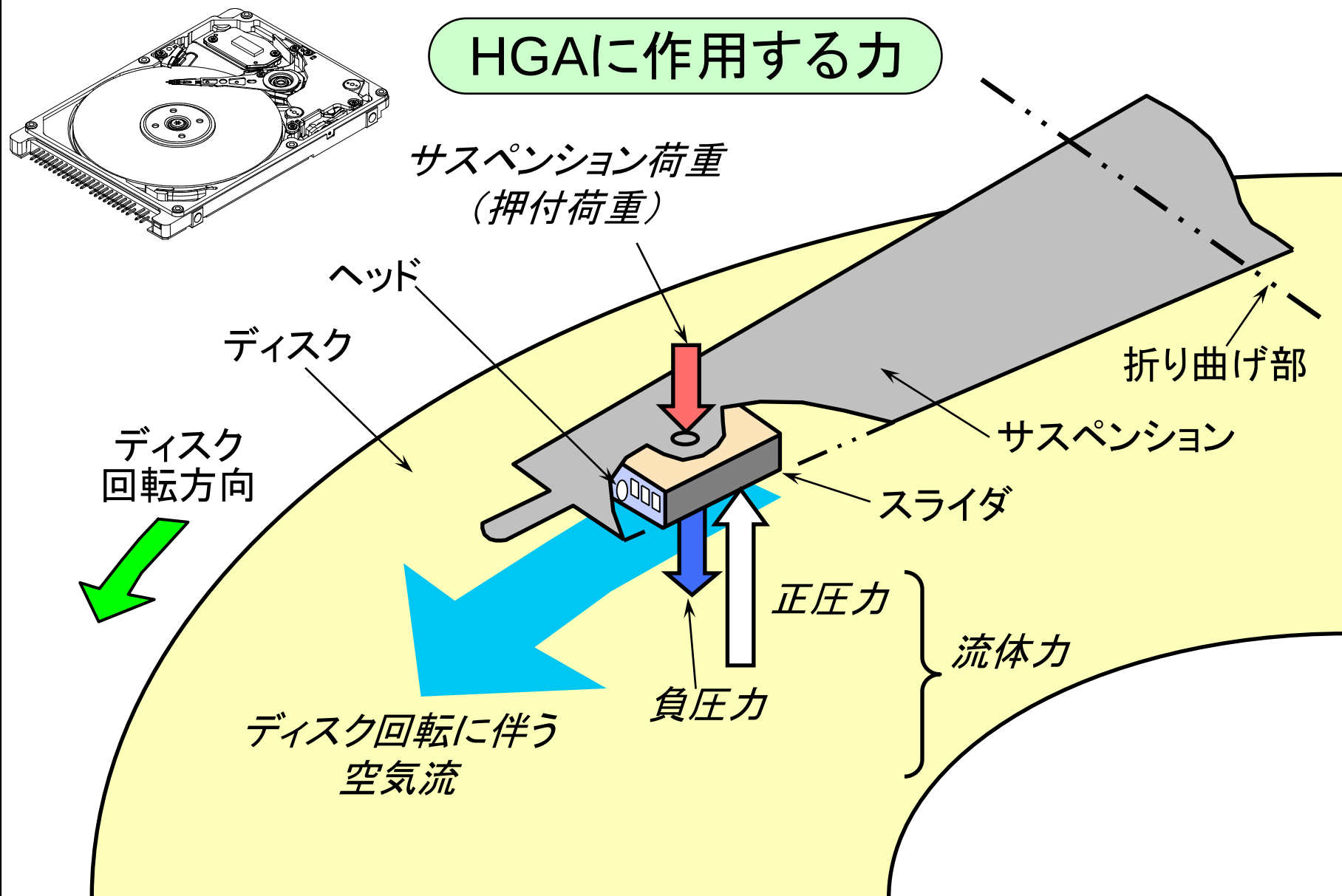
56

ヘッド位置(内周位置, 外周位置)により、ヨー角が変化する。



HGA(ヘッド・ジンバル・アセンブリ)

HGAに作用する力

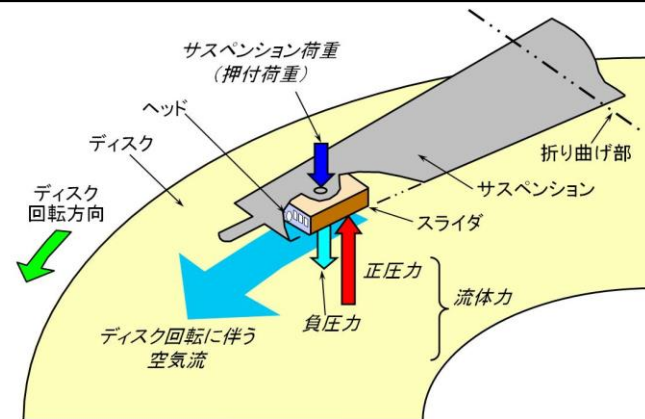
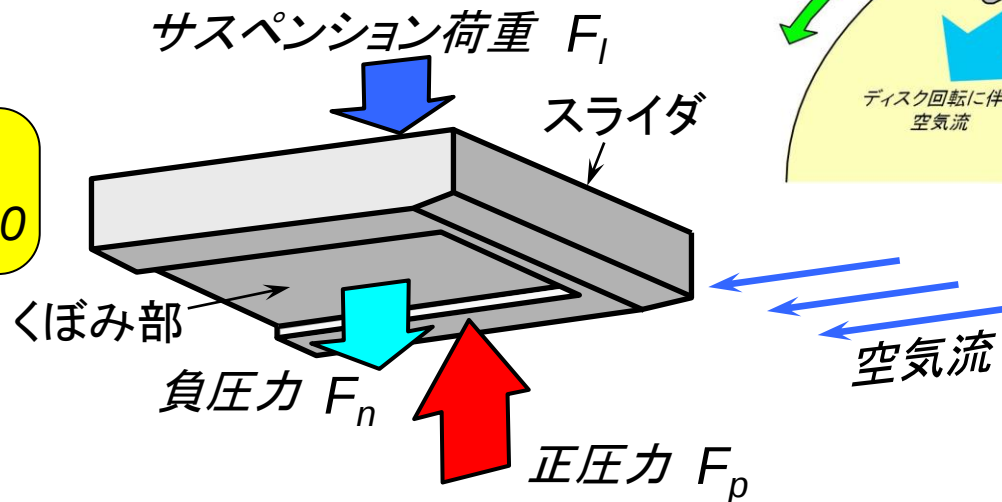


