

マルチメディアストレージの研究動向

石井紀彦^{†1}, 武者敦史^{†2}, 川前 治^{†3}, 室井哲彦^{†1}

1. まえがき

現在, DRAM (Dynamic Random Access Memory) やフラッシュメモリーなどの半導体記録デバイス, ハードディスクドライブ (HDD: Hard Disk Drive) や磁気テープなどの磁気記録デバイス, 光ディスクやホログラムメモリーなどの光記録デバイスがストレージデバイスとして利用・研究されており, 個々のストレージデバイスごとに新技術を導入した大容量化, 高速化が進められている。

近年, IoT (Internet of Things) などさまざまなモノがインターネットにつながり, そのデータをAI (Artificial Intelligence) で解析して利用する, いわゆる第4次産業革命への地ならしが一段と進んだ。全世界のデータ生成量は2018年では33 ZB (zetta=10²¹), 2020年には44 ZBになり, さらに2025年には175 ZBになる¹⁾という予想もあり, データを保存しているストレージの役割も一層大きくなってきている。これらのデータ保存には, 容量, 転送速度, 保存期間, 保存環境, コストなどを総合的に考え, 最適な記録システム, 媒体で保存していく。一般的に, 記録システムでは記録性能により棲み分けられ, 図1のような階層構成がとられている。特に上層に位置するフラッシュメモリーまでの半導体メモリーでは, アクセス速度の向上ということを念頭に, 新規メモリーの提案も含めて上へ上への研究開発が活発である。一方, HDDや磁気テープ, 光ディスクの研究開発では容量の増加という横へ横への研究開発に主眼がおかれている。

上記のストレージデバイスの製品動向, 技術動向とともに, ストレージシステムの技術動向などについて, 最近2年間の状況を解説する。

(石井)

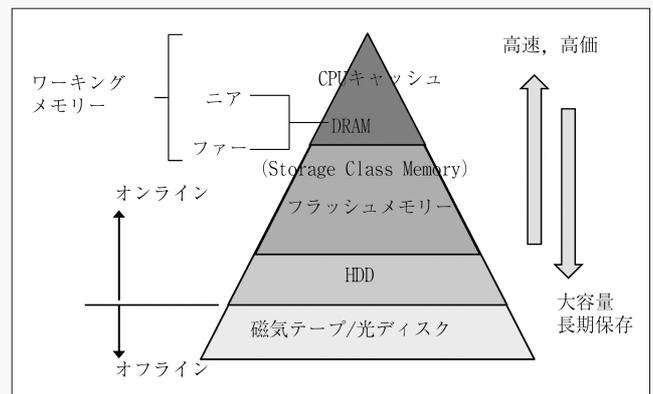


図1 ストレージの階層化構造

2. 半導体メモリー

2.1 ワーキングメモリー

ワーキングメモリーは, プロセッサの近くに据える“ニアメモリー”と, 拡張メモリスロットの“ファームメモリー”に分かれつつある。ニアメモリーには, HBM (High Bandwidth Memory) が位置し, ファームメモリーにはDDR (Double Data Rate) やNVDIMM (Non-Volatile Dual Inline Memory Module) が位置する。

HBMはJEDEC (Joint Electron Device Engineering Council) が規格化した広帯域メモリーで, TSV (Through Silicon Via) 技術によるダイスタッキング^{*1}を前提としている。配線経路の短さや配線幅の太さなどにより, 高速に広帯域でアクセスできるメモリーをインタポザーと呼ばれる基板に実装し, 同じインタポザーにCPU (Central Processing Unit) やGPU (Graphics Processing Unit) を実装する。HBM1は2015年に規格化され, HBM2は2016年に規格化された。HBM2はAMD社のRadeon Vega, NVIDIA社のTitan VといったGPUだけでなく, Xilinx社やIntel社 (旧Altera社) のFPGA (Field-Programmable Gate Array) などにすでに採用されており, 特にAIとビッグデータによるハイエンド市場での広帯域メモリーの需要

*1 ダイはシリコンウエハーの上に数十個分の半導体を同時に作り, 後から切り離したもの。このダイを高さ方向に積み重ねること。

^{†1} NHK 放送技術研究所

^{†2} 富士フイルム株式会社 記録メディア研究所

^{†3} マクセル株式会社 光エレクトロニクス事業本部 光イノベーション部
"Trend of Data Storage Device and Technology" by Norihiko Ishii, Tetsuhiko Muroi (NHK Science & Technology Research Laboratories, Tokyo), Atsushi Musha (Recording Media Research Laboratories, FUJIFILM Corporation, Tokyo) and Osamu Kawamae (Optronics Division, Maxell, Ltd., Tokyo)

の拡大がHBM2需要をけん引している。HBM2では、転送レートがHBM1の1 Gbpsから2倍の2 Gbpsへと引き上げられ、4層スタックで1 TByte/sの広帯域が利用可能である。さらに、2層スタックでフル帯域が使用できるように改良され、4層という制約から緩和されたため、より広いバリエーションの製品展開が可能となっている。さらに転送レートをHBM2の2倍以上への引き上げと低消費電力化を目指したHBM3の開発も進んでいるが、リリース時期については定かではない。

DDRメモリーについて、現在主流のDDR4においては、チップ規格番号1600, 1866, 2133, 2400, 2666, 3200, 4266と転送速度を上げてきており、チップ規格4266では34.1 GByte/sを実現している。一方、DDR5の規格化もJEDECが進められ、規格化が完了した訳ではないが、数社から開発や生産計画が発表されるなど、リリースへ向けた動きは活発化している。SK Hynix社は2018年11月に16 GbitのDDR5チップの製造を行ったというリリースを出した²⁾。DDR4の60%以上の高速化で、かつ消費電力も30%低減している。しかし、DDR5の規格化が完了している訳ではないので、初期仕様に基づくエンジニアリングサンプルという位置づけのようである。実際の製品は2020年に登場すると言われている。

