



Archival Disc

White Paper:
Archival Disc Technology

2nd Edition

January 2020

SONY

Panasonic

Content

Content	1
1 Introduction (はじめに)	2
2 Optical Disc Technology (光ディスク・ドライブ技術進化一般論)	4
3 Archival Disc Technology (AD 技術).....	5
3.1 Archival Disc Roadmap (アーカイバルディスクのロードマップ)	5
3.2 Disc Structure (ディスク構造)	6
3.3 New Recording Material (新しいディスク材料)	6
3.4 Physical Format (物理フォーマット)	7
3.5 Logical Format (論理フォーマット)	9
3.6 Signal Quality Measurement (d-MLSE の説明).....	11
3.7 Specifications for 500 GB AD (500 GB のスペック)	11
4 Long-term Archiving (メディアの長期保存)	14
4.1 Media Lifetime (メディアの寿命)	14
4.2 Disc Tilt and Its Variation in Response to Temperature Changes (ディスクチルトの信頼性)	15
5 Future.....	16

1 Introduction (はじめに)

ネットワーク環境の整備、及びコンピュータの処理速度の向上により、音声・映像・動画などのデジタルデータは今後急速に増大し、米国のIT調査会社 IDC の 2014 年 4 月のレポートによれば全世界で生成・保存されるデータ量は 2020 年に 44 ZB (ゼタバイト; ZB=10²¹ Bytes) まで達すると予想されています (図 1)。さらに 2017 年 4 月のレポートによれば、データ量は 2025 年に 163 ZB まで達する見込みです。(図 2)。これら増大するデジタルデータは、コンプライアンス、学術研究、文化資産継承、更にはデータ分析による新たな価値提供の為に、長期保存 (=アーカイブ) へのニーズが高まっています。一方で、巨大データを扱うデータセンターを運用する事業者にとって、データの長期保存は大きなコスト負担を強いられる為、ストレージの低コスト化 (初期導入、及び運用コスト) が求められます。この要望に応えられるストレージメディアとして、光ディスクは非常に有望ですが、今後のデータセンターでのニーズを満たすためには、更なる大容量化が必須と考えられます。



図 1 2020 年の全世界で生成、保存されるデジタルデータ量の予測

出典： IDC's Digital Universe, 「The Digital Universe of Opportunities: Rich Data and the Increasing Value of the Internet of Things」 Sponsored by EMC (2014 年 4 月)

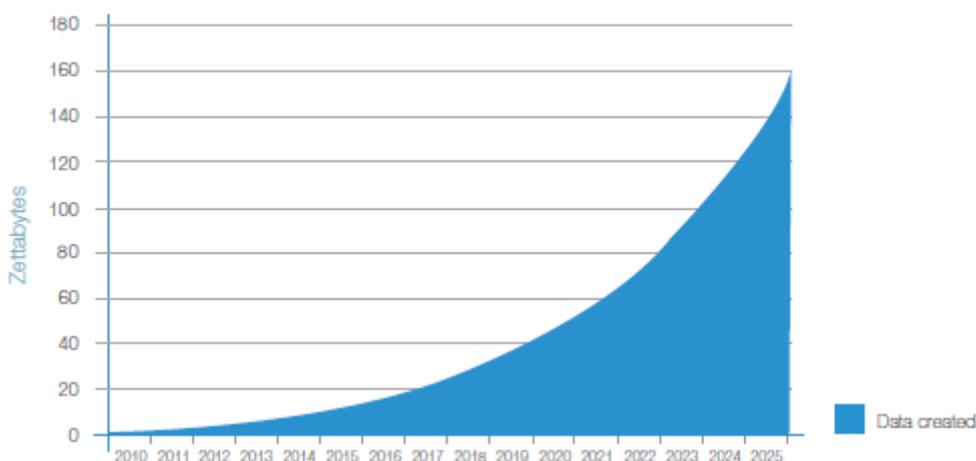


図 2 全世界で生成、保存されるデジタルデータ量の予測

出典： IDC's Data Age 2025 study, sponsored by Seagate (2017 年 4 月)

データセンター事業者が寿命の短いストレージメディアにデータを長期保存することを選択すると、継続的なデータ移行（データマイグレーション）に伴う投資は莫大なものとなり、結果的にデータセンターの経営を圧迫することになります。一方、光ディスクはデータマイグレーションなしに、50年以上に渡って安全にデータを保管することができ、データセンターは低コストでサービスの提供が可能になります。

多くのデータセンターは、空調設備を廃止することで、環境負荷が低く運用費用の安い、「グリーンデータセンター」を目指しています。光ディスクは、この「グリーンデータセンター」の実現要求を満足する、高いパフォーマンスを有しています。図3に全世界の主要都市の平均気温と平均相対湿度を示しました。光ディスクは図3の青い領域内のいかなる環境条件下においても、50年以上記録データを保持することが可能です。世界中のあらゆる都市で、より環境にやさしく、運用コストの安いデータセンターを実現するのが光ディスクなのです。