浮上力の発生原理

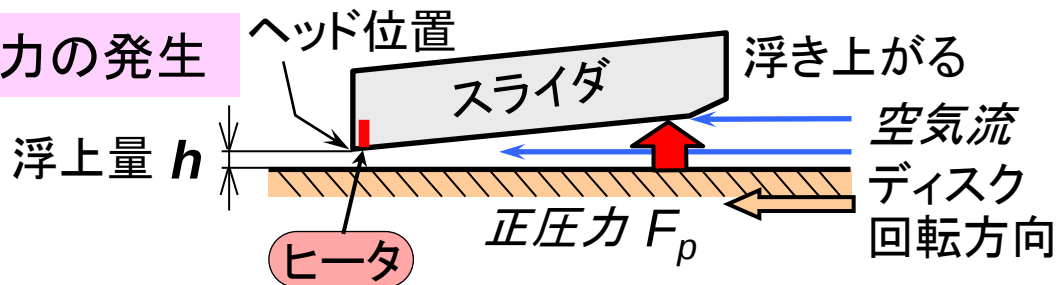
58

力の釣り合い

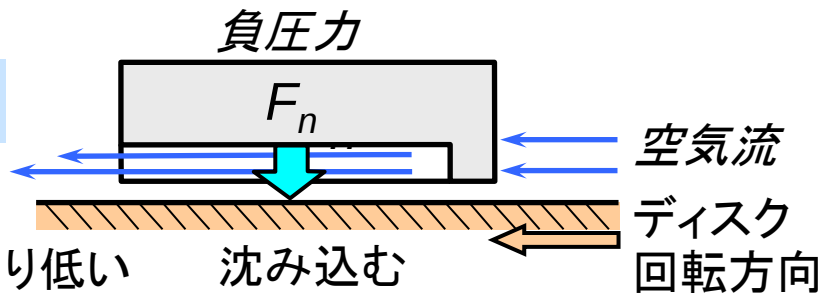
$$F_l + F_p + F_n = 0$$



正圧力の発生



負圧力の発生



スライダ熱膨張による浮上量制御実施

記録・再生時にヒータでヘッド近傍を熱膨張させ浮上量を制御している。

スライド ⑦9

略語集参照

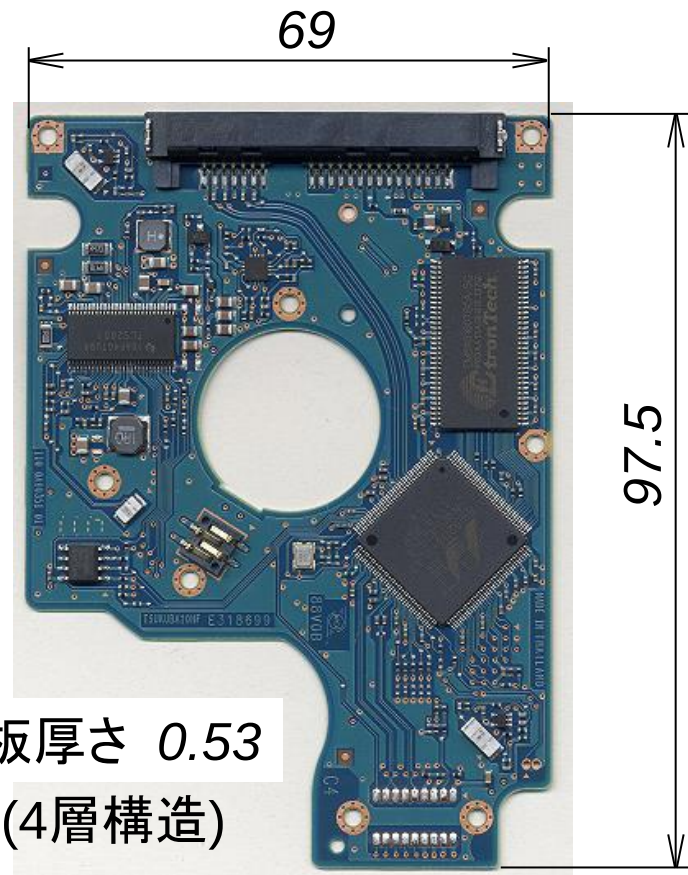
- ・DFH
- ・TFC

プリント基板アセンブリ(電子回路) PCBA (Printed Circuit Board Assembly)の例

2.5型HDDの例



HDD裏面



基板厚さ 0.53
(4層構造)

ベース側

PCBAの構成要素

2.5型の例

- ・ 7 mm厚、ディスク1枚
- ・ 500 GB、5,400 rpm

60

コンボドライバ

- ・ スイッチングレギュレータ
(5 V → 0.94 V に変換)
- ・ リニアレギュレータ
(5 V → 2.5 V に変換)

回転振動センサ

幅 69 mm

DDR1-SDRAM

64 Mbit、200MHz

Double-Data-Rate
Synchronous
Dynamic Random
Access Memory

衝撃センサ

フラッシュメモリ
4 Mbit

モータコネクタ

(スピンドルモータ)

水晶発振子

ベース側 AEコネクタとの圧着部

・HDC (Hard Disk Controller)

(インターフェースの処理、
データ転送とコマンドの
やり取り、信号処理をする)

・ 32ビットマイコン

・ バッファメモリ
コントローラ

回転振動センサ

基板 (97.5 × 69) (4層構造)

データ転送速度
(媒体記録再生時)

最大 1 Gb/s



HDD

データ転送(2.5型の例)

インターフェース転送速度

SATA 6 Gb/s

伝送線路

フラッシュ
メモリ
8 MB

(データバッファ容量)