フラッシュメモリーをDRAMモジュールに実装する、NVDIMMという規格がJEDECにより2016年に公開され、製品化されている。NVDIMMは通常のDDR3またはDDR4モジュールをそのまま使うもので、使い方により3つのタイプがある。このうちの1つは、DRAMと同容量のNANDフラッシュメモリーを実装して、DRAMデータのバックアップ用としてNANDフラッシュメモリーを使うNVDIMM-Nである。PCの電源が落ちた場合にDRAMデータをNANDフラッシュメモリーにコピーし、PC立ち上がり時にNANDフラッシュメモリーからDRAMにデータを戻すことで、電源断によるデータ消失を防ぎ、あるいはデータを戻すことでアプリケーションの立ち上げ時間を短縮する。バックアップに必要なバッテリーを搭載するケースもある。NVDIMM-Nでは、バックアップ動作以外は通常のDRAMと同じ動作であるが、「揮発性」という欠点をNANDフラッシュメモリーで補っている。Micron社は2017年に従来の2倍の容量となる32 GBのNVDIMM-Nモジュールを発表した。DDR4-2933^{*2}の速度で、NANDフラッシュメモリーは64 GBである。

2.2 フラッシュメモリー

NVDIMMの3つのタイプのうち、残りの2つはワーキングメモリーとしての使用方法より、通常のフラッシュメモリーとしての使用方法の色が強い。

1つは、NANDフラッシュメモリーのみを搭載し、PCからはストレージとして利用するNVDIMM-Fである。

*2 DDR4-2933はJEDECでは規格化されていない。

DRAMは搭載せず、NANDフラッシュメモリーのインタフェースがDRAMインタフェースになったSSDと同じであり、特にリード動作ではNANDフラッシュメモリー素子の性能をフルに生かせるため、高速動作できるストレージとして期待される。DIMMスロットをストレージとして利用するため、OSの専用ドライバが必要となる。Intel社は23項で記載している3D Xpoint技術を採用したDDR4互換メモリー「Optane DC persistent memory (Optane DC)」を2018年5月に発表した³⁾。容量は128 GB, 256 GB, 512 GBの3モデルであり、SCSI (Small Computer System Interface) やNVMe (Non-Volatile Memory Express) で接続するベイ (外付けアレイ) 形式のフラッシュメディアよりも遅延が少ないことが大きなメリットである。主な使用目的は、インメモリーデータベース、ビッグデータと分析、ハイパフォーマンスコンピューティングなどである。

残りの1つは、小容量のDRAMと大容量NANDフラッシュメモリーを搭載したNVDIMM-Pである。NANDフラッシュメモリーにデータを直接書き込めるため、DIMMの記録容量がDRAMチップとNANDフラッシュメモリーチップの合計に拡大する。NANDフラッシュメモリーのシリコンダイ当たりの記録容量は64 Gbit~512 Gbitで、DRAMのシリコンダイ当たりの記録容量は4 Gbit~8 Gbitである。ワンシリコンでNANDフラッシュメモリーは、DRAMの16倍~128倍の記録容量を備えるが、NANDフラッシュメモリーのコストはDRAMの1/10~1/20であるため、低コスト化が可能である。また、NVDIMM規格について、不揮発メモリーの種類はNANDフラッシュメモリーに限定されないため、もしNANDフラッシュメモリー以外の素子が実用化された場合は、別の不揮発メモリーによる構成も可能である。

一方、通常のNANDフラッシュメモリーではメモリーセルアレイを立体積層化(3次元化)することによる大容量化が大きく進んだ。2016年64層TLC (Tri-Level Cell) で512 Gbit, 2017年には64層QLC (Quad-Level Cell) で1 Tbit, 2018年には96層QLCで1.33 Tbitと進捗し、さらなる多層化が進んでいる。最終的には512層までロードマップがあるため、今後は多層化とともに誤り訂正技術が一段と重要となってくる。

NANDフラッシュメモリーを接続するためのインタフェースも高速化が進んだ。SATA (Serial at Attachment) はHDDを目的として策定されたインタフェースであり、6 Gbpsが上限である。そこで、NANDフラッシュメモリー用にNVMe (Non-Volatile Memory express) 規格が策定された。NVMeの理論上の接続速度は32 Gbpsなので、5倍以上の高速化が図られることになる。現在、NVMe対応製品がぞくぞくと製品化されている。Western Digital社は「Ultrastar DC ME200 Memory Extension Drive」⁴⁾と称して、ソフトウェア (OS) によってNVMe SSDをメモリーと

してみなし，“仮想メモリープール”を構築することで、ソフトウェアからは仮想的な大容量メモリー環境に見えるというNVDIMM-Fと同様な思想を入れている。

組み込み用途では、eMMC (embedded Multi-Media Card)の後継で同じくPCIexpressを利用したUFS (Universal Flash Storage)が規格化されており、このうちUFS3.0インタフェースが2018年1月にJEDECで規格化された。UFS2.0の11.6 Gbpsの帯域に対して、3.0では、23.2 Gbpsと2倍になっている。