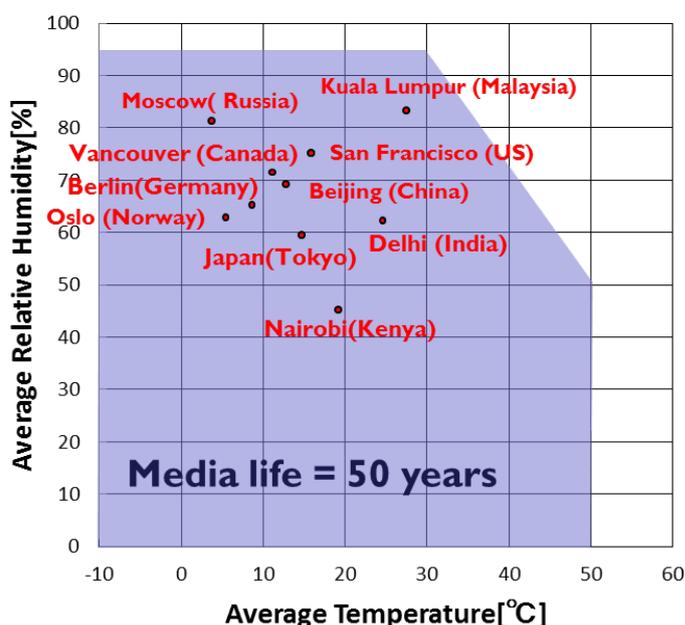


図3 全世界の主要都市の平均気温と平均相対湿度

また、光ディスクでは、レーザーを用いた非接触、かつ光学的なプロセスでデータの書き込み、及び読み出しを行っているので、データ記録層を保護膜で覆うことで、書き込み、読み出しの性能を損なうことなく高い環境耐久性を持たせることが可能です。光ディスクの高い環境耐久性を示す例を2つご紹介します。

一番目は海水に対する耐久性です。記録済の光ディスクを5週間に渡って海水に浸した後でも、洗浄、乾燥させることで、何の問題もなくデータの再生が可能です。

二番目は太陽嵐に対する耐久性です。光ディスクへのデータの記録は電磁効果を使っていないので、保存データは太陽嵐からも全く影響を受けることはありません。

ここまで述べてきたように、光ディスクは、低環境負荷、低運用費用、高耐久性といったデータセンターの要求に応えるストレージメディアとして非常に有望であり、これら性能を備えた上、大容量化を実現した新しい光ディスクが、本 white paper でご紹介するアーカイバルディスク (AD :Archival disc) になります。

2 Optical Disc Technology (光ディスク・ドライブ技術進化一般論)

日本が世界に誇る産業の一つとして光ディスクがあり、音楽や映像にかかわる商品として、これまで、Compact Disc ; CD、Digital Versatile Disc ; DVD、Blu-ray Disc™という形で進化してきました。

最初の 12 cm 光ディスクが世に出たのは、1982 年 10 月 1 日の CD のリリースでした。CD は高音質の音楽を身近で手軽に楽しめる商品として世界中に広まりました。また当時、パーソナルコンピュータ用の基本ソフトの規模がフロッピーディスク数 10 枚を必要とするほど大きくなりましたが、これを CD-ROM で供給することで、IT 用途における光ディスクの地位は揺るぎないものとなりました。

CD の次代を担う光ディスクは、映画に代表される映像情報含めて AV 用途として検討が始まりましたが、一方 CD の市場が背景にあった為、IT 用途との統合を可能にするものであると同時に、動画コンテンツの記録を可能にするために、記録容量の増加が不可欠でした。このような環境の中で生まれた DVD は、光源のレーザーを赤外から赤色に短波長化し、同时对物レンズの開口径数(N.A. :numerical aperture)を 0.60 に上げることで記録再生光のスポットサイズを縮小し、それに対応して記録マークサイズとトラック間隔を縮小することで高密度記録を可能にしました。更に片面 2 層ディスクの実現により最大約 9 GB の記録容量を実現しました。

光源を青紫色まで短波長化し、対物レンズの N.A. を 0.85 に上げることで、DVD の約 5 倍の記録容量を実現したのが Blu-ray Disc™です。Blu-ray Disc™の記録容量は、両面 3 層ディスクの実現により、ディスク 1 枚で最大 200 GB まで到達しています(図 4)。更にデータビット長の縮小により、DVD と同じ回転数であっても、余裕をもってデジタル HD 映像の記録再生が可能な転送レートを実現しています。