メモリ

(データレジスタ)

ホスト

● SATA: Serial ATA

● 1 Gb/s = 1 Giga bits per second

ディスク

データ

最大 1 Gb/s

時間 t

SATAインターフェース
ケーブル上

時間 t

6 Gb/s

6 Gb/s

6 Gb/s

データを読むタイミングと
送るタイミングがずれる

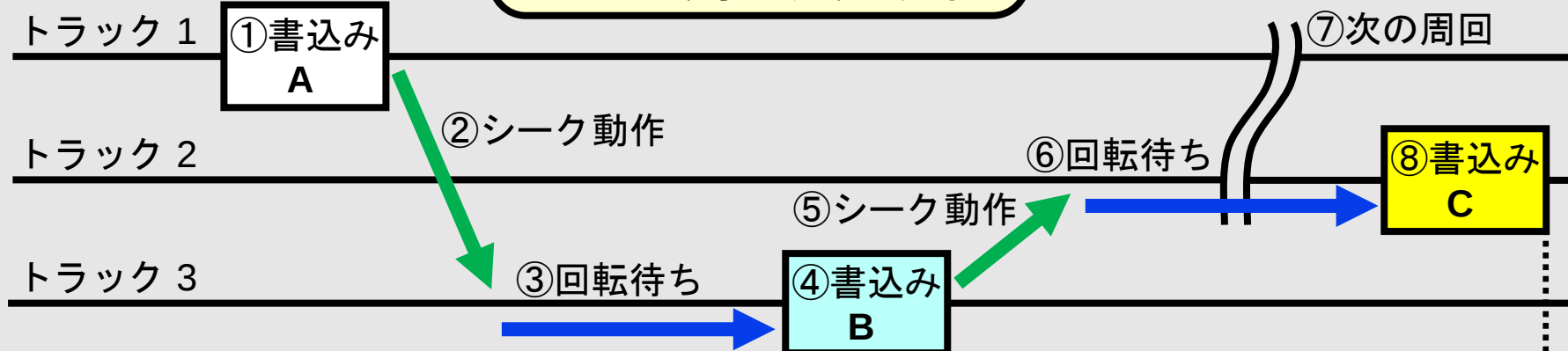
キャッシュで吸収

小さいファイルを
まとめてキャッシュ
に送る

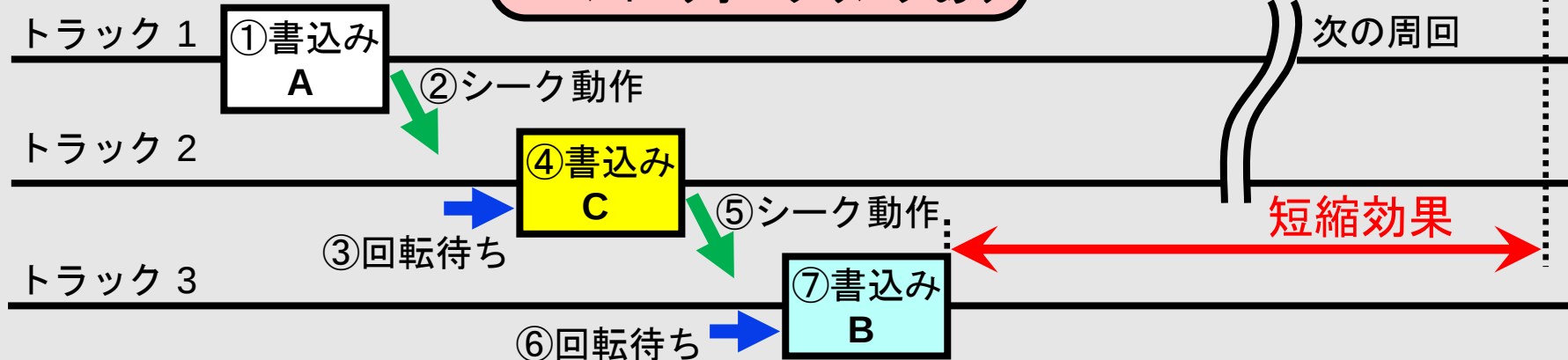
- 「データバッファ」はHDD に内蔵されているメモリで、一時的にデータを保持する。「キャッシュ」ともいう。
- HDDの媒体記録再生時のデータ転送速度は、インターフェース転送速度よりも遅い。小さいファイルをまとめてキャッシュに送る。データを読むタイミングと送るタイミングがずれる。これをキャッシュで吸収する。

書込み順序の入れ替えによる処理時間の短縮

コマンド・リオーダーリングなし



コマンド・リオーダーリングあり



■ 複数個のセクタを処理する場合、

1. 複数命令をHDD内に登録する(コマンド・キューイング)。
2. HDDが判断し、処理時間が短くなるように命令実行順序を変更する(順序を変更しても問題が無い命令のみ)。

装置性能にメリハリを付けた3.5型の例

65

デスクトップ用

厚さ
26

$\phi 95$

146

102

エンタープライズ用

(サーバ用)

$\phi 70$

146

102

3 TB

1/5

0.6 TB (容量犠牲)

7,200 rpm

2倍

15,000 rpm (高速回転)
(高速データ転送)