2.3 その他の半導体メモリー

NVDIMM-Fや上述の“仮想メモリープール”はDRAMとNANDフラッシュメモリーの速度の間を埋めるストレージクラスメモリーとも呼ばれる。このストレージクラスメモリー用途として、ランダムアクセスも高速なPRAM (Phase change Random Access Memory)やReRAM (Resistive Random Access Memory)が実用化に向けて研究されてきた。このうち、PRAMについては2015年7月にIntel社とMicron社よりNANDフラッシュメモリーの1000倍高速な不揮発メモリー「3D XPoint」を開発したとの発表をしていた。しかし、実際の製品はなかなかリリースできなかったが、2017年にはSSDを、2018年5月に前述のOptane DCを発表した。3D XPointの技術概要はアナウンスされていないが、記録材料としては、DVD-RAMで使われているGeSbTe (ゲルマニウム、アンチモン、テルル)の相変化合金を使用しているようである。GeSbTeは熱により結晶と非晶質の状態を行き来する。結晶化温度範囲にある時間保持することにより結晶となる。一方、融点まで温度上昇したのち、急激に冷却することにより、非晶質となる。この違いをDVD-RAMでは、反射率の違いとして読み出すが、3D XPointは抵抗変化として読み出す。記録密度としては、20 nm技術によるDRAMと比べて6.6倍であるが、48層TLC方式NANDフラッシュメモリーの24%、64層TLC方式NANDフラッシュメモリーの18%である。Google社は「Google Cloud Platform」にOptane DCの使用を発表している。

スピン注入磁化反転*3を利用したMRAM (Magnetic Random Access Memory)であるSTT-MRAM (Spin Transfer Torque-MRAM)の開発も進められた。2017年Everspin Technologies社は256 MbitのSTT-MRAMを発売し、コントローラやさまざまな組み込み機器中の高速な不揮発性メモリー用として販売している。また、同社はNVMe1.2インタフェースを備えた拡張カード型のMRAMも製品化しており、スループットはIntel Optaneの2倍の6 GByte/sとかなり高速な転送速度を示しているが、書込み電力の低下、記録密度と価格の点で課題が残っている。また、低書込み電力を実現するため、スピン軌道トルク

(SOT: Spin-Orbit Torque)磁化反転*4を用いたSOT-MRAMや、さらにSOTの効率を画期的に上げるトポロジカル絶縁体の適用⁵⁾も研究がされている。

固体メモリーでは、カーボンナノチューブを用いた新しいメモリー素子が、2016年に富士通グループとNantero社から共同で発表されていた。1兆回の書き換え、300度の高温化でも10年以上のデータ保持、MRAMと同等の反応性など大きな利点があり、2019年に富士通より製品化される予定であるとNantero社のホームページに記載されている⁶⁾。実現すれば3D XPointに続くDRAMの置き換えメモリーとなる。

また、ReRAMを世界で初めて実用化したパナソニックは容量を8倍の4 Mbit (従来512 kbit)で書き換え回数を120万回 (従来10万回)に上げた⁷⁾。当初の応用用途はIoTとしているが、その他にもAI用エッジ計算回路⁸⁾としても検討している模様である。 (石井)

3. 磁気記録

3.1 ハードディスクドライブ

HDDの年間総出荷台数は、2010年に6億台を超えピークに達した後減少を続けている。2019年には3.5億台程度、2021年には3.2~3.3億台と予想されており、徐々に減少してきている。全世界コンピュータ出荷台数が6年ぶりの成長を記録したものの、コンピュータ用記録装置ではSSDへの置き換えが進んでおり、今後も減少の見込みである。一方、クラウド向けにはコストが重要なファクターから、大容量化でアドバンテージのあるHDDの存在価値は大きい。2020~2028年でのHDDのテラバイト当たりの価格下落が年率-15%、SSDの価格下落が年率-16%として計算しても、2028年までHDDのテラバイト当たりの価格はSSDの1/10という予想もある⁹⁾。この価格差を維持するには、大容量化を継続的に進めていかななくてはならない。大容量化のための次世代の記録技術として期待されているのは、マイクロ波アシスト記録 (Microwave Assisted Magnetic Recording: MAMR)、熱アシスト記録 (Heat Assisted Magnetic Recording: HAMR)の2つの技術である。記録密度を上げるため小さい記録ビットを記録するには、記録媒体の保磁力を大きくしないと保持できない。一方、保磁力が大きすぎると記録ヘッドだけでは記録ができない。そこで、マイクロ波やレーザーによる外部のエネルギーによって記録時の記録媒体の保磁力を低減させて、記録する手法である。現在のHDDメーカーは合併などにより、Western Digital社、東芝、Seagate Technology社の3社に集約されているが、Western Digital社と東芝がMAMR、Seagate Technology社がHAMRを選択し、研究開発している。Western Digital社は2017年にMAMR方式のHDDのデモ

*3 ↑スピンや↓スピンなどスピンが揃った電流を注入することにより磁性体の磁化を反転させること。

*4 電子のスピンと、電子の軌道角運動量との相互作用であるスピン軌道相互作用を利用して磁化を反転させる方法。

を行い、2019年に製品化することを発表した¹⁰⁾。通常の垂直磁気記録媒体では、1.1 Tbit/in²が上限であるところ、MAMRであると4倍近い4 Tbit/in²まで実現可能としている。東芝もMAMRの第一弾として1.2～1.3 Tbit/in²の商品で2020年頃の製品化を目指している。一方のSeagate Technology社は2016年にはHAMRで2 Tbit/in²の書き込みを実証し、2018年12月にHAMR技術を用いた16 TB HDD (≒ 1 Tbit/in²) のリリースを正式に発表した¹¹⁾。今後、MAMR、HAMRによる製品化が続き、HDDの大容量化の流れは加速しそうである。