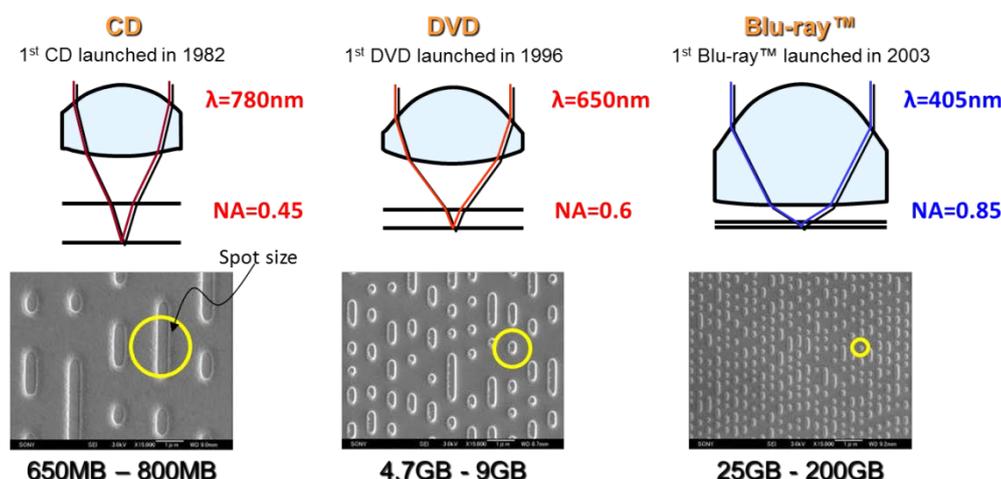


図 4 CD、DVD、Blu-ray Disc™の再生スポットと記録マーク形状

また、CD から DVD、Blu-ray Disc™への光ディスクの進化の過程で、DVD の記録再生装置は CD を、Blu-ray Disc™の記録再生装置は CD と DVD をそれぞれ記録再生できるという下位互換を実現することで、お客様の利便性を損なうことなく新しい規格を導入してきました。この様な進化を続けて来た光ディスクの次の応用分野として、今後爆発的に増加するデジタルデータを、安心して高速で記録再生することを目的とした、アーカイバルディスク(Archival Disc ; AD)を、パナソニック株式会社とソニー株式会社で規格化し、ご紹介ができる状況となりました。本 White Paper では、AD のコンセプトと、新たに導入した技術の概要について以下に記させていただきます。

3 Archival Disc Technology (AD 技術)

3.1 Archival Disc Roadmap (アーカイバルディスクのロードマップ)

AD 規格のロードマップは、図 5 に示すように、ディスク 1 枚あたりの記憶容量が 300 GB のシステムを、第 1 世代として 2015 年に市場に導入しています。第 2 世代としては、ディスク 1 枚あたりの記憶容量が 500 GB のシステムを 2018 年秋以降に導入することを目指します。さらに、その後両社が保有する技術をベースに、第 3 世代では 1 TB 超を目指して開発していく予定です。それぞれの世代で使用する技術は下記の通りです。

① 第 1 世代：両面 3 層ディスク技術、狭トラックピッチクロストークキャンセル技術

ディスク側では基板上の案内溝と溝間の両方に信号を記録するランド&グループ記録方式を導入し、トラック密度を向上させ、それによる隣接トラック間のクロストークノイズは、新開発のクロストークキャンセル技術を適用することにより、読み取りエラーのない十分な再生信号品質を確保します。

② 第 2 世代：第 1 世代 + 高密度符号間干渉除去技術

高線記録密度に伴い低下する再生光スポットの分解能を補正するため、ドライブ装置に次世代符号間干渉除去技術を導入し、光学系やディスクなどデバイス側の開発負担を抑えてディスク 1 枚あたり 500 GB までの容量アップを達成します。

③ 第 3 世代：第 2 世代 + 多値記録再生技術

多値記録再生技術、及び高 SNR 光学系を導入し、ディスク 1 枚あたり 1 TB 超の大容量を実現します。全ての世代でベースの光学パラメータや 3 層ディスクの構造を変えずに大容量化を進めるため、ディスクの製造コストダウンやドライブ装置側の下位互換性が実施しやすくなります。ディスクでは新たに高信頼性、及び高 SNR の記録材料を開発し、アーカイブ用途に適しつつ高密度記録を可能にすることで、各世代の記録容量アップに貢献していきます。

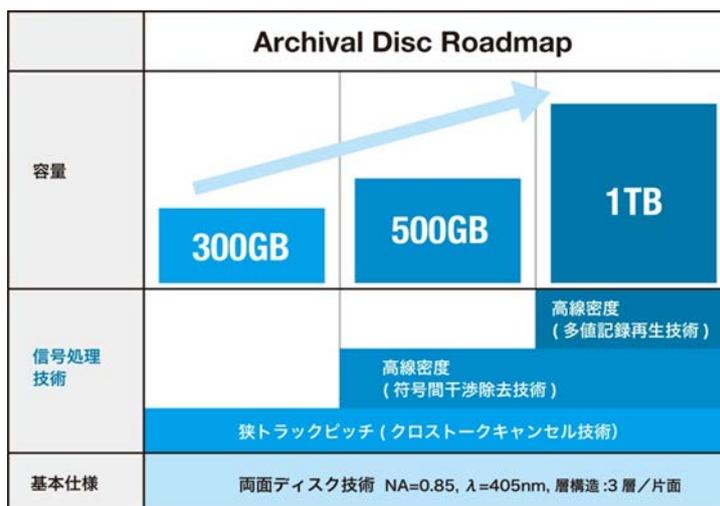


図 5 AD 規格ロードマップ

3.2 Disc Structure (ディスク構造)

AD ディスクの構造は、信頼実績のある従来の光ディスクで採用されている 3 層積層タイプを両面化したものであり (図 6)、かつ両面逆スパイラル構成を新規に導入することで、両面同時記録再生が可能になり転送レートの向上を果たします。また、アドレス構造は今後の記録信号の高線密度化時にもそのまま適用できるものを導入し、ディスク形状の変更なしに第 2 世代 500 GB 対応ドライブシステムも構築を実現しました。以降、第 3 世代の大容量対応ドライブシステム構築も同様にディスク形状の変更をしないことで、低コスト化を具体化して参ります。

