

データ寿命100年の高信頼性を実現した光ディスクアーカイブシステム

Optical Disc Archiving System with 100 Years Lifespan of Digital Data

山崎 卓人
Takuto Yamazaki

小林 靖史
Yasushi Kobayashi

要 旨

デジタルデータの長期保存ストレージとして、光ディスクを用いたアーカイブシステムを開発した。このシステムは、Blu-ray Disc^(注1)の後継となるArchival Disc^(注2)規格によって3倍の容量(300 GB)を実現しながら、新規記録膜材料の開発により推定寿命100年以上のデータ長期保存性を実現した。本システムでは12枚のディスクを高密度に装填する新開発カートリッジによって、ユーザー取り扱い時のメディア損傷リスクを防止している。また、このカートリッジをディスクの内周のみを使ってハンドリングしながら安全に交換できる新規メカニズムにより、大容量でありながらデータを長期に安全に低コストで保存することができる。

Abstract

We have developed an optical disc archiving system for long-term accessibility storage of digital data. The system achieves 3 times larger capacity than before by the 300 GB Archival Disc format which is the successor format of the Blu-ray Disc format, and achieves long-term reliability whose life expectancy has been estimated at over 100 years by applying new developed material for recording film. Moreover, this system prevents the damage risk of media by a newly developed cartridge, which is able to install twelve discs with high volume efficiency. The archival system moves, installs and removes the disc to the optical drive by only handling the inner area which is separated from the data area of the disc so the system can significantly reduce the damage risk leading to data loss. The Archival System is not only high capacity but also long-term, safe and cost effective storage.

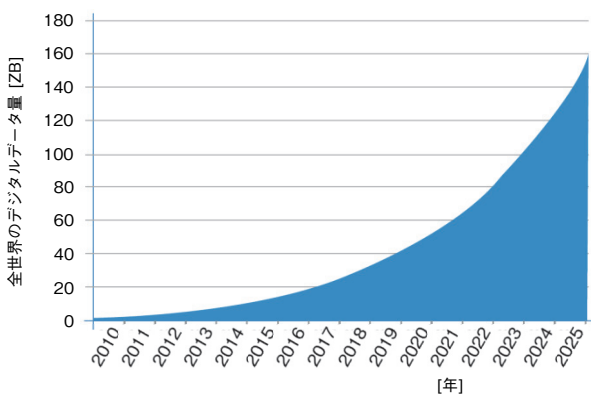
1. はじめに

ネットワーク環境の整備、およびコンピュータの処理速度の向上に伴って増加するインターネット接続機器から生成される音声・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 [1]によれば、**第1図**に示すように全世界で生成・保存されるデータ量は2025年に163 ZB(ゼタバイト; ZB=1021 Bytes)まで達すると予想されている。

これら増大するデジタルデータは、将来にわたってのコンプライアンスの立証、学術研究の推進、文化資産継

承、さらにはAIなどに代表されるデータ分析による新たな価値提供を実現するために、データを長期に保存(アーカイブ)するニーズが高まっている。特に、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ため、ストレージの低コスト化(初期導入、および運用コスト)への期待は大きいといえる。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あるが、今後のデータセンターでのニーズを満たすためには、さらなる大容量化を実現することによって低コスト化を進めていくことが必須である[2]。

データセンター事業者は、ユーザーのデータを非常に高い信頼性で保存し続けることがサービスの質を決める重要なファクターであり、低コストでありながら信頼性が高いストレージが求められている。低寿命のメディアの場合、メディアの寿命が来る前に継続的なデータ移行(データマイグレーション)が必要となるため、これに伴う投資はデータセンターの課題である。光ディスクは、データセンターのデータの保持コストが低いことに加え



第1図 全世界の年間デジタルデータ量の増加予測[1]
Fig.1 Forecast of digital data amount in the world [1]

(注1) Blu-ray Disc Associationの登録商標。

(注2) ソニー(株)と当社の商標。

今後拡大が期待されるアーカイブ市場に対応するため、ソニー(株)と当社は光ディスクの記録容量の向上に関して共同開発を進め、業務用次世代光ディスク規格 Archival Discを策定した。

て、従来のストレージ（HDDやテープ）にはない以下の特徴がある。

- 物理的に上書きできない追記型（WORM）構造を実現できるため、データの真正性を担保できるとともにソフトバグでのデータの書き換え消失リスクがない。
- 記録に磁気を用いないため、磁場・電磁波の影響を受けない。また、例えば海水中に1週間放置した後もデータを再生できるほど頑強であるので、データ保存時の温湿度環境の範囲が広く温湿度制御による運用コストを低減できる。