さらなる大容量化技術として、多層磁気記録や1つの磁性結晶粒が1つのビットを構成するビットパターンメディアも継続して研究されているが、大きな進展は聞こえていない。

また、従来のHDDとは異なり、ディスクを回転させずに、記録媒体中の磁区情報を移動させる磁性細線メモリーもいくつかの研究グループにより研究がされている。磁区速度400 m/sの実現¹²⁾や、ウォブルをトラックに入れることによるジッター抑制¹³⁾、熱拡散を促進するための酸化層の薄層化¹⁴⁾とさまざまな基礎的な研究が進められている。さらに、キラルな結晶構造^{*5}を持つ磁性体中で渦状の磁気構造をもつ磁気スキルミオンが発見され、安定に存在できることがシミュレーションなどで確認されており¹⁵⁾、実現できれば、消費電力の非常に少ない磁性細線メモリーが実現できる。今後のデバイスへの応用が期待される。(石井)

3.2 磁気テープ

磁気テープストレージシステムは、記録容量の大きさ、可搬性、省電力であることに加え、長期保存に適しているといった観点からデータセンターを中心に利用が進んでおり、今後もさらなる需要増が期待されている。磁気テープストレージシステムの特長の1つとして、低コストである点が挙げられる。これは、メディアの容量単価が低いこと、保管時に電力を必要としないこと等に起因している。ストレージ装置の導入、運用、管理にかかる全コストの指標であるTCO (Total Cost of Ownership) で比較した場合、平均的なテープストレージシステムのTCO (\$2.4 M) は、HDDシステムの1/6になるとの試算もある¹⁶⁾。このため、頻繁にアクセスする必要のない、いわゆるコールドデータのアーカイブ用途として磁気テープが注目されている。また、特にアーカイブ用途のストレージ装置には、長期間にわたって記録されたデータの高い信頼性を保持することが要求される。一般社団法人電子情報技術産業協会 (JEITA) テープストレージ専門委員会の検証結果では、常温下で保管した場合、6 TB/カートリッジの容量を持つ、テープ市販製品LTO7は、少なくとも50年間は信号の読み取り品質に問題がないことが確認されている¹⁷⁾。

*5 「その形状を鏡に映した結晶構造」と「元の結晶構造」を比べた際に重ね合わせることができない性質。

(1) 製品動向

近年の磁気テープストレージシステムは、市場セグメント的にLTOと呼ばれるミッドレンジのオープンシステムと、各社が独自規格で大容量・高信頼性を訴求しているハイエンド向けエンタープライズシステムとに分類され、いずれも多数の記録再生素子を搭載したヘッドを用いたリニア・サーペンタイン走行方式が採用されている。最新のシステムでは、LTOとエンタープライズ製品のいずれも32チャンネルの同時記録再生を可能としており、これによりランダムアクセスを伴わないシーケンシャルなデータの記録再生においては、一般的なニアラインのHDD製品を上回る高い転送速度を実現している。磁気テープ製品で最も普及しているLTOフォーマットでは、2017年10月に1巻あたり12 TBの容量と、360 MByte/sの転送速度 (いずれも非圧縮) を有する第8世代のLTO-8が市場導入された。またこのタイミングでLTOのロードマップもそれまでの第10世代から2世先まで拡張され、第12世代のシステムでは1巻あたりの容量が192 TB (非圧縮) にも達する。なお、現在までに商品化されたカートリッジ容量が最大のシステムは2019年1月にIBMから発売されたTS1160であり、1カートリッジあたりの容量は20 TB、転送速度は400 MByte/s (いずれも非圧縮) である。

(2) 技術デモンストレーションの動向

記録密度や記録容量に関する技術デモンストレーションも継続的に発表されており、ロードマップに技術的な裏付けを与える上で重要な役割を果たしている。近年の技術デモンストレーションのトレンドを図2に示す。図中のA、BはいずれもIBMチューリッヒ研究所のグループによる報告^{18) 19)}であり、Aではバリウムフェライト微粒子塗布型媒体を用いて面記録密度123 Gbit/in²を達成し、対応するカートリッジ容量は220 TBになる。さらに微粒子で良好な磁気特性を示すストロンチウムフェライトの粒子合成に成功した報告もされており²⁰⁾、これらを用いることで塗布型媒体で400 TBまで容量の向上が可能と試算されている。図中の

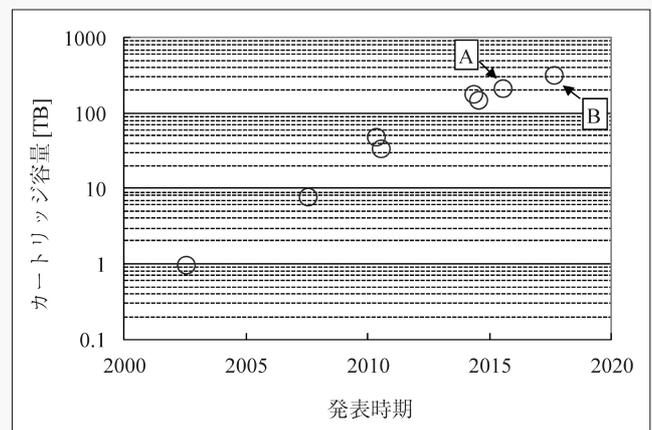


図2 技術デモンストレーションのトレンド

Bはフレキシブル基板上にスパッタ法を用いて垂直ハードディスクと類似の層構成を形成することで、面記録密度201 Gbit/in²を達成したもの¹⁹⁾であり、対応するカートリッジ容量は330 TBにもなる。これらの結果が示すように、磁気テープストレージシステムは、技術的には現行製品の20倍までの容量達成の可能性が確認されており、今後も継続的な大容量システムの製品化が期待される。(武者)

4. 光記録

4.1 光ディスク

光ディスクを取り巻く環境は、次第に変わりつつある。スマートフォンやタブレット端末の普及、ダウンロードやストリーミングといった視聴スタイルの変化により、従来のような光ディスクの使い方は徐々に少なくなってきた。

しかし、それとは別に近年拡大しつつあるのが、長期保存用のデータ記録用途である。また、光ディスクの要素技術を応用した新たな分野への技術展開も多岐にわたってきている。