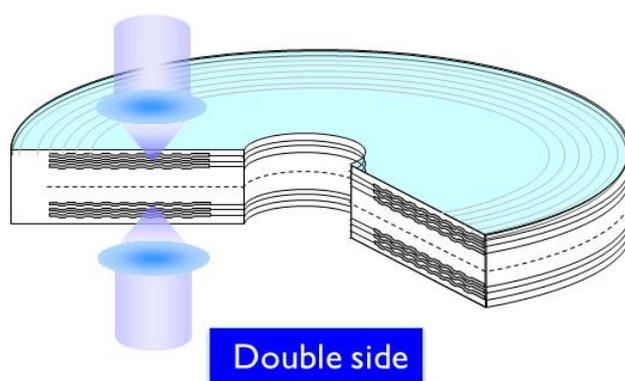


図 6 AD のディスク構造

3.3 New Recording Material (新しいディスク材料)

AD ディスクでは、記録材料を保護膜で挟んだシンプルな 3 層構造を採用しており (図 7)、記録時にはレーザー光の照射によりエネルギーが与えられることで記録マークが形成されます。また、本記録材料は適度な光吸収を持たせ、高線速記録の為に十分な記録感度設計が可能な構成となっているため、高い記録レートを実現しつつ、高い保存信頼性も併せ持っています。ディスク生産の観点では、本記録膜材料は導電性が高く、DC 電源での低真空度での高レートスパッタ成膜が可能であるため、タクトタイムが早いというメリットがあり、低コストメディアには最適な材料選択が実現できます。さらに、AD-Ver.2.0 規格対応のディスクでは、片面 250GB の高密度化に対応するため、信号振幅向上を果たした進化した記録材料を用いています。

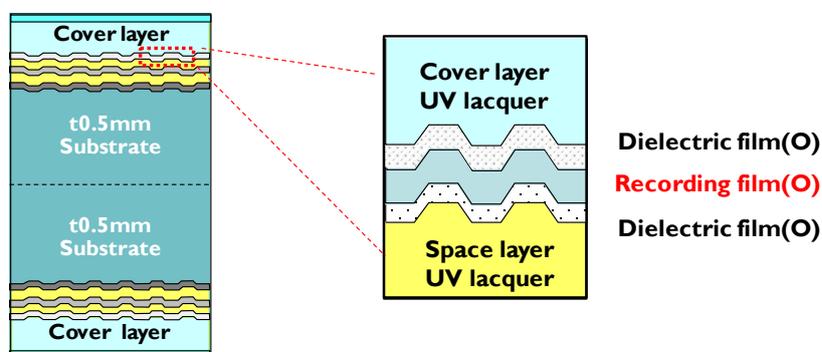


図 7 AD ディスクの記録層

3.4 Physical Format (物理フォーマット)

本章では AD の物理フォーマットで導入された新規技術についてご説明します。

① ランド&グループ記録技術とクロストーク低減技術

AD は、従来の光ディスク技術をベースに、1 層あたりの記録容量を最大限に高めるため、ランド&グループ記録技術(図 8)とクロストーク低減技術を適用しています。これにより、半径方向の記録密度を Blu-ray Disc™比 1.4 倍まで高められています。後述する 3.5 Logical Format で新たな交替管理方式を採用することにより、サーボエラー信号のクロストーク課題を乗り越えて、狭トラックピッチを実現しています。

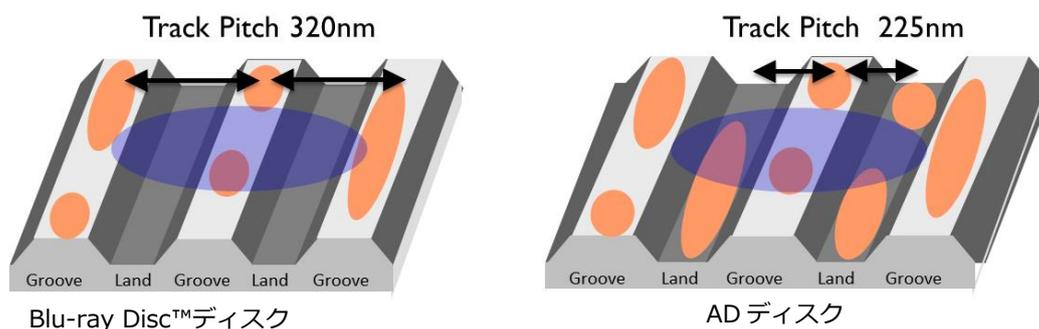


図 8 ランド&グループ記録

② 物理アドレスフォーマット

光ディスクのトラックには、指定されたデータの記録再生位置に即座にアクセスできるようにするため、トラックの蛇行により物理アドレスが設けられています。従来のグループトラック記録ではグループトラックのみに物理アドレスが設けられていましたが、AD の特徴であるランド&グループ記録を実現するため、グループトラックとランドトラックのどちらでも物理アドレスが取得できるように新たなフォーマットを採用しました。さらに、AD の物理アドレスフォーマットは、記録されたデータを再生するときの再生信号に対してトラックの蛇行が与えるノイズを十分に小さく抑えるとともに、高い読み出し性能も確保できています。