このように、光ディスクは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」を実現できる可能性を秘めたストレージであり、今後のデータセンターが目指す方向と一致している。

以上の背景から、デジタルデータの低コスト、かつ長寿命で高信頼性というアーカイブ需要に応えるため、光ディスクを用いたアーカイブシステムの開発に取り組んだ。システムの構築に必要な開発技術をここに報告する。

2. Archival Disc規格

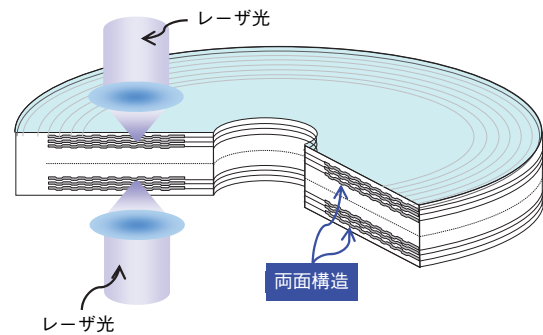
2.1 Archival Disc概要

光ディスクはこれまで、CD（Compact Disc）、DVD（Digital Versatile Disc）、Blu-ray Discという形で進化してきた。今後爆発的に増加するデジタルデータに対応するため、この度Blu-ray Discの後継となるArchival Discを規格化し、より安全で、より高速に記録・再生することに取り組んだ。

2.2 ディスク構造

Archival Discの構造は、第2図に示すように信頼実績のある従来の光ディスク[3]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、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360 Mbit/sもの転送レートを実現している。

具体的には、Archival Discは約0.6 mm厚のA面ディスクとB面ディスクの基板同士を貼り合わせた対称構造をしている。片面構造の場合、プラスチック基板と樹脂層（中間層・カバー層）や情報層が一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、そうすると光学ドライブで再生するときの信号品質の劣化を招く。一方、両面对称構造は、その歪（ひず）みがA面側とB面側で互いに相殺することになるため、長期保存したときに生じるチルト（反り）が少なく、信号品質の劣化リスクを低減させる



第2図 Archival Discの構造[2]

Fig. 2 Archival Disc structure [2]

ことが可能である。

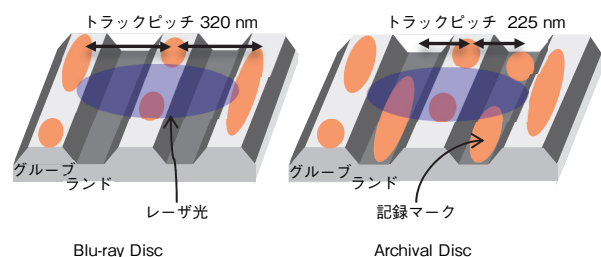
また、両面对称構造は長期保存時だけでなく、ディスクが光学ドライブに装着された直後の周囲温度上昇に対しても有効である。片面構造の場合、光学ドライブが駆動開始することによる内部の温度上昇だけでチルトが発生するため、記録再生用のレーザー光のスポット品質に関して、ある程度の劣化が発生してしまう。両面对称構造ではこの温度上昇によるチルトの発生も、片面構造に比べて抑制することが可能である。

2.3 物理フォーマット

本節ではArchival Discの物理フォーマットで導入された新規技術について説明する。

・ランド&グループ記録技術とクロストーク低減技術

従来のBDXL Disc [3]は、ディスク基板上の案内溝に信号を記録するグループ記録方式を採用していたが、第3図に示すようにArchival Discは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することによって、トラック方向の密度を最大限に向上させている。また、トラック密度向上の影響によって生じる隣接トラックからのクロストークノイズを除去するクロストークキャンセル技術を導入し、トラック方向の密度をBlu-ray Disc比1.42倍まで高めている。



第3図 ランド&グループ記録[2]

Fig. 3 Land-and-Groove recording [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る。従来のグルーブトラック記録ではグルーブトラックのみに物理アドレスが設けられていたが、Archival Discの特徴であるランド&グルーブ記録を実現するため、グルーブ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、新たなフォーマットを採用した。さらに、Archival Disc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る。

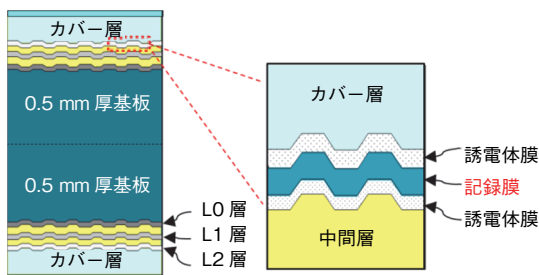
なお、アドレス構造は今後の記録信号の高線密度化時にもそのまま適用できるものを導入し、ディスク形状の変更なしに第2世代以降の大容量対応ドライブシステム構築を可能としている。