光ディスクは、これまでは主に映像・音楽データの配布媒体や情報データの記録媒体として使用されてきた。この用途の新たな規格として、ブルーレイディスクアソシエーション(BDA)では、4K/8Kコンテンツの記録再生が可能な次世代放送向け録画用Blu-ray Discの規格であるバージョン5.0を策定し、2018年1月からライセンスを開始した²¹⁾。

この規格は、最大100 Mbpsにもなる4K/8K衛星放送のストリームを録画・再生でき、さらに、8K放送のオリジナル品質の録画にも対応する。4K放送は、従来のBD-R/BD-REでオリジナル品質の記録再生が可能であり、50 GBのBD-R/REの場合、平均のビットレート35 Mbpsであれば、170分程度の録画が可能である。

また8K放送では、ビットレートが最大で100 Mbpsにも達するため、新たなファイルシステムを採用し、4倍速以上のBD-Rメディアを用いることで記録再生を可能とした。コンテンツの平均ビットレートが100 Mbpsの場合、100 GBのBD-R XLを用いれば2時間以上の録画が可能である。

さらにこの規格において、MPEG-4 AAC (Moving Picture Experts Group4-Advanced Audio Coding)、およびMPEG-4 ALS (MPEG-4 Audio Lossless Coding) 音声コーデックもサポートしている。加えて、新4K/8K衛星放送で導入されるMMT/TLV (MPEG Media Transport/Type Length Value) 多重化方式、HDR (High Dynamic Range) 方式にも対応した。また高精細なコンテンツの著作権を保護するためにAAC2 (Advanced Access Content System2)を採用している。

この規格のもう1つの特徴として、1枚のディスクに従来のBlu-ray規格のコンテンツと新しい規格のコンテンツを混在して記録することができるようにした。これによりユーザの利便性を図っている。今後、この規格に対応したBD製品が市場に登場する。

次に、光ディスクの新たな市場が広がりつつあるデータの長期保存の分野について説明する。

「コールドデータ」とは、頻繁なデータアクセスは発生しないが、後から再活用できるように長期間保存されるデータのことである。このようなデータは、ビッグデータやIoT、AIの分野の発展に伴い需要が拡大している。

そのような状況の中、ソニーとパナソニックが開発しているArchival Discは、ライトワンス記録の光ディスクであり、改ざんと誤消去の抑止、メディア寿命100年とする高信頼性、およびHDDと比較して消費電力が少ないという特徴を持つ。このディスクは、2014年から300 GBの第1世代の製品を販売しており、2018年度内に500 GBのディスクの開発を完了する予定である。今後、さらに大容量化を進め、1 TBのディスク容量の研究を進めている。

パナソニックでは、Archival Discを組み込んだデータアーカイブシステム「freeze-ray」を製品化している。このシステムは、1ラックあたり最大532本のマガジンが搭載できるため、ラックあたりの記録容量は最大で1.9 PBを実現している²²⁾。

コールドデータの需要は、2017年度は3000億円程度だが、21年度にはその約3倍に成長すると見られている。特に中国では、クラウドの活用が広がり、データセンターにエクサバイト級のコールドデータを長期保存する需要が高まっている。今後、この市場において、光ディスクはその特徴を活かして、HDDや磁気テープとの住み分けが重要になる。

続いて、光ディスクの要素技術の応用について述べる。

光ディスクシステムには、レーザー光の発光を高速に切替える技術や、高速に回転するディスクとピックアップを高精度に制御するサーボ技術などのさまざまな技術が盛り込まれている。そして、これまでの光ディスクシステムの研究開発により培われた要素技術を、別の分野に展開する研究が進められている。

ソニーでは、地上から500～1,000 km離れた宇宙ステーションへのデータの通信技術に、光ディスクのレーザー制御技術を用いる研究を行っている²³⁾。高速で回転する光ディスクの超微細な溝から精緻に情報を読み取る技術を用いて、高速で移動する人工衛星間で、非常に細いレーザー光を正確に捕捉し追尾する技術であり、今後、実証実験を行う計画である。また、ソニーでは早くからバイオ・メディカル分野にも光ディスクの技術を応用しており、細胞分析装置の製品化を行っている²⁴⁾。

医療分野では、JVCケンウッドが、光ディスクの技術とナノビーズ技術を融合させ、がん診断等に発展させる新技術として研究が進められている²⁵⁾。

このように光ディスクは、従来の利用分野の環境の変化に応じつつ、その特徴を活かした新たな分野でも市場拡大を目指している。(川前)

4.2 ホログラムメモリー

ホログラムメモリーでは、ページデータと呼ばれるデジタルデータを2次元に配列したデータアレイを用いて、多数のデータを一括して記録、再生している。また、記録媒体への光の入射条件を変えることによりページデータを多重記録することができる。このような特徴により、ホログラムメモリーは大容量・高データ転送速度の光記録装置として期待され、プロトタイプドライブも開発された。それ以降も更なる高密度化や高データ転送化のための研究が継続的に進められており、さらに新たな試みとしてディープラーニングを利用した研究が報告された。

高密度記録でコンパクトなホログラムメモリー装置に向けた多重記録方式として、参照光は球面波とし、信号光と参照光がなす平面上にある回転軸で記録媒体を回転させて多重記録するペレストロフィック多重、記録媒体を水平、垂直方向に移動しながら多重記録するシフト多重を組み合わせたクロスシフト多重方式が開発された。これらの多重記録方式を組み合わせるにより、記録容量1TB/120mmディスクの見通しを確立できたとしている^{26) 27)}。従来の3次元クロスシフト多重方式と比較して、ペレストロフィック多重と直交する回転軸のチルト多重をなくし、垂直方向のシフト多重を追加した。記録容量は少なくなるものの、コンパクトなホログラムメモリー装置に適しているとしている。