③ ゾーンフォーマットシステム

AD では、トラックの蛇行による物理アドレスに対するデータの記録線密度の比率を制御するゾーンフォーマットシステムを採用しています。AD のゾーンフォーマットシステムでは、所定のゾーンフォーマットに従って、読み出した物理アドレスからデータのブロック単位のデータアドレスを得ることにより、任意の位置に対するデータの記録再生を実現しています。

④ 第 2 世代の新たな記録再生技術とデータフォーマット

第 2 世代では、線密度を上げることで、記録容量を 300 GB から 500 GB まで増やしています。

線密度化を向上するために、

- ・微小マークを正確に記録できるように改善した記録技術
- ・高線密度化により振幅が低下した再生信号からのデータ復号を可能にする符号間干渉除去技術

- ・構成の最適化により線密度効率を約 7%改善した新たなデータフォーマット
- ・高線密度化に適合しエラーレートを低減可能な新しいチャネル変調符号
- ・エラー訂正能力を大幅に強化した拡張エラー訂正符号

を新たに導入しました。

拡張エラー訂正符号技術により $1E-19$ 以下の訂正不後のビットエラーレートを実現できます。仮に、すべての Error correction code(ECC)単位に 1mm 程度の欠陥が存在したとしても訂正前のランダムなシンボルエラーレート(SER)が $1E-2$ 以下であれば、この能力($1E-19$ 以下)が保障されます。

ディスクのビット単価の低減と将来にわたる互換確保

従来の光ディスクでは、ディスクのトラック構造の変更を伴いながらデータの記録線密度を高めてきましたが、AD のゾーンフォーマットシステムでは、AD 300 GB からディスクの物理的なアドレス構造を変えることなく、ゾーンフォーマットのパラメータをアップデートすることで、500 GB のディスク容量を実現しています。このため、記録密度を向上させる度にフォーマットを変える必要がないため、ビット単価の低減に有利です。また、ディスクの物理的な構造を変えないことにより、下位互換を容易に確保することができ、常に最新のドライブシステムを用いて、長期保存したディスクに記録されたデータを高い信頼性をもって再生することができます。このゾーンフォーマットシステムは、将来の AD 1 TB ディスクにも採用します。

3.5 Logical Format (論理フォーマット)

3.5.1 Disc management

AD ディスクは両面 3 層構造のランド&グループフォーマットですが、ユーザーにとっては大容量の光ディスクとして扱うことが可能です。また、両面逆スパイラル構造を採用したことで、両面同時アクセスもできます。さらにランドとグループを同時に記録することも可能なので、多数の光学ヘッドを使用することで転送レートの向上も実現できます。加えて、管理情報 (Disc Management) としては片面で閉じた構成となっているので、ドライブ装置の構成に依存することがなく、またディスク上の物理位置に対応した一意の LSN (Logical Sector Number) が定義されているので再生互換も容易に達成できます。また欠陥管理機能 (Defect Management)、論理上書き機能 (LOW ; Logical Over Write) も具備しているので、従来の光ディスクを制御することが可能なファイルシステムであれば、容易に AD を制御することが可能です。

3.5.2 Defect Management

AD では、欠陥管理機能を備え、ユーザー領域中に欠陥ブロックが存在した場合でも、ディスクの内周側、及び外周側のスペア領域に代替記録することにより、データの信頼性を高めることが可能となっています。

加えて、AD では新たにランド&グループ記録に伴うサーボエラー信号へのクロストーク変化や他層の記録状態による影響に対して、記録性能の信頼性を向上させるためにも交替管理機能を流用可能としています。実アクセスを伴わずに管理情報のみを用いた記録制御対応が実現可能になり、新たな記録制御のパフォーマンス低下を最小化するとともに、ユーザーは記録制御を意識する必要がなくなります。またスペア領域や欠陥管理情報領域等の配置については、奥の層から順に記録する使用方法も考慮した、追記型に最適なフォーマットを採用しています。

3.5.3 Recording Management

AD では従来の追記型光ディスクとの互換確保を重視して、シーケンシャル記録モードを採用しており、既存のアプリケーションを容易に AD に適用することが可能です。AD でも、従来の光ディスクと同様に、シーケンシャル記録可能な領域範囲である SRR (Sequential Recording Range) を同時に複数個確保することもできます。SRR を複数設定することで、追記可能な位置を複数個所確保することが可能です。

AD では、クローズするために未使用領域を埋める必要はないので、DVD のような従来のシーケンシャル記録メディアと比較してクローズ動作時間の短縮が実現できます。更に線形置換可能なディフェクトマネジメントにより、以前に記録されたユーザーデータへの LOW が可能となっています。

3.5.4 OPC Area Management

AD では従来よりも多くの領域を記録調整用に割り当てることを可能にするため、ディスクドライブ装置から任意の領域に OPC (Optimum Power Control) 領域を配置できる構成を採用しています。OPC 領域の配置情報である OPCRI (OPC Range Information) を DDS (Disc Definition Structure) 中に定義することで、ディスク全体の容量増加に対して、繰り返しの使用可能回数も同等以上を確保しています。

3.5.5 User Area Management

ADでは3層構造のランド&グルーブフォーマットを採用しています。ユーザーがアクセス可能な領域であるUser領域（ボリューム空間）には、論理アドレス（Logical Sector Number : LSN）が割り振られ、ユーザーからはLSNによってアクセスできます。LSNの付与方式は、以下の図9の通りです。