・ゾーンフォーマットシステム

Archival Discでは、トラックの蛇行で得られ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る。Archival Disc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る。

2.4 新規ディスク材料

第4図に示すように、Archival Discは、0.5 mm厚の透明基板上に、L0層、L1層、L2層の3つの情報層が積層され、L2層の上には紫外線硬化樹脂からなるカバー層が形成されている。また、各情報層は、酸化物の記録膜を誘電体膜で挟んだシンプルな3膜構成を採用している。記録時にはレーザ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る。



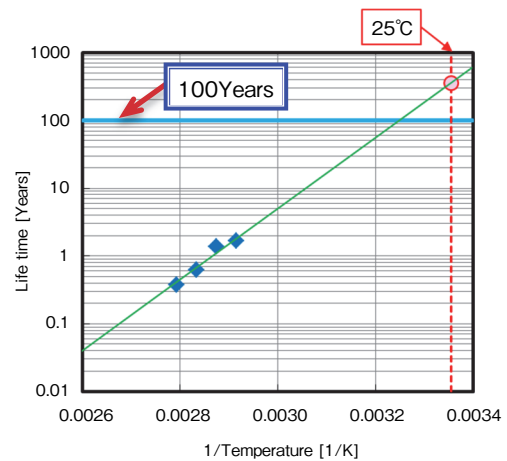
第4図 Archival Discの断面図[2]

Fig. 4 Cross-section diagram of Archival Disc [2]

また、本記録膜は適度な光吸収をもたせ、高線速記録のため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る。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電源での高レートスパッタが可能であるため、タクトタイム（1つの製品を生産するのに要する時間）が速いというメリットがあり、低コスト化に最適な材料を開発した。

2.5 長期保存性

Archival Discで採用している記録膜は、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る。また、レーザ光によるマークの形成は、本記録膜の形状変化で実現されるので、記録された信号は、高い保存信頼性がある。記録データのアーカイバル特性として、第5図に保存信頼性の実測結果を示す。



第5図 Archival Discの長期保存信頼性[2][4]

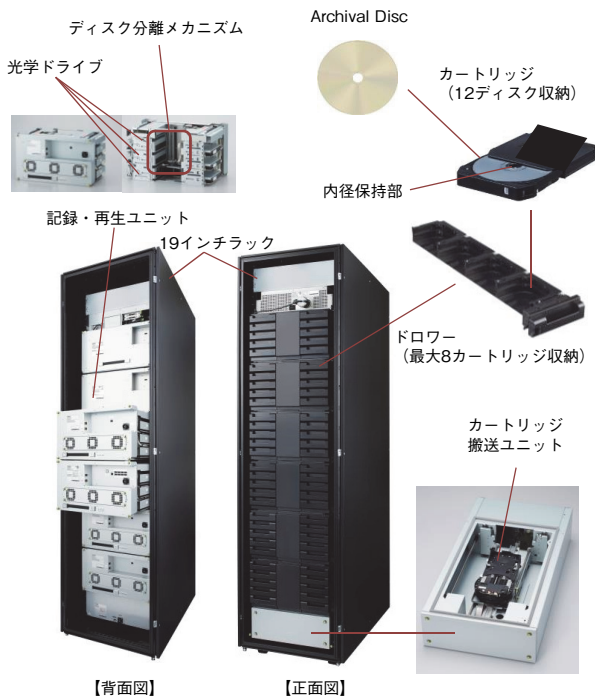
Fig. 5 Long-term storage reliability in Archival Disc [2][4]

環境試験は、ISO16963[5]に準拠し、温度65°C相対湿度80%、70°C-75%、80°C-70%、80°C-80%の4つの条件で実施した。この4条件の試験結果から得られた加速係数を基に70°C、75°C、80°C、85°Cでの寿命を算出し、アレニウスの式でフィッティングすることで、環境温度25°C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た。新規開発の記録膜を使用したArchival Discの推定寿命は、常温環境下で100年以上という申し分のない結果になっている。