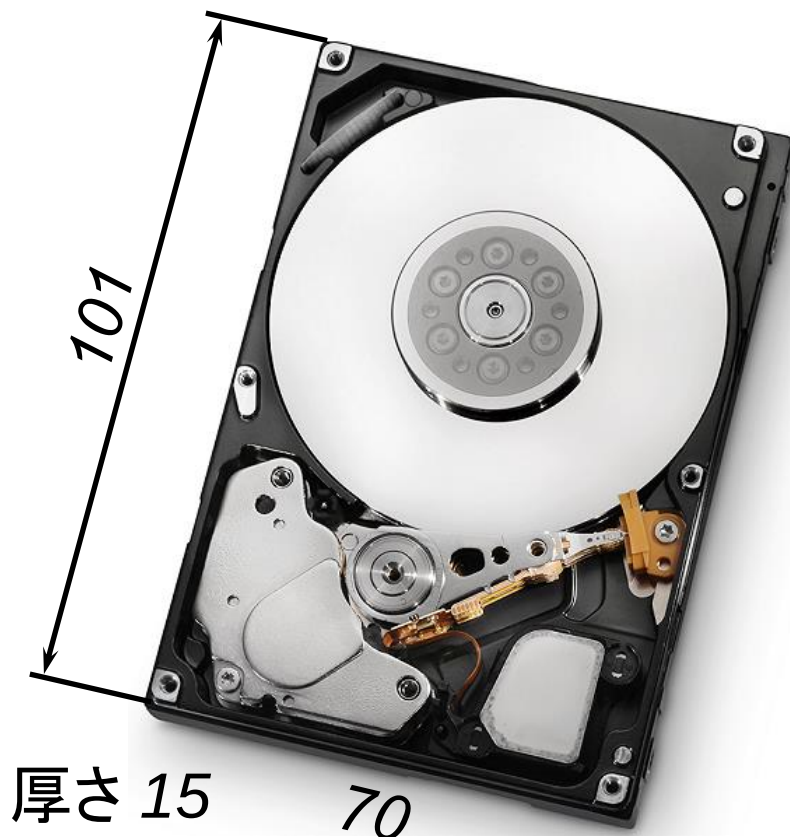
さらなる小型化へ

2.5型 SFF (Small Form Factor)

(エンタープライズ用)

～ 2.4 TB

重量: 230 グラム



10,000 rpm



15,000 rpm

風乱対応技術

デスクトップ用3.5型HDDの例

- ・ディスク5枚
- ・7,200 rpm



- ・エアスポイラにより低速流域ができ、アーム、スライダに当たる空気流が弱まる。
- ・これらが振動しにくくなり、ヘッドの位置決め性能が向上する。

風乱対応技術および高精度ヘッド位置決め技術

デスクトップ用3.5型HDDの例

- ・ディスク5枚
- ・3 TB
- ・7,200 rpm

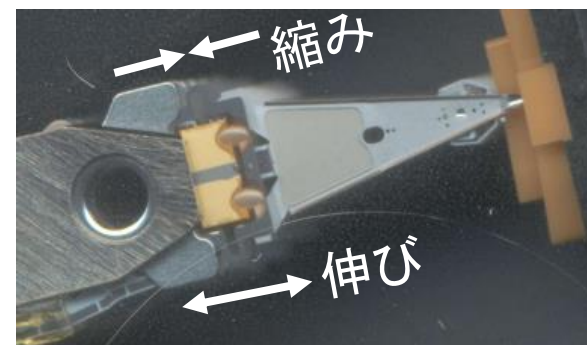


エアスポイラ

流体加振の緩和

2段アクチュエータ

ピエゾ圧電素子^{*}(PZT)を用いた
高精度ヘッド位置決め



^{*}PZT: チタン酸ジルコン酸鉛

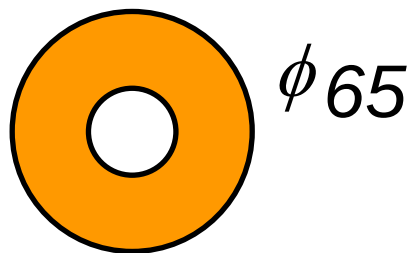
- ・ さらに、スライダも微小運動させる
3段アクチュエータも製品化されている。

3. 技術動向と今後の展開

面記録密度 3 Tb/inch² (3,000 Gb/inch²)
達成時の記憶容量 T: Tera = 10¹² (1兆)

現在の面記録密度と比較して

約3倍になると



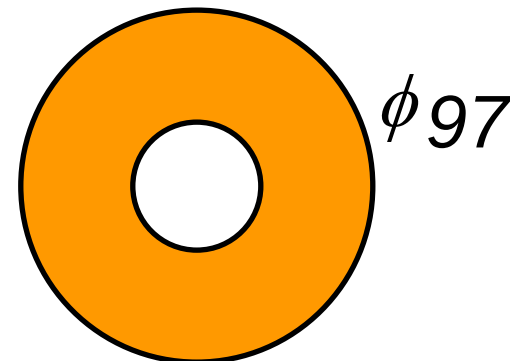
2.5型 (2枚)

3 TB/枚 → ~ 6 TB/台

厚さ7×幅70×長さ100

装置寸法 (単位: mm)

約2.7倍になると



3.5型 (9枚)

6 TB/枚 → ~ 54 TB/台

厚さ26×幅102×長さ147

記憶容量の今後の予想

■ 2.5型HDD

円板枚数	装置厚さ〔mm〕	記憶容量〔TB〕
1	7	3
2	7	6
3	9.5	9
4	15	12
5	15	15

■ 3.5型HDD

円板枚数	装置厚さ〔mm〕	記憶容量〔TB〕
5	26.1	30
6		36
7		42
8		48
9		54

1. シングル・ライト方式(瓦記録)〔SMR〕

トラックを重ね書きする方式

● Shingle: 屋根板

2. 2次元記録〔TDMR〕

通常は1トラックごとに記録された情報を読み取るのに対し、隣接する複数トラックを一度に読み取り、2次元的に処理する方式

3. エネルギー・アシスト記録

(1) 熱アシスト記録〔HAMR, TAMR〕

ディスク表面にレーザ光を照射して加熱し、記録媒体の保磁力を一時的に小さくし、磁化反転しやすい状態にしておいて磁気ヘッドでデータを書き込む方式

(2) マイクロ波アシスト記録〔MAMR〕

記録媒体の磁化を磁気共鳴にて反転させることによって磁気情報を記録する方式

4. ビット・パターン・メディア

ディスク上に円筒状の背の低い島を形成し、ひとつの島に1ビットを割り当てる方式

高密度磁気記録における困難な点：三重苦(トリレンマ)