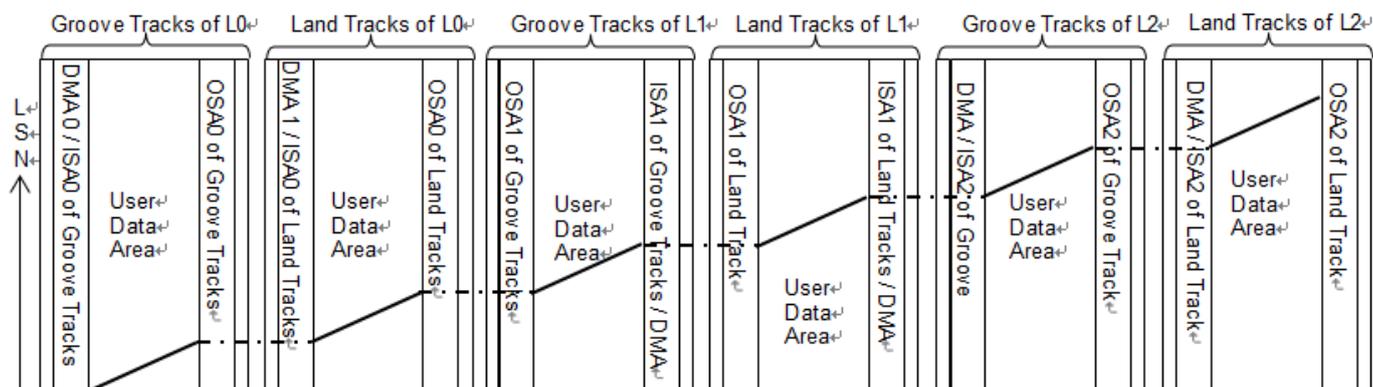


図9 LSN 付与方式

具体的には、LSNは、L0層のGroove側の内周側から外周側に向かって順に割り当てられ、続いてL0層のLand側の内周側から外周側に向かって順に割り当てられます。さらにL0層の次はL1層に外から内の方向で、その次はL2層と、このルールで付与されます。

なお、ユーザー領域（論理空間）は記録面毎に個別に配置されますが、ドライブ装置及びその上位層の対応により、両面をあわせて1つの論理空間（1ボリューム）として扱うことも可能です。

3.6 Signal Quality Measurement (d-MLSE の説明)

AD 第 2 世代ディスクの再生信号品質評価には、d-MLSE(Distribution Derived-Maximum Likelihood Sequence Error Estimation)という指標を用います。

これは PRML (Partial Response Maximum Likelihood) の検出原理に基づいた指標である点は、AD 第 1 世代の指標(i-MLSE)と同じですが、第 2 世代の大幅な高密度化に対応し、指標の演算方法を改善したものです。

この指標により、第 2 世代ディスクでも精度よく再生信号品質を定量化することができます。図 10 は第 2 世代ディスク(500 GB 容量)における各種再生ストレス印加時の d-MLSE とシンボルエラーレート(SER)との測定結果で、両者が非常に高い相関関係にあることが分かります。

