

## マルチメディアストレージの研究動向

宮下英一<sup>†1</sup>, 清水 治<sup>†2</sup>, 多田行伸<sup>†3</sup>, 木下延博<sup>†1</sup>

## 1. まえがき

現在, DRAM, フラッシュメモリーに代表される半導体ストレージデバイス, ハードディスク (HDD) および磁気テープなどの磁気記録デバイス, 光ディスク, ホログラムメモリーなどの光記録デバイスが, 広く利用されている. ストレージシステムでは, 種々のストレージデバイスは, その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. 近年では, CPU キャッシュとDRAM, DRAMとフラッシュメモリーの間の速度差がコンピュータの処理性能のボトルネックになってきており, その間を埋めるような更なる階層化が進められつつある.

本稿では, 最近2年間におけるデータストレージについて, 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解説する.

## 2. 半導体メモリー

## 2.1 DRAM (Dynamic Random Access Memory)

CPUクロックと外部メモリークロックには大きな差があるため, CPUにはキャッシュメモリーが内蔵され, その性能差を低減している. しかし, 巨大データベースやハイパフォーマンスコンピューティングの分野では, メモリー帯域がパフォーマンスのボトルネックとなってきている. そのため, DRAMダイをSi貫通ビア (Through-Silicon Via: TSV) により4層程度スタックして, メモリー帯域を広げたHBM (High Bandwidth Memory) が考案され, SKハイニックス, サムソンが製品化を進めている. 初期のHBMは, 冷却の問題などによりスタックではなく2.5次元シリコンインターポーザで実装される見込である. 発表されたHBMは, 1024 bitのインタフェースで接続され, 128 bit ×

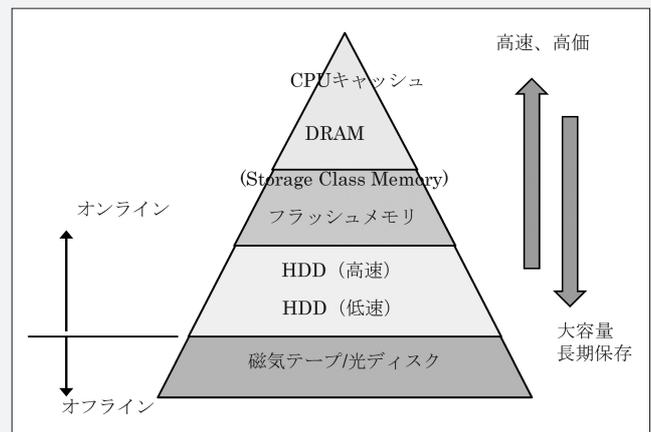


図1 メモリーの階層構成

8chで動作する<sup>1)</sup>. マイクロンからは同様の考えで, HMC (Hybrid Memory Cube) と呼ばれるDRAMチップが2013年に製品化された. 専用のコントローラ上に4Gbit DRAMチップを4枚積層し, TSVとマイクロバンプで各チップを3次元接続した構造をしている. この2GB HMCチップは, プロセッサ-HMC間のバンド幅が160 GB/s, ビット当たりの消費電力をDDR3 SDRAMモジュールに比べて70%削減できるとしている<sup>2)</sup>. 2014年にはDRAM8枚を積層した4GB品の量産が開始される予定である. HBMとHMCはどちらもTSVを用いてDRAMチップを3次元積層し, 帯域を広げようとするメモリーである. 適用範囲はHBMの方が広いと言われているが, 用途に応じて棲み分けがされると予想されている.

DRAMをスタックする技術として, 慶応大から, 磁気結合を利用したDRAMチップ間の近距離ワイアレスインタフェースの発表があった<sup>3)</sup>. データ転送速度が352 Gbit (44 GB)/秒とWide I/O 2世代の転送速度相当で, 製造コストはTSVを使う場合に比べて約40%低減でき, 次世代規格となるLPDDR4のDRAMとSoC (Silicon on Chip) を積層する場合に比べて, 消費電力を約80%低減できると報告された.