3. 光ディスクアーカイブシステム

3.1 装置概要

第2章で解説したArchival Discを用いて大容量のデータを安全に管理できるシステムを開発した。このシステムの装置概要を第6図に示す。



第6図 光ディスクアーカイブ装置
Fig. 6 Optical disc archiving device

Archival Discはカートリッジ形態にて扱われ、最大8つのカートリッジを装着できるドロワーを介して装置内部に格納される。与えられた記録または再生の指令に基づいて、カートリッジ搬送ユニットは指示されたカートリッジを選択し、記録・再生ユニットへと搬送する。記録・再生ユニットは、複数の光学ドライブとディスク分離メカニズムから構成されており、このディスク分離メカニズムによってカートリッジ内のArchival Discは指示された光学ドライブへローディングされ、記録・再生可能な状態になる。このシステムにはArchival Discが有している長期保存性に影響を与えることなく、ディスクを安全に扱うことが求められる。第6図に示す装置構成では、Archival Discを5472枚格納でき、最大1641.6TBものデータを保存することが可能である。

3.2 カートリッジ

本装置に使用されるカートリッジは、ディスク12枚を1つのケースに格納する構成を採用した。カートリッジは

密閉構造になっており、ユーザーはディスクに触れることがないため、取り扱い時のメディア損傷リスクを考慮することなく、安心して扱うことが可能である。また、本カートリッジは3つのロック機能によって開閉動作を制限されている。装置内に格納されることによって、2つのロックが解除され、カートリッジ搬送ユニットによって搬送されるときに残り1つのロックが解除される構成になっているため、ユーザーが通常扱う作業においてロックが解除されて内部ディスクが露出する機会を限りなく低減している。

また、装置内に搭載できるディスク枚数を最大化するために、各ディスクはお互いに密着した積層状態にて保持されている。ディスクは自身の重量も含め、外周部に荷重が加わった状態で長期保存されると、チルトが発生し、記録・再生特性が劣化するという課題がある。特にディスクを積層状態にする本構成の場合、重量が積算されるために顕著な影響を及ぼす。そこで、本カートリッジは中心部に内径保持部を設け、ディスク内周のみで荷重を受ける構成にしている。

3.3 ディスク分離メカニズム

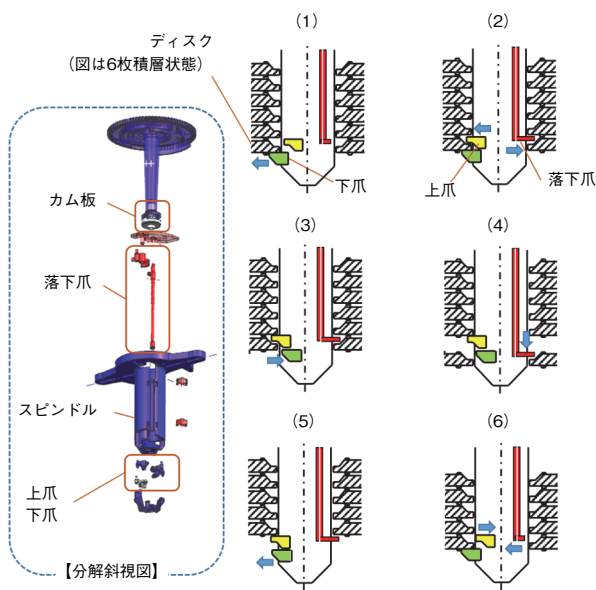
積層状態にて保管されているディスクを一枚ずつ分離し、光学ドライブへ受け渡すディスク分離メカニズムを開発した。なお、本装置は長期間にわたり使用されるため、ディスクは記録・再生要求を受ける度に繰り返し交換される。この繰り返し動作においても、ディスクに与える負荷を最小限化するためにディスク内周のみを使って分離機能を実現している。

第7図に示されるように、ディスク分離メカニズムは、ディスク内径である直径15 mmの空間に入り込むスピンドル、スピンドルから外部へ出入り可能な上爪・下爪・落下爪の3種類の爪部品、そして、それらの爪の動作を制御するカム板から構成されている。これにより、上爪・下爪・落下爪の3種類の爪部品は、スピンドルからその爪部が外側へ突出する位置、スピンドルの内側へ収まる引き込み位置の2つの位置を遷移することが可能になっている。

カートリッジ内に積層配置された12枚のディスクは、ディスク分離メカニズムによって1枚ずつに分離されるが、この手順を第7図の(1)から(6)への状態遷移に従って説明する。

(1) カートリッジからの取り出し

カートリッジ搬送ユニットによってディスク分離メカニズムのスピンドルに通されたディスクは、下爪のみを突出させた状態で保持される。



第7図 ディスク分離メカニズム
Fig. 7 Disc separation mechanism

(2) 上爪、落下爪の準備

上爪および落下爪は、下爪を基準としてディスク1枚分の厚み分だけ上方に配置されている。このため、下爪で全ディスクを受けた状態で上爪および落下爪を動作させることにより、下方から2つのディスク間に、確実に爪を突出させることが可能になっている。