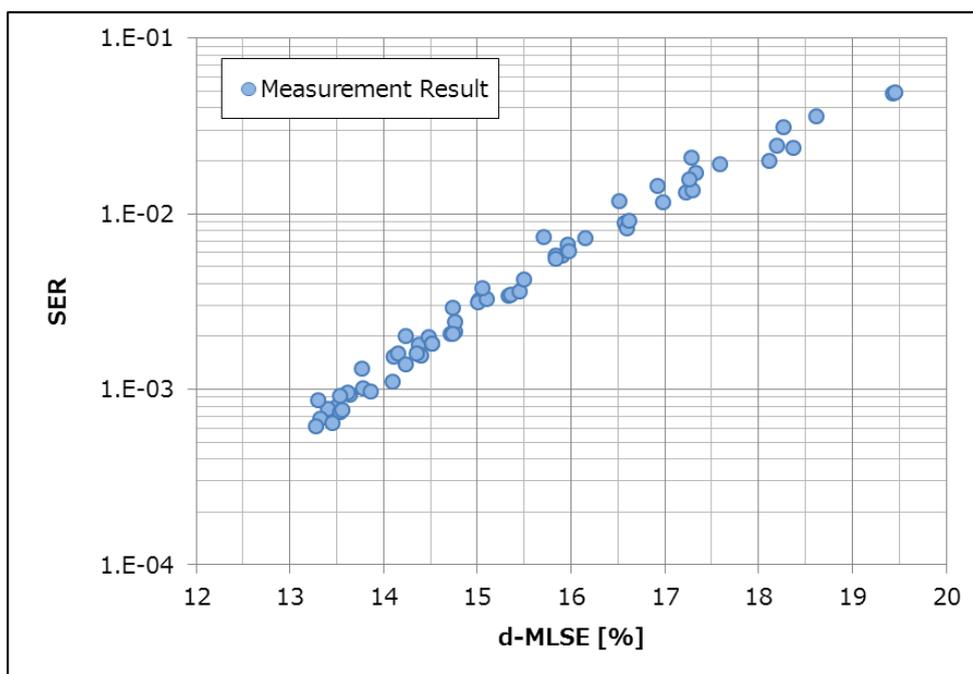


図 10 信号品質評価指標 d-MLSE と SER

3.7 Specifications for 500 GB AD (500 GB のスペック)

AD 500 GB ディスクの主要なパラメータを AD 300 GB と比較して、以下の表 1 に示します。AD の記録再生装置は Blu-ray Disc™を記録再生できるという下位互換を容易に実現するために、主要パラメータは、Blu-ray Disc™のパラメータと同仕様としています(※Blu-ray Disc™ white paper 参照)。AD 300 GB ディスクは、100GB Blu-ray Disc™仕様と比較して、トラックピッチを 1/1.422 倍、線密度を 1.055 倍、両面で 2 倍とすることで、大容量化を実現しましたが、AD 500 GB ディスクでは、ここからトラックピッチ、両面構造は変更することなく、線密度だけを 1.549 倍することで更なる大容量化を具現化しています。

表 1 AD ディスクの主要パラメータ

【Main parameters】	【AD 300GB Specifications】	【AD 500GB Specifications】
Disc diameter	120mm	
Total nominal thickness	1.2mm	
Double sided disc	Triple Layer (TL)/Side	
Cover Layer thickness	57.0um	
Recording polarity	High to Low	
Recording method	Land & Groove	
Data Zone inner radius/ outer radius	24mm/58mm	
Track pitch	0.225um	
Addressing method	Wobbled Grooves with addresses	
Maximum user data transfer rate	359.65Mbps	
Channel modulation	17PP	110PCWA
Error correction code	64KBLDC+BIS	256KB Extended-RSPC
Total efficiency	81.738%	87.850%
Nominal Channel bit length	53.0099nm	34.216nm
Nominal Data bit length	79.5149nm	51.324nm
User data capacity 120mm	300.00572GB	500.12357GB

AD 500 GB ディスクの各層における d-MLSE/SER のスペック(defined in 3.6 Signal Environment)は、表 2 に記載しています。

表 2 AD 500 GB ディスク各層の d-MLSE と SER のスペック

【Signal Quality Evaluation Index】	【Specifications】
d-MLSE required for disc with Tester	L0 \leq 14.5% L1 \leq 14.5% L2 \leq 14.5%
SER required for disc with Tester	\leq 1.0E-2

4 Long-term Archiving (メディアの長期保存)

4.1 Media Lifetime (メディアの寿命)

3.3 章でも述べましたが、AD ディスクで採用している記録層は、耐酸化性、耐腐食性が非常に高く、高い信頼性を確保できています。また、レーザーによるマークの形成は、本記録材料の構造（形状）変化で実現されるので、記録された信号には高い保存信頼性があります。記録データのアーカイバル保存特性として、図 11 に加速試験結果から ISO/IEC16963 を参考にして求めた推定寿命の温度依存性のグラフを示します。

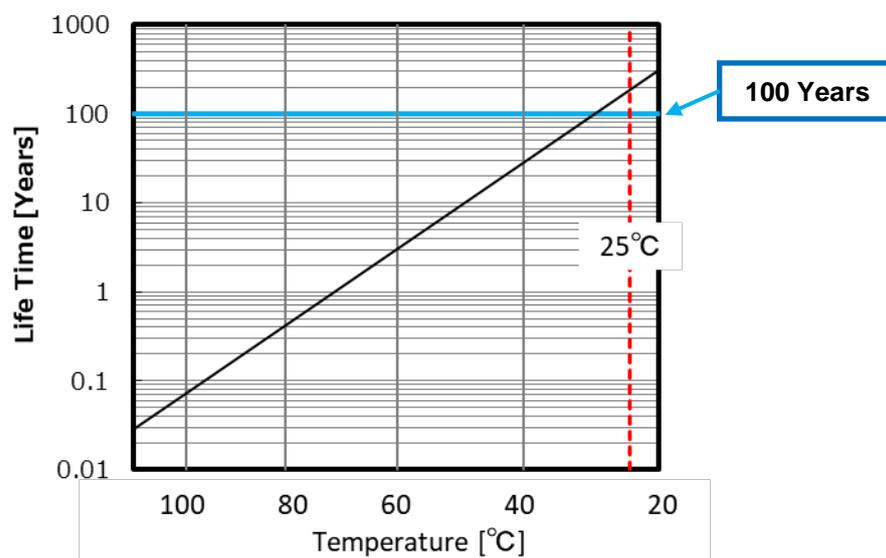


図 11 AD ディスクの長期保存信頼性

加速試験では、65°C/80%RH、75°C/80%RH、85°C/60%RH、85°C/70%RH、85°C/80%RH の 5 つの条件で、再生データエラーレートがクライテリアに到達するまでの時間を求めました。上記グラフは、その試験結果から相対湿度 50%における 95% 残存寿命推定値の温度依存性を表したものです。新規開発の記録材料を使用した AD の推定寿命は、25°C/50%RH の常温環境下で 100 年以上という申し分のない推定結果になっています。