これまで実用化を目指した研究や開発されたプロトタイプドライブでは、振幅2値のページデータを用いて記録、再生が行われてきた。さらなる記録密度やデータ転送速度の向上を目指して、データの多値化が検討されている。この方式として、データの振幅を多値化する振幅多値記録と、位相を多値化する位相多値記録が報告された。

振幅多値記録については、4値データの記録再生実験が報告された²⁸⁾。振幅多値記録の変調方式として、元の信号のデジタルデータ列10ビットを9シンボルデータで表す10:9変調が提案された。各シンボルデータは振幅レベルが0, 85, 170, 255の4値のいずれかであり、9シンボルデータのうち輝点(振幅レベルが0以外)は3つとしている。3輝点のうちの1つは必ず255となるように設定し、再生データの振幅レベル判定時に正規化するときの基準値としている。さらに、シンボルデータ間干渉を低減するために、シンボルデータ間に黒を挿入したページデータの構造が提案された。この変調方式とページデータ構造を用いることにより、再生データにおいて振幅4値を分離できたことが示されている。また5ページの角度多重記録において再生データの誤り率が 1×10^{-2} 程度以下となり、空間結合LDPC (Low Density Parity Check) 符号で符号化したデータを用いた場合、復号後にエラーフリーになることを確認したとしている。

位相多値記録については、空間光変調器とバリアブルリターダーを用いて、0, $\pi/2$, π , $3\pi/2$ の4値データの位相

多値記録が報告された^{29) 30)}。データの再生時には局部発振光を用いてホモダイン検出*6を行う。再生された位相情報に含まれる位相歪みを取り除くために、空間差分符号と波面推定からなる新たな手法を提案した。空間差分符号は、もとの信号 A_i に対して、符号化信号 ϕ_i を $\phi_i = \phi_{i-1} + A_i$ とする。復号する場合、もとの信号 A_i は $A_i = \phi_i - \phi_{i-1}$ で計算できる。光学系の収差、空気中の屈折率変動、記録媒体の収縮などの低周波成分の位相歪みは空間差分符号で取り除くことができる。一方、高周波成分の位相歪みは累乗位相推定法による波面推定で除去する。検出された空間光変調器の各画素の位相は信号位相と位相歪みの和であるため、検出された複素振幅の累乗を用いて位相信号を取り除くことにより、位相歪みを求めることができる。また、再生光と局部発振光の入射角度により縞模様が再生データに重畳され、これが位相ノイズとなる。この位相ノイズを除去するために、全面が同じ位相のページを記録しておき、再生光と局部発振光との干渉縞が少なくなるようにディスクの位置を調整する。この状態でページデータを再生することにより、ノイズを除去して位相データを得ることができる。これにより4値の位相信号を正しく検出できたとしている。

また、4値データの位相多値記録において、時間差位相検出を適用して、強度変動や空間的な位相変動に対して堅牢な位相検出方法が提案された³¹⁾。記録再生する位相データは2つのページデータの位相の差分として構成とする。位相情報の検出にはホモダイン検出を利用する。4値の位相情報を一括して得るために、4つのカメラを利用し、それぞれのカメラの前にそれぞれの位相が取得できるように光学系を配置している。それぞれのカメラで2つのページデータを撮影して、その差分から位相データを検出する。シミュレーションにより、4値の位相データはノイズが少なくなる 45° , 135° , 225° , 315° としている。従来のホモダイン検出と比較して位相エラーが低減できることが示されており、堅牢な位相データの検出が可能であるとしている。

近年さまざまな分野で急速に導入されているディープラーニングをホログラムメモリーに適用する方法が提案された。畳み込みニューラルネットワーク (Convolutional Neural Network: CNN) を用いることにより、ホログラムメモリーから再生されたデータを低い誤り率で復調できる技術が提案された³²⁾。ホログラムメモリーの光学系には、再生データを復調する時に誤りの原因となるさまざまな光学ノイズが存在する。そこで、記録するページデータと再生されたページデータを事前にCNNに入力し、光学系の特性と変調アルゴリズムを同時に学習させ、この学習した結果を新たな再生データに適用することで、ノイズの特性を踏まえたデータの復調を行った。振幅2値のページデータにおいて、実際のホログラムメモリー光学系からの再生データを用いて学習させ、学習データとは別の未知の再生デー

*6 二光波間の干渉を利用して光情報を得る位相変調方式における光検波。

タを復調したところ、一般的に用いられる硬判定手法*7と比較して、復調後のデータの誤りを約60%低減できている。さらに、シミュレーションでは、振幅4値の多値データにおいて、硬判定手法と比較して誤りを1/10に低減できることが示されている³³⁾。

また、ニューラルネットワークに基づくディープラーニングを用いたホログラムディスクのラジアル方向とタンジェンシャル方向のチルトサーボ技術が提案された³⁴⁾。ニューラルネットワークの入力は16分割した再生像、出力はラジアル方向とタンジェンシャル方向のチルトとして、再生像とチルトの関係を学習する。現状ではページデータではないが、実験によりチルト制御が可能であることが示されている。

ホログラムメモリーは、更なる高記録密度化、高データ転送速度化のための基礎技術の研究が継続して行われ、またディープラーニングのような新しい技術の導入も進んでいる。大容量・高速データ転送速度の記録装置として今後の進展が期待される。(室井)

5. ストレージシステム

5.1 ストレージインタフェース

コンピュータの標準バスインタフェースであるPCIExpressは、1レーンあたり2GByte/sの帯域を持つ第4世代が2017年に公開され、FPGAなど徐々に製品が出始めている。また、公開と同時に第5世代の規格化が始まり、2019年内の作成完了を目指している。第5世代では第4世代の2倍、1レーンあたり4GByte/sの帯域の実現を目指している。