米国のBeSang社は, 「True 3D」チップと呼ばれるTSVを使わない3次元積層技術を開発し, SKハイニックスへの

<sup>†1</sup> NHK放送技術研究所 新機能デバイス研究部

<sup>†2</sup> 富士フイルム株式会社 記録メディア事業部 記録メディア研究所

<sup>†3</sup> 株式会社日立エルジーデータストレージ

"ITE Review 2015 Series (3): Trend of Data Storage Device and Technology" by Eiichi Miyashita and Nobuhiro Kinoshita (Science & Technology Research Laboratories, NHK Broadcasting Corporation, Tokyo), Osamu Shimizu (Recording Media Research Laboratories, FUJIFILM Corporation, Odawara), Yukinobu Tada (Hitachi LG Data Storage, Ltd., Yokohama)

ライセンス提供を始めた<sup>4)</sup>。TSVプロセスが不要なため、既存の設備で低温プロセスで製造可能で、高密度実装が可能であるとして注目される。

## 2.2 フラッシュメモリー

フラッシュメモリーの大容量化技術として、1セルに記録するビット数の多値化が進められた。出荷量では2bitセルのMLC-NAND (Multi-Level Cell) が市場の大半を占めているが、更なる低価格化を図り、3bitセルのTLC-NAND (Tri-Level Cell) を採用したSSDがサムソンを始め、いくつかのメーカーから製品化された。記録速度や書換え回数はMLCに劣るが、コスト面で有利となる。また、独自のNANDコントローラにより信頼性も従来と同等性能を確保している。

微細化プロセスの進展の鈍化に伴い、今後の大容量化を進めるに当たり、二つの路線で大容量化が進められている。一つは2次元プロセスの更なる微細化で、各社から19nmプロセスのフラッシュメモリーが製品化され、16nm世代のプロセスでマイクロンが128 Gbit、SKハイニクスは64 Gbitのチップを発表した。もう一つは素子の3次元化で、サムソンは3次元化への移行をいち早く進め、2013年に3次元NANDフラッシュ「V-NAND (Vertical NAND)」の開発に成功し、量産品の供給を始めた。第一世代のチップスペックは、24層のV-NAND構造で、面積が133 mm<sup>2</sup>の128 Gbitチップであり、ビット密度は0.96 Gbit/mm<sup>2</sup>と業界最高の値と発表された<sup>5)</sup>。信頼性についても、エンタープライズを想定した36 Mbpsの記録速度で書換え回数3万5千回、組み込み用途を仮定した50 Mbpsの記録速度では書換え回数3千回を実現している。しかしながら、コスト面では従来型より高価になるとみられており、コスト面で優位になるのは、第2または第3世代のV-NANDからとされる。

フラッシュメモリーデバイスのインタフェースでも進展があった。SSDに使われるSATAは第3世代で6 Gbpsの帯域であるが、ハイエンドではSASの12 Gbps、またはNVMe (NVM express) と呼ばれるPCIexpressインタフェースを持つ2.5インチSSDも製品化され、サーバ用で採用が始まっている。組み込み用途では、コントローラとNANDを積層してワンチップ化されたeMMC (embedded Multi-Media Card) チップが普及しているが、MMCインタフェースは8bitパラレルバス構成のため、高速化が難しいという課題があった。このため、eMMCの後継規格としてUFS (Universal Flash Storage) が規格化され、東芝からUFS2.0インタフェースを持つ64 GBのチップが発表された<sup>6)</sup>。UFS2.0では、1レーン5.8 Gbpsのシリアルバスを2レーンまで利用でき、eMMCv5.0の400 Mbpsから3倍以上の11.6 Gbpsの帯域が確保できるようになった。また専用の新しいコントローラを内蔵し、ランダムリードで66.3 KIOPS (Input/Output Operations Per Second)、シーケンシャルリードで690 Mbpsを達成しており、今後の

組み込み機器の性能向上が期待される<sup>7)</sup>。

中央大からは、NANDを長期保存メモリーとして使える技術の発表があった<sup>8)</sup>。TLC方式のNANDにおいて、8レベルから各レベル間の距離などを最適化した7レベルで記録を行うことでビットエラーレートを80%低減でき、100年以上の保存の可能性を示した。