4.2 Disc Tilt and Its Variation in Response to Temperature Changes (ディスクチルトの信頼性)

AD ディスクは約 0.6mm 厚の A 面ディスクと B 面ディスクを背中合わせに貼り合わせた対称構造をしています。これは DVD と類似した構造で、長期保存したときに生じる反り(チルト)が少なく、その後ドライブ装置で再生するときの再生信号品質劣化を防ぐことができます。CD や Blu-ray Disc™ のような片面構造ディスクの場合は、プラスチック基板と樹脂接着層や記録層が一方方向に積層されるため、長期保存中に各層が面内方向に異なる割合で収縮もしくは伸長することがあります。このためディスクの表面または裏面方向に僅かに変形していき、チルトとなって現れます。両面ディスクではその歪みが A 面側と B 面側で互いにほぼ相殺することになるため、チルトを抑えることができます。

また、両面对称構造は長期保存時だけでなく、ディスクがドライブ装置に装着された直後の周囲温度上昇に対しても有効です。片面構造ディスクの場合、ドライブ装置が駆動開始することによるドライブベイ内の温度上昇だけでチルトが発生しやすく、記録再生用のレーザーのスポット品質が劣化する等の不具合が発生しかねませんが、両面对称構造ではこの温度上昇によるチルトの発生も抑制することが可能です。但し、たとえ両面对象構造の AD であっても、長期保存時には過度の加重や歪みは禁物ですので、ディスクを適切なカートリッジや保管ケースに収め、垂直もしくは水平な状態で保管することが推奨されます。

5 Future

第3章のロードマップで説明しましたように、ADでは第2世代の後、第3世代、また更にその先へと継続的に進化することを目指しています。そのための準備は既に開始されており、私たちは具体的な検討を進めています。

第3世代では同じ物理構造のディスク上に記録されるマークレベルを多値化することで更なる高線密度化を図り、1 TB 超の容量を実現します。マークを多値化するため、新たにマルチレベル記録技術を導入します。この技術を用い、第2世代ADディスクに0値から3値の多値マークを記録再生した結果を図12に示しています。各レベルのマークはその振幅が他レベルのマークと混ざることなく、的確に書き分けることができおり、エラーレート 6.54×10^{-4} という記録再生性能が確認されています。

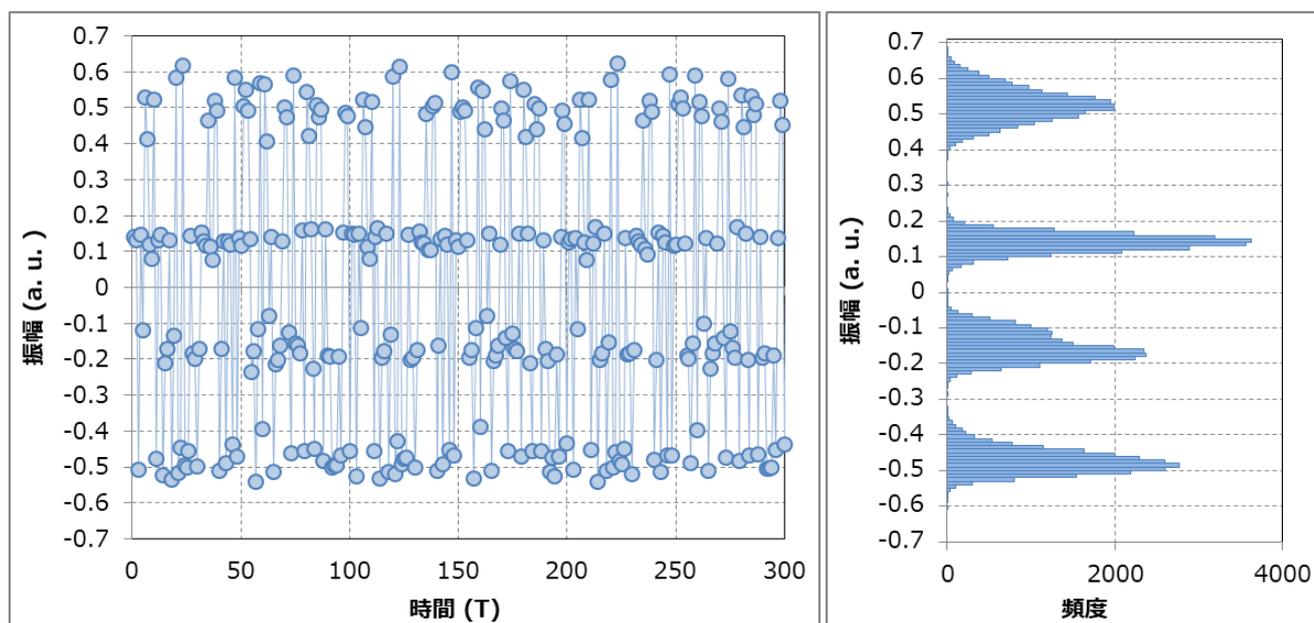


図12 第3世代ADの多値記録再生性能

また、隣接トラックからのクロストーク低減技術についても進化を図っており、更にトラックピッチを詰める目途が見えてきました。

このように、AD規格は、信頼実績のあるBlu-ray Disc™と同じレーザー波長、NA、ディスク層構造を基本仕様として、高線密度化する技術と狭トラックピッチ化する技術をアップグレードしていくことにより記憶容量を大きくする進化を続けます。

AD規格は今後増大するデータを低コストでアーカイブするために有望なストレージなのです。