■記録密度を高めたい！

ひとつのビットセル内の結晶粒の数は同じとし、
スケーリング則で全体的に磁石の結晶粒を小さくする



結晶粒の体積が減少するため、結晶粒の持つ
磁気異方性エネルギーが減少



熱揺らぎの発生、磁化情報の消失

【対策】異方性定数の高い媒体の採用

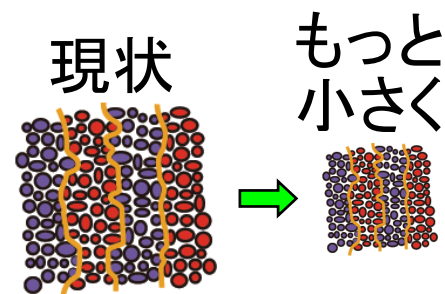


書きにくくなる



ヘッドの記録磁界向上必須

- ・トラック幅の微細化の限界
- ・飽和磁束密度の高い材料の材料的限界
- ・磁気的スペーシングの限界



● 磁気異方性：

磁性体において、磁性体のある特定の結晶軸方向に磁化しやすい磁気的な性質のこと。

● 熱揺らぎ：

磁性粒子が小さくなると、外部の熱エネルギーの影響を受け、磁性軸を一方向に保つことができなくなる現象のこと。磁化の方向がバラバラになり、記録磁化を安定に保てなくなる懸念がある。

1. 高密度記録

2. 異方性定数の高い媒体

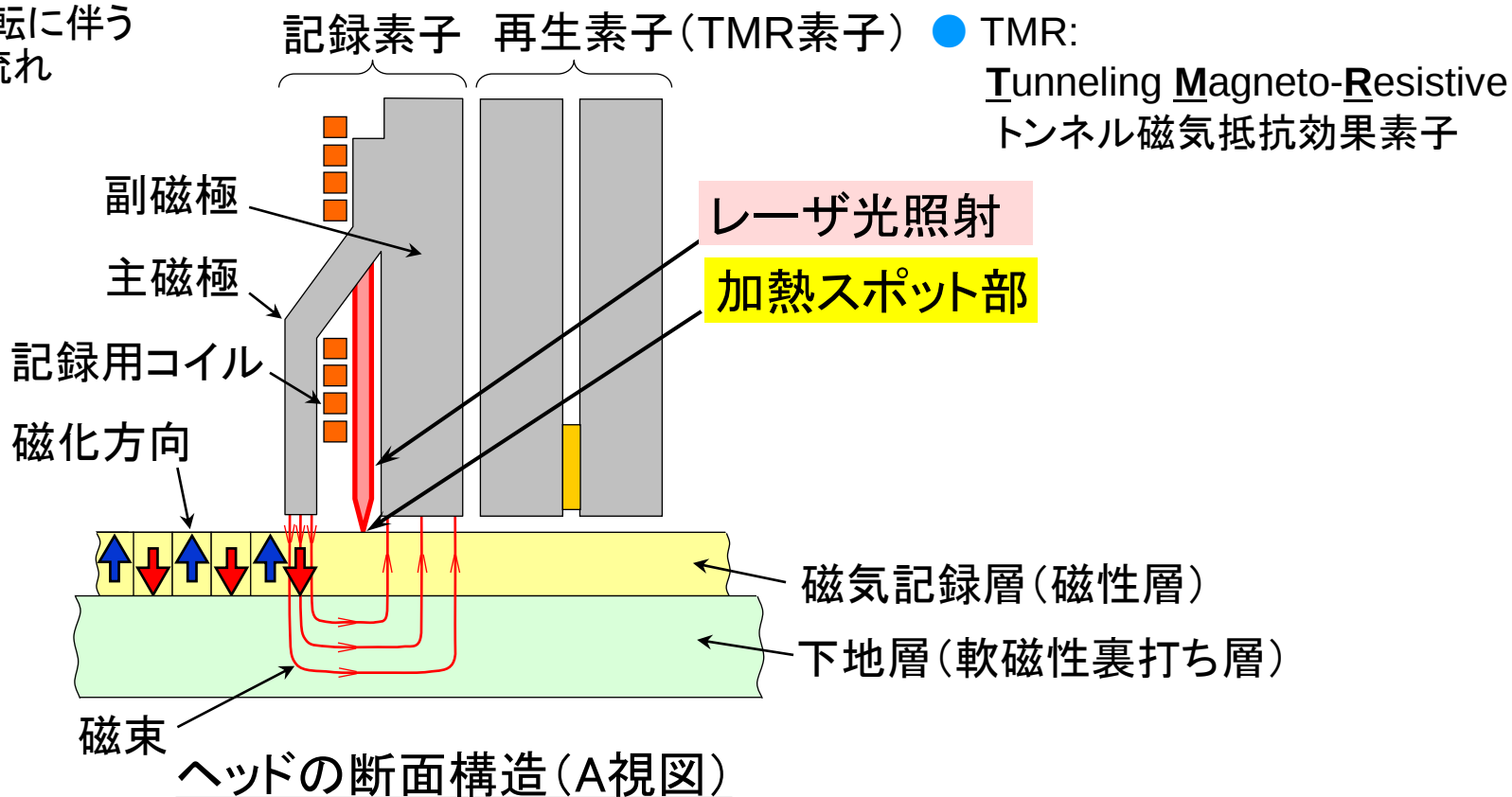
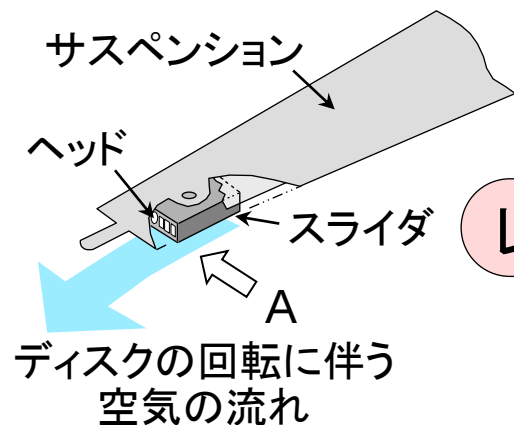
3. ヘッド磁界不足