外付けのインタフェースも高速化が進んでいる。FiberChannelでは、2016年には型番32 GFCの約28Gbpsであったが、2017年には約57.8Gbpsの型番64 GFCが規格化され、2019年には製品が販売される予定である³⁵⁾。Ethernetベースのストレージネットワークは、10Gbitのスイッチ、アダプターの価格低下により普及が進んだ。特に10Gbase-Tのスイッチは8ポートで10万円を切る製品も市販されている。また、スイッチはまだ高価であるが、40Gbit、100Gbitのアダプターの価格も下がっており、容易に利用できるようになっている。

一方、InfiniBandはハイパフォーマンス・コンピューティング市場に注力しており、1レーンあたり50Gbpsの製品が利用できるようになった。2020年以降は、100Gbpsの開発が進む。

また、NVMeを長い距離を隔てて、マザーボードやドライブレベルのNVMeコマンドを実行するNVMe over Fabricsの利用が進み始めている。NVMe over Fabricsでは、FiberChannel、TCP/IP、InfiniBandの使用形態がある。TCP/IP方式で(NVMe-oFTM)規格Version 1.0準拠のスト

レージの試作³⁶⁾がされており、今後大きな流れとなる可能性がある。

5.2 ストレージシステム

ストレージシステムは大きく3つに分けることができる。1つ目はブロックストレージである。最も古い、最も簡単な形式で、データベース管理システムなどのアプリケーションがストレージの論理ボリュームを固定長の区画(ブロック)で管理し、データをどのブロックに配置するかを制御する手法であり、メタデータが存在しない。2つ目はファイルストレージである。論理ボリュームの領域をディレクトリーやフォルダで階層化して、サイズが一律でないファイルを容易に扱えるようにする仕組みで、NAS(Network-Attached Storage)が代表例である。ディレクトリー構造が一種のメタデータの役割を持つ。3つ目は、オブジェクトストレージである。近年大きく増加しているストレージで、ファイル自体にメタデータを付属させフラットなアドレス空間に格納される。オブジェクトの格納数には制限なく、スケールアウトが簡単という特徴を有する。一方で、データ更新のレイテンシーが高く更新の頻繁な用途には向かないため、利用用途として「アーカイブ」や「利用頻度の低い静的ファイルの保管先」が挙げられる。また、ディスク障害時のデータ信頼性を担保する仕組みが必要となるため、オブジェクトの複製(Replication)または消失符号(Erasure Coding)を用いた冗長化手法により、ストレージシステム全体で冗長性を持つ仕組みを取っている。近年オブジェクトストレージ市場はビッグデータの増加に応じて大きくなっており、2021年の国内市場は1,431億8,600万円、2016年から2021年の年間平均成長率は10.5%と予想されており³⁷⁾、今後も大きな拡大が望める市場である。(石井)

6. むすび

IoTの普及が進み、それに伴ってビッグデータの蓄積量が年々増加している。このデータを保存するメモリーの重要性もデータ量とともに大きくなってきており、この需要の受け皿として半導体メモリーの研究開発が非常に活発である。一方、図1中のHDDやオフライン用のメモリーでは研究開発が活発かというそれほどでもない印象である。しかし、増加したビッグデータの保存は一時的には上部の半導体メモリーとなるが、徐々に重要度が薄れてきて、階層化の下部に落ちてくる。この時の受け皿を充分果たせるような研究開発が望まれる。また、今後のストレージでは、これらのデータ保存に関してコストという意識がより高まってくるとと思われる。今後は高速、大容量だけでなく、圧倒的に安価なメモリーなどこれまでにない機能や特徴をもつ新たなストレージメディアが実用化されることを期待したい。(石井)

(2019年1月29日受付)