## 2.3 その他の半導体メモリー

先にも述べたように、DRAMとSSDには記録性能に大きな差があり、その性能差を吸収するため、ストレージクラスメモリーと呼ばれるメモリーが提案されている。ストレージクラスメモリーには、フラッシュメモリーほどの大容量性はないが、ランダムアクセスが早いReRAM (Resistance Random Access Memory) とPRAM (Phase change Random Access Memory) がこの候補として期待され、実用化に向けた研究が進んでいる。2012年にDRAMより大容量になる8 GbitのPRAMがサムソンから発表され、PRAMが性能面でリードしていたが、消費電力などによる課題があり、その後の大容量化はあまり進んでいない。一方、ReRAMは急速に大容量化が進展し、2013年にはISSCCで、サンディスクと東芝が32 Gbitの2層クロスポイント構造のReRAMを発表した。このReRAMは大容量ではあったが、読出し、書込みのレイテンシーが40  $\mu$ s、230  $\mu$ sと大きく、高速化に課題があった。2014年には、マイクロンとソニーから27 nm世代プロセスで16 GbitのReRAMが発表された<sup>9)</sup>。このチップは、1 GB/sのDDRインタフェース、8バンクで構成され、高速化が図られた。読出し1 GB/s、書込み200 Mbpsの転送速度を実現し、レイテンシーも読出し、書込みが2 ms、10 msと高速化された。記録素子はCuTe膜と絶縁膜で構成され、Cuイオンの移動により抵抗変化を発生させる。メモリーセルは、一つの選択トランジスタと抵抗素子から成り、チップ面積は168 mm<sup>2</sup>である。DRAMを超える容量でNANDを超える高速性が兼ね備えられたメモリーとなり、ストレージクラスメモリーとしての実用化が期待される。

スピン注入磁化反転を利用したMRAMであるSTT-MRAM (Spin Transfer Torque Magnetic Random Access Memory) の開発も進んでいる。STT-MRAMは、磁界書込みMRAMをDRAM並みの記録密度で、DRAM以下の消費電力を実現できるメモリーとして期待されている。このSTT-MRAMは、まずキャッシュメモリーとして実用化が進められた。CPUの最下層(3次または4次)のキャッシュメモリーであるラストレベルキャッシュメモリー (Last Level Cache: LLC) は、大容量化が進んでおり、低消費電力化が求められている。従来、LLCにはSRAMが用いられてきたが、SRAMは、待機動作時も電力を消費し、プロセッサの平均消費電力に占める消費電力の割合が大きい。そこで、容量の大きいLLCを、待機時の消費電力が不要でPRAMやReRAMのような書換え可能回数の制限もなく、

高速動作が可能なSTT-MRAMで置き換える試みがなされた。東芝は、製造プロセスを改善し、記憶素子の磁気トンネル接合を微小化することで、書き込み電流値を低減し、メモリーセルを微細化した。このメモリーをキャッシュに使うことで、SRAMに比べて消費電力を60%低減した<sup>10)</sup>。

また産総研からは、新しい動作原理を用いた相変化メモリーTRAM (Topological-switching Random Access Memory) が発表された<sup>11) 12)</sup>。相変化メモリーでは通常GeSbTeで記録膜が形成されるが、TRAMではGeTe/Sb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>をユニットとした超格子膜構造としている。相変化メモリーでは、電流によるジュール熱で膜を熔融させ、急冷と徐冷により結晶と非晶質とを変化させ抵抗変化を起こさせるが、記録時の消費電力が大きいことが課題であった。TRAMでは、超格子膜に電界を印加し、Geイオンの移動により膜構造を変えることで抵抗変化を実現しており、ジュール熱による書き込み比べて消費電力を大幅に低減した。新しい素子は、大容量化にも適しており、SSDなどへの応用が期待される。

固体メモリーでは、その他に新しいメモリーも提案されている。台湾国立大では、インクジェット技術を用いて、紙の上にTiO<sub>2</sub>とAgのパターンを形成し、ReRAM回路の動作に成功している。コストが安く、大量生産できるため、使い捨てのメモリーに応用できる。また、紙であるため、シュレッダーでデータを破棄することができるというメリットもある。スタンフォード大からは、シリコンではなくカーボンナノチューブを用いてクオーツウエハ上でトランジスタを作製し、シリコンウエハへ乗せかえることで安価な設備で微細化チップを作製できる技術が発表された。