三重苦(トリレンマ)を克服しなければならない。

エネルギー・アシスト記録

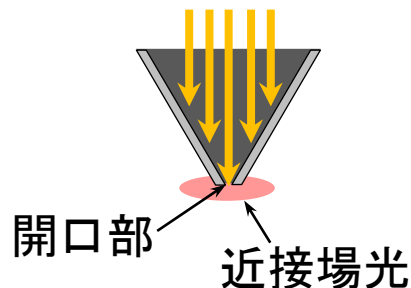
レーザの近接場光を利用した熱アシスト記録の例



マイクロ波アシスト記録方式も開発されている

- 近接場光による加熱で記録層の保磁力を瞬間的に弱めて記録ヘッドで磁気記録する。
- 近接場光による加熱と記録ヘッドによる書き込みを高速で繰り返す。

レーザ光

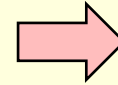


加熱スポット部拡大図

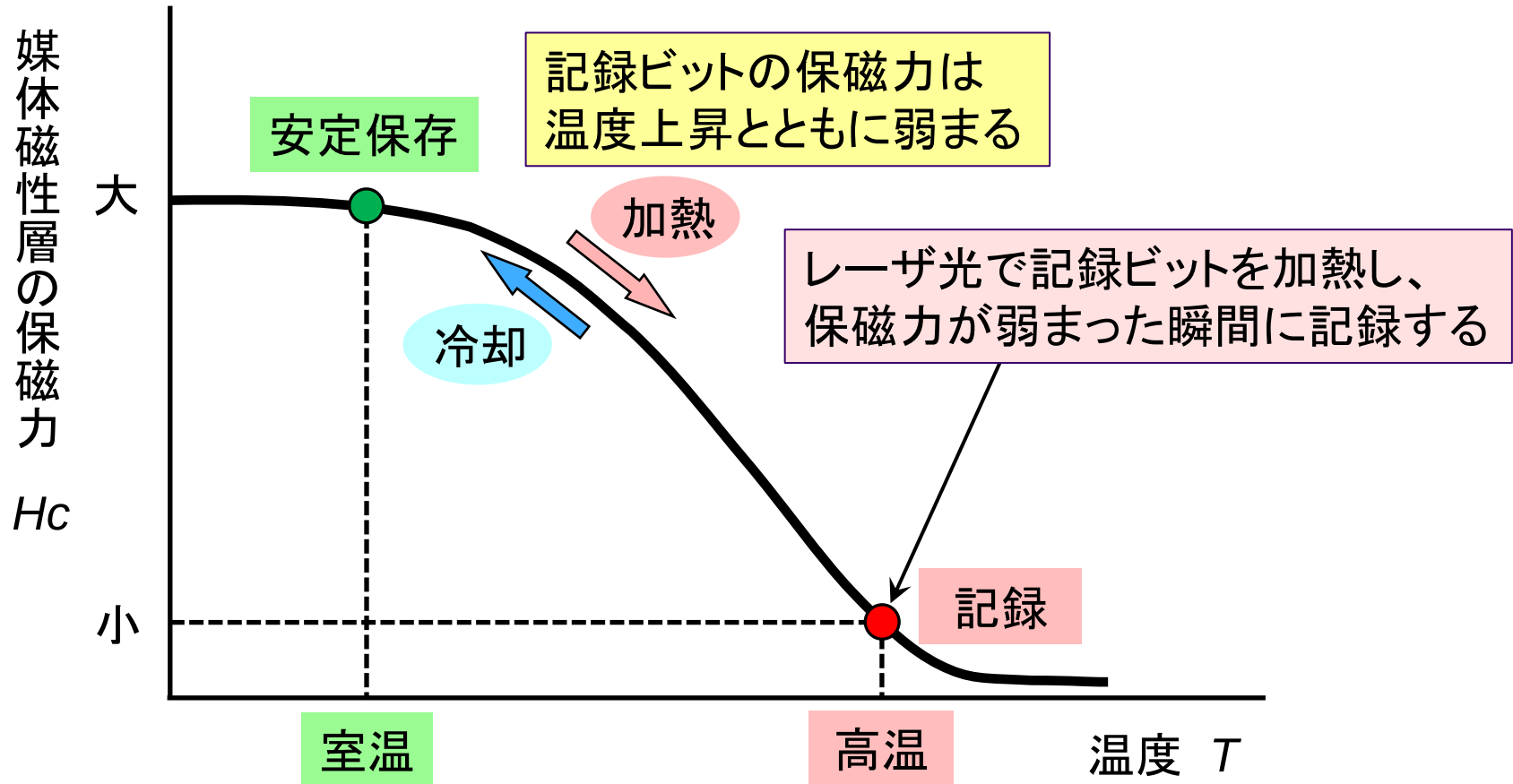
【近接場光】

レーザ光開口部を波長以下に小さくすると、レーザ光は外へ飛び出さず、開口部にまとわりつくような微細スポット(幅50 nm程度)となる。開口部サイズや形状を工夫する。