*7 あるしきい値で0か1かを判定する手法。

〔文 献〕

- 1) <https://www.seagate.com/jp/ja/our-story/data-age-2025/>
- 2) <https://www.skhynix.com/eng/pr/pressReleaseView.do?seq=2588&offset=1>
- 3) <https://www.intel.co.jp/content/www/jp/ja/products/docs/memory-storage/optane-persistent-memory/what-is-intel-optane-dc-persistent-memory-video.html>
- 4) <https://www.westerndigital.com/products/data-center-drives/ultrastar-dc-me200-memory-extension-drive>
- 5) N.H.D. Khang, Y. Ueda and P.N. Hai: "A conductive topological insulator with large spin Hall effect for ultralow power spin-orbit torque switching", *Nature Materials*, 17, pp.808-813 (2018)
- 6) <http://ja.nantero.com/nantero-expands-nram-product-development-signs-new-customers/>
- 7) M. Nakayama: "ReRAM technologies: Applications and outlook", 2017 IEEE International Memory Workshop (IMW 2017), pp.68-71 (2017)
- 8) https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_100977.html
- 9) <http://investor.wdc.com/static-files/2697d98d-f456-4f32-af51-4a377c99bf6.pdf>
- 10) <https://www.westerndigital.com/company/newsroom/press-releases/2017/2017-10-11-western-digital-unveils-next-generation-technology-to-preserve-and-access-the-next-decade-of-big-data>
- 11) <https://blog.seagate.com/craftsman-ship/hamr-milestone-seagate-achieves-16tb-capacity-on-internal-hamr-test-units/>
- 12) P. Thach, B. Do, S. Sumil and H. Awano: "Fast current-induced domain wall motion in symmetric ferrimagnetic Tb-Co alloy wires", *Joint MMM-Intermag conf.*, GN-10, p.739 (2019)
- 13) 近藤, 島田, 門, ミカエル, 大寺, 梅津, 橋本, 中村: "Co/Ni細線内磁壁位置制御技術と磁気シフトレジスタへの応用", *映情学技報*, 41, 34, pp.13-16 (2017)
- 14) Y. Miyamoto, M. Okuda¹, M. Kawana¹ and N. Ishii: "Influence of Heat Accumulation in Surface Oxidized Silicon Layer for Current-driven Domain Wall Motion in [Co/Tb] Magnetic Nanowires", *joint MMM-intermag conf.*, GN-01, p.734 (2019)
- 15) 小椎八重: "磁気スキルミオンの制御に関する理論的研究", *映情学技報*, 42, 15, pp.61-62 (2018)
- 16) "INSIC's 2015-2025 International Magnetic Tape Storage Roadmap", 1.0: Applications & Systems Roadmap, <http://www.insic.org/news/2015%20roadmap/15pdfs/2015%20Systems%20and%20Applications.pdf> (accessed Jan. 17, 2019)
- 17) "LTO 7テープメディアの寿命評価Revision: 1", JEITA情報産業システム部会テープストレージ専門委員会, https://home.jeita.or.jp/upload_file/20190108152636_yKSGfVlix.pdf (accessed Jan. 17, 2019)
- 18) M. Lantz, et al.: "123Gbit/in² Recording Areal Density on Barium Ferrite Tape", *IEEE Trans. Magn.*, 51, 11, #3101304 (Nov. 2015)
- 19) S. Furrer, et al.: "201Gb/in² recording areal density on sputtered magnetic tape", *IEEE Trans. Magn.*, 54, 2, Art No.3100308 (July 2018)
- 20) "富士フイルム, 記録容量66倍の新材料磁気テープ向け", *日本経済新聞*, 2017.7.5朝刊
- 21) <https://www.phileweb.com/interview/article/201712/22/521.html>
- 22) <https://www.nikkan.co.jp/articles/view/00495524>
- 23) <https://www.nikkei.com/article/DGXMZO3059065016052018XY0000/>
- 24) <https://www.sony.co.jp/SonyInfo/News/Press/201206/12-081/>
- 25) http://www.jvckenwood.com/press/2018/07/press_180719.pdf
- 26) M. Yamamoto, S. Horiuchi, A. Fukumoto and Z. Mu: "High density and compact holographic data storage system", *Technical Digest of IWH'18*, pp.60-61, SaO2 (2018)
- 27) S. Horiuchi, A. Fukumoto and M. Yamamoto: "Analysis of cross-talk-free conditions for a cross-shift multiplexing method in holographic data recording", *Appl. Opt.* 57, pp.7805-7810 (2018)
- 28) T. Muroi, Y. Katano, N. Kinoshita and N. Ishii: "Superimposed Spatial Guard Interval on Data Page for Reducing Inter-Symbol Interference in Amplitude Multi-Level Recording Holographic Memory", *Technical Digest of ISOM'18*, Mo-C-03 (2018)
- 29) T. Utsugi: "Spatial Differential Encoding and Wavefront Estimation for Phase Multi-level Holographic Data Storage", *Technical Digest of ISOM'17*, Tu-G-02 (2017)
- 30) T. Utsugi, M. Sasaki, K. Ono and Y. Tada: "Development of Phase Multi-level Holographic Data Storage System", *Technical Digest of ISOM'18*, Tu-H-01 (2018)
- 31) K. Yamazaki and M. Yamaguchi: "Environmentally Robust Phase Detection for Holographic Data Storage", *Technical Digest of ISOM'18*, Tu-J-09 (2018)
- 32) Y. Katano, T. Muroi, N. Kinoshita and N. Ishii: "Image Recognition Demodulation Using Convolutional Neural Network for Holographic Data Storage", *Technical Digest of ISOM'17*, Tu-G-04 (2017)
- 33) Y. Katano, T. Muroi, N. Kinoshita and N. Ishii: "Demodulation of Multi-Level Data Using Convolutional Neural Network in Holographic Data Storage", *DICTA 2018*, P3.5 (2018)
- 34) J. Kim and H. Yang: "Intelligence control system based on deep learning method in holographic data storage system", *Technical Digest of ISOM'18*, Tu-J-18 (2018)
- 35) <https://fibrechanel.org/roadmap/>
- 36) <https://business.toshiba-memory.com/ja-jp/company/news/news-topics/2018/08/corporate-20180807-1.html>
- 37) <https://www.idc-japan.co.jp/Press/Current/20180411Apr.html>



石井 紀彦 1993年, 慶應義塾大学理工学研究科修士課程修了。同年, NHKに入局。放送技術研究所に勤務。光磁気メモリー, 光通信デバイス, 光ディスク媒体, ホログラムメモリーの研究に従事。現在, 放送技術研究所上級研究員, 博士(工学), 正会員。



武者 敦史 2007年, 東京大学大学院総合文化研究科博士前期課程修了。同年, 富士フイルム(株)入社。記録メディア研究所に勤務。バリウムフェライト磁気テープの開発に従事。博士(工学), 正会員。



川前 治 1988年, 九州芸術工科大学芸術工学部音響設計学科卒業。同年, (株)日立製作所家電研究所入所。主に光ディスクドライブ, 光ストレージシステムの開発に従事。現在, マクセル(株)光エレクトロニクス事業本部副技師長, 正会員。



室井 哲彦 2002年, 電気通信大学大学院電気通信学研究科博士後期課程修了。同年, NHK放送技術研究所Post Doctoral Fellow。2004年, NHK入局。放送技術研究所に勤務。冷陰極ディスプレイ, ホログラムメモリーの研究に従事。現在, 放送技術研究所主任研究員, 博士(工学), 正会員。