(3) 下爪の引き込み

上爪および落下爪が突出した状態で、下爪のみを動作させて、スピンドル内部に引き込んだ状態にする。この状態にて、基本的には重力によって最下段の1枚のディスクのみが落下する。このようにして、他のディスクから分離して、ディスク1枚のみを光学ドライブに受け渡すことを可能にしている。

(4) 落下爪による強制分離

湿度の影響などでディスク同士が貼り付く場合があるため、(3)の状態だけでは確実にディスクを1枚ずつ分離できる保証がない。そのために、上爪は突出状態を維持したまま、落下爪を下方に動作させる。これにより、ディスクの分離動作を確実なものにしている。

(5) 保持高さの変更

ディスクを分離させた後は、上爪にて残りのディスク全てを保持している状態になる。下爪を突出させ、その後上爪および落下爪をスピンドル内部に引き込むことによってディスクは下爪で保持された(6)の状態、つまり(1)と同一の状態に遷移する。これにより、同じ手順の繰り返しで次のディスクを分離可能にしている。

以上により、ディスクの内径という限られた空間で、

ディスクの長期信頼性を低下させることなく、確実にディスクを1枚ずつに分離する機構を実現した。

4. 今後の展開

前述したようにArchival Discはディスク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2014年に規格を策定し、第8図に示すロードマップに沿った技術開発を進めている。今後、500 GB、1 TBとディスク1枚あたりの記憶容量を継続的に拡大していく計画である。

Archival Disc Roadmap			
	第1世代	第2世代	第3世代
容量	300 GB	500 GB	1 TB
信号処理技術		高線密度 (符号間干渉除去技術)	高線密度 (多値記録再生技術)
基本仕様	両面ディスク技術 NA=0.85, $\lambda=405$ nm, 層構造: 3層/片面		

第8図 Archival Discロードマップ[2]

Fig. 8 Archival Disc roadmap [2]

4.1 第2世代

300 GBを実現した第1世代から基本的なディスク構造を変えずに、線方向の記録密度を1.67倍に高める。この高線密度記録に伴って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することで、ディスク1枚500 GBの容量を実現する。

4.2 第3世代

第3世代でも同様に、ディスクの物理的な構造を変えず、マークレベルを多値化することでさらなる高線密度化を図り、1 TBの容量を実現する。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する。

5. まとめ

Blu-ray Discの後継となるArchival Discを規格化し開発することによって、大容量化による低コストの実現とともに推定寿命100年以上のデータ長期保存性を実現した。

また、Archival Discをカートリッジ単位で安全なメカニズムでハンドリングする装置を開発することによって、Archival Discの特長を最大限に活かし、大容量で

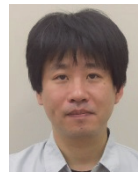
ありながらデータを長期に安全に低コストで保存することができるシステムを提供する。

Archival Disc規格は今後、ディスクの大容量化（500 GB, 1 TB）を進めていくが、大容量に対応したドライブで従来ディスクの記録再生という下位互換の実現が可能であり、ハードディスクやテープと違い[6]保存したデータを長期間にわたって読み出せる安心をユーザーに提供できる。

参考文献

- [1] International Data Corp., “Data Age 2025: The Evolution of Data Life-Critical Don’t Focus on Big Data; Focus on the Data That’s Big,” Apr. 2017, <https://www.seagate.com/www-content/our-story/trends/files/Seagate-WP-DataAge2025-March-2017.pdf>, 参照 Oct. 20, 2018.
- [2] ソニー（株）, “White Paper: Archival Disc Technology”, 1st Edition, July 2015, https://www.sony.jp/oda/about/J_White_Paper_Archival_Disc_Technology_Ver100_20150702.pdf, 参照 Oct. 20, 2018.
- [3] System Description Blu-ray Disc Recordable Format Version 2.00, 2010.
- [4] International Symposium on Imaging, Sensing, and Optical Memory 2017, Matsue, Technical Digest, pp.9-10, Oct. 2017.
- [5] Information technology - Digitally recorded media for information interchange and storage - Test method for the estimation of lifetime of optical disks for long-term data storage, ISO 16963, 2017.
- [6] パナソニック（株）, “光ディスク技術,” https://panasonic.biz/cns/archiver/optical_technology/, 参照 Oct.20, 2018.

執筆者紹介



山崎 卓人 Takuto Yamazaki
コネクティッドソリューションズ社
ストレージ事業開発センター
Storage Business Development Center,
Connected Solutions Company



小林 靖史 Yasushi Kobayashi
要素技術開発センター
Core Element Technology Development Center