磁石結晶粒の
熱安定性確保のため
媒体保磁力を大きくしたい

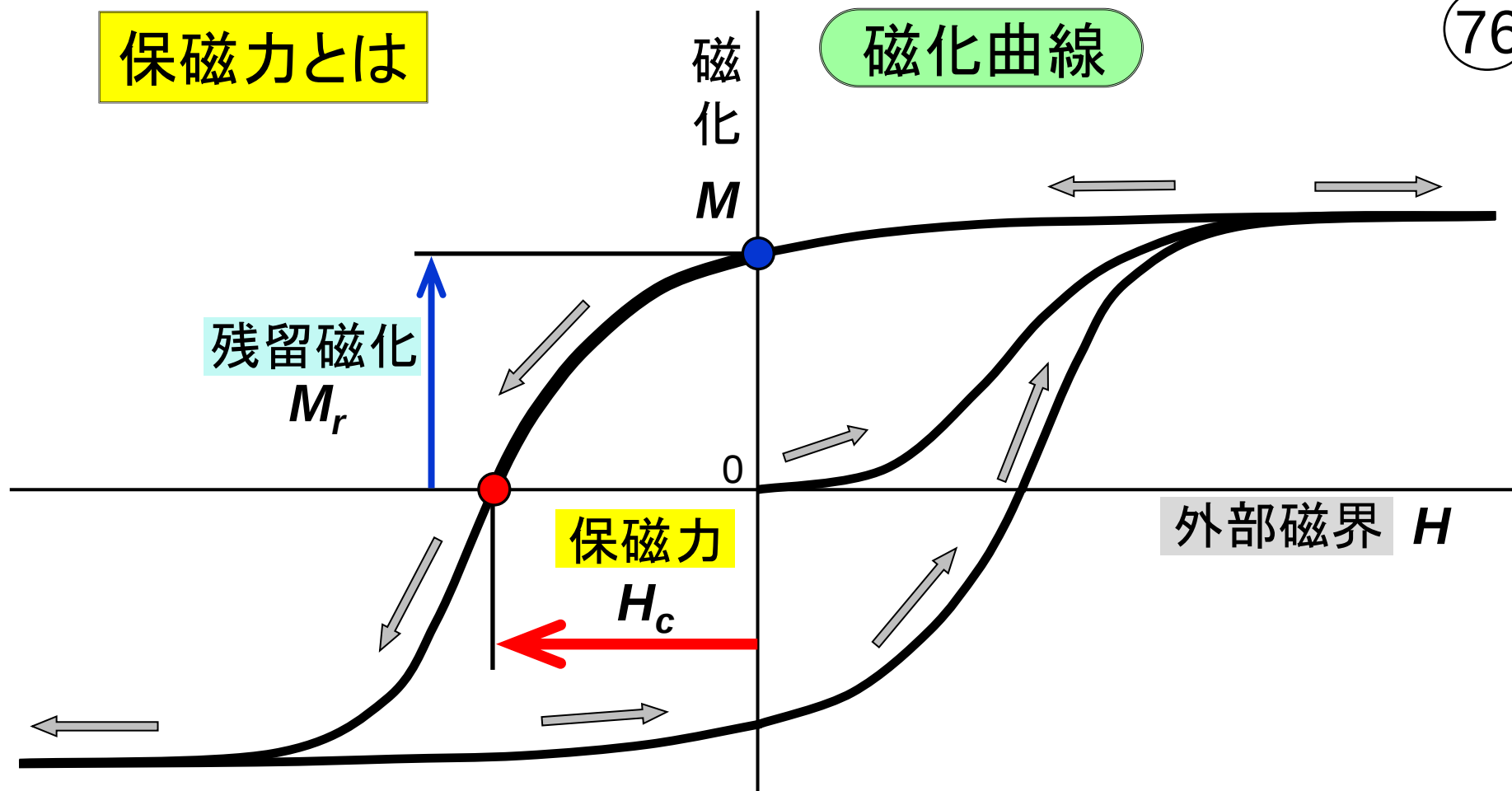


記録ヘッドの
書き込み能力が
不足する



保磁力とは

磁化曲線

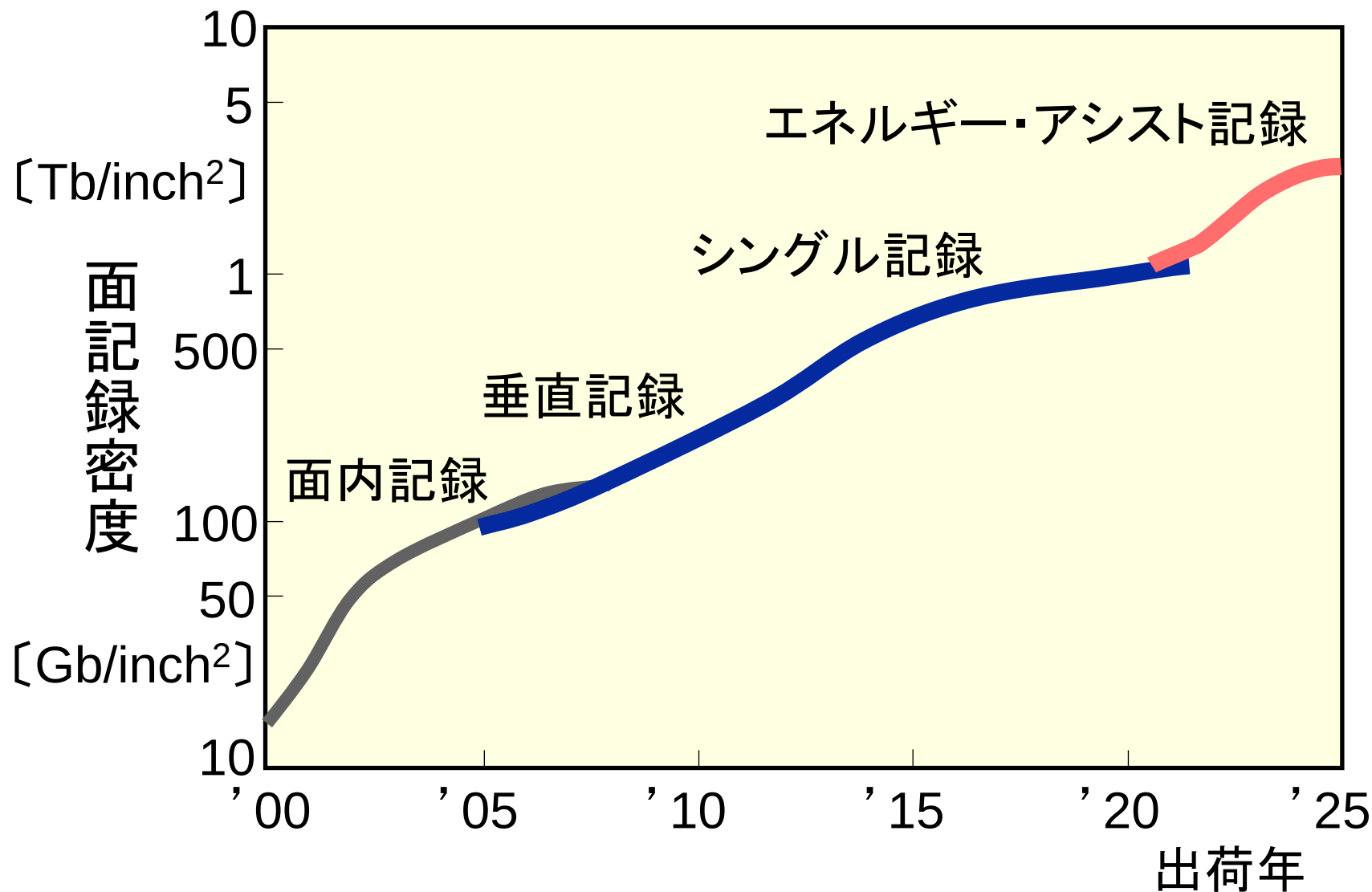


保磁力 (スライド③⑦参照):

磁化された磁性体を磁化されていない状態に戻すために必要な反対向きの外部磁界の強さ。

逆向きの磁界をかけ、残留磁化がゼロになった時の外部磁界の強さ。

今後の面記録密度の推移予想



1. HDDの正しい取り扱い方法を実践しよう。
2. 記録密度の向上は、①小型、②大容量、③低コストという要求性能を同時に満たすことができる。
3. 記憶容量を増やすために、ヘッド、媒体の高密度実装が行われている。
 - ・ 従来と同じ装置厚さで、ヘッド、媒体をもう1セット実装
4. 装置性能を高めるための技術が導入されている。
 - ・ スライダ熱膨張による浮上量制御
 - ・ 2段(3段)アクチュエータによる高精度ヘッド位置決め
 - ・ ヘリウムガス充填ドライブによるヘッド、媒体の高密度実装、低発熱、静音化、省電力化
 - ・ 瓦記録(シングル・ライト)による高密度化
5. 記録密度を高めるために、エネルギー・アシスト記録(熱アシストおよびマイクロ波アシスト)の技術開発が進められている。

ABS (Air Bearing Surface): 浮上面
ATA (Advanced Technology Attachment):
 PC・HDD接続インターフェース
bpi (bits per inch): 線記録密度
BPM (Bit Patterned Media)
CSS (Contact Start Stop): コンタクト・スタート・ストップ
DFH (Dynamic Flying-height Control):
 熱膨張によるスライダ浮上量制御
DSA (Dual Stage Actuator): 2段アクチュエータ
ECC (Error Correction Code): 誤り訂正符号
ECC Media (Exchange-Coupled Composite) Media
ESD (Electro-Static Discharge): 静電放電
EMC (Electro-Magnetic Compatibility): 電磁環境適合性
FDB (Fluid Dynamic Bearing): 滑り(流体)軸受
FPC (Flexible Printed Circuit): 可撓性プリント基板
GMR Head (Giant Magneto-Resistive Head): GMRヘッド
GND (Ground)
HAMR (Heat Assisted Magnetic Recording):
 熱アシスト磁気記録
HDA (Head Disk Assembly): ヘッド・ディスク・アセンブリ
HDD (Hard Disk Drive): ハードディスクドライブ
HDI (Head Disk Interface): ヘッド・ディスク・インターフェース
HGA (Head-Gimbals Assembly): ヘッド・ジンバル・アセンブリ
IDE (Integrated Device Electronics)
IDEMA (International Disk Drive Equipment &
 Materials Association)
IOPS (Input/Output Per Second)
iVDR (Information Versatile Disk for Removable usage)
LBA (Logical Block Addressing)
L/UL (Load/Unload): ロード・アンロード
MAMR (Microwave-Assisted Magnetic Recording):
 マイクロ波アシスト磁気記録
MTBF (Mean Time Between Failure): 平均故障間隔

NRRO (Non-Repeatable Runout): 非同期振動、非再現性振動
PCBA (Printed Circuit Board Assembly): プリント基板アセンブリ
PES (Position Error Signal): 位置誤差信号(ポジションエラー信号)
PMR (Perpendicular Magnetic Recording): 垂直磁気記録
POH (Power On Hours): 通電時間
PRML (Partial Response/Maximum Likelihood)
RoHS (Restriction of Hazardous Substances):
 電気・電子機器に含まれる特定有害物質の使用制限に
 関する欧州議会及び理事会指令
rpm (revolution per minute): 毎分回転速度
RRO (Repeatable Runout): 同期振動
SAS (Serial Attached SCSI):
 SCSIストレージ転送方式にシリアル転送を採用したストレージ標準規格
SATA (Serial ATA)
SCSI (Small Computer System Interface):
 小型コンピュータシステムインターフェース
SFF (Small Form Factor)
S.M.A.R.T. (Self-Monitoring, Analysis and Reporting Technology)
SMR (Shingled Magnetic Recording), **SWR** (Shingled Write
 Recording): 瓦記録
S/N (Signal to Noise Ratio): 信号対雑音比
SNR (Signal-Noise Ratio): 信号雑音比
SSD (Solid State Drive):
 記憶媒体としてフラッシュメモリを用いるドライブ
STW (Servo Track Writer): サーボトラックライター
SUL (Soft Under Layer): 軟磁性裏打ち層
TAMR (Thermal Assist Magnetic Recording): 熱アシスト磁気記録
TFC (Thermal Flying-height Control):
 熱膨張によるスライダ浮上量制御
TMR Head (Tunneling Magneto-Resistive Head): TMRヘッド
tpi (tracks per inch): トラック密度
USB (Universal Serial Bus): 汎用シリアルバス
VCM (Voice Coil Motor): ボイスコイルモータ
WEEE (Waste Electrical and Electronic Equipment):
 電気・電子機器の廃棄に関する欧州議会及び理事会指令

IDEMA[®] JAPAN

幅広い業種の企業群に支えられるHDD業界は
技術の粋を集めた独特の世界を築き上げ続けます。

わかりやすいHDD講座 テキスト 第9版
2022年7月28日発行

企画： IDEMA JAPAN 教育推進委員会
資料作成・講義： IDEMA JAPAN 協賛会員 博士(工学) 吉田武史

本資料の転記・転載を禁じます。