### 3. 磁気記録

#### 3.1 ハードディスク (HDD)

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、微減を続けている。2015年は5億台を超える程度の出荷が予想されている。パソコンの出荷台数の低減の要因が大きい、SSDを搭載するノートPCの増加による影響もある。一方、クラウド向けのニーズは増加傾向にあり、大容量化のニーズは続いている。

HDDでは、高速化の研究はほとんどされなくなっており、大容量化に向けた研究に集中されている。大容量化の新技術として、①瓦書き記録 (Shingle Writing)、②熱アシスト記録、③マイクロ波アシスト記録、の研究が進められた。瓦書き記録は、図2のように、従来型の記録ヘッドを用いて、重ね書き記録を行い、狭トラック幅のヘッドで再生することで、高密度記録を実現する技術である。重ね書きを行うため、重ね書き記録領域では、上書きする場合、SSDでの上書きと同様に、一度メモリー上にデータを読み込んでデータを書換え、重ね書き記録領域を再度書込む必要がある。このため、ランダムアクセスには不向きな記録方式である。しかしながら、従来技術に近い記録方式のため最も早く実

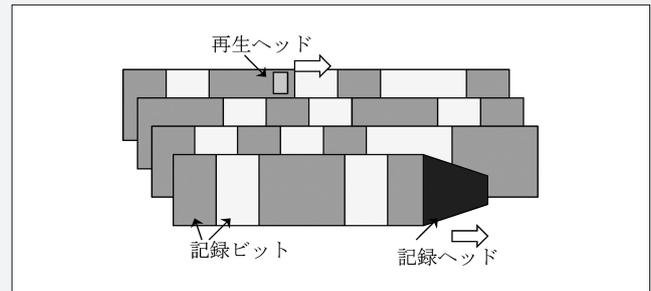


図2 瓦書き記録の原理

用化され、2014年に瓦書き記録でのドライブの製品が発表された。シーゲートからは容量8 TBの3.5インチHDDが「Archive HDD」として2015年初頭より販売されると発表された<sup>13)</sup>。主なスペックは、キャッシュ容量が128 MB、平均データレート (リード/ライト) が150 MB/s、連続データレート (リード) が190 MB/s、消費電力が動作時7.5 W、アイドル時5 W、スタンバイ/スリープ時1 W以下、重量が780 gである。HGSTからは、3.5インチで8 TBのHDDが販売されており、10 GB品の製品も発売された<sup>14)</sup>。このHDDは、ドライブ内にヘリウムガスを充填し、完全シールドしており、通常の空気に比べてディスク回転の安定性に優れ、エンタープライズ用のニアラインストレージ製品向けとされる。8 TB品のスペックは、ディスク7枚構成、連続データ転送レート200 MB/s、消費電力がアイドル時5.1 W、記録再生動作時7.4 Wである。

次世代の大容量記録方式として、マイクロ波アシスト記録、熱アシスト記録の研究が進められた。双方ともエネルギーアシスト記録方式と呼ばれ、原理的には書き込み時に、マイクロ波による磁気共鳴、またはレーザーにより媒体を加熱することで媒体を昇温し、保磁力を一時的に下げることによって記録を行う方式である (図3)。熱アシスト記録は、磁界勾配での記録方式と熱勾配での記録方式が検討されたが、熱方式で記録を行う方式がより高密度な記録方式として期待されている。マイクロ波アシスト記録では、マイクロ波を発生するスピントルクオシレータ (STO) の開発が進められ、一部試作も始められている。しかしながら、実際の媒体への記録再生はまだ進んでいない状況である。一方で、熱アシスト記録の方は、レーザー光を一体化した磁気ヘッドをTDKが開発し、2012年には1.5 Tbit/inch<sup>2</sup>での記録再生に成功している。その後、2013年、2014年にはCEATECでHDDのプロトタイプを試作し、熱アシスト記録のデモンストレーションが展示された<sup>15) 16)</sup>。TDKからは、2016年を目標に実用化を目指しているとの発表がされており、今後のHDDの大容量化技術として期待される。

また、パターン媒体も大容量化技術の一つとして研究が進められている。シミュレーションでは、数Tbit/inch<sup>2</sup>の記録の可能性は示されているが、現行のグラニュー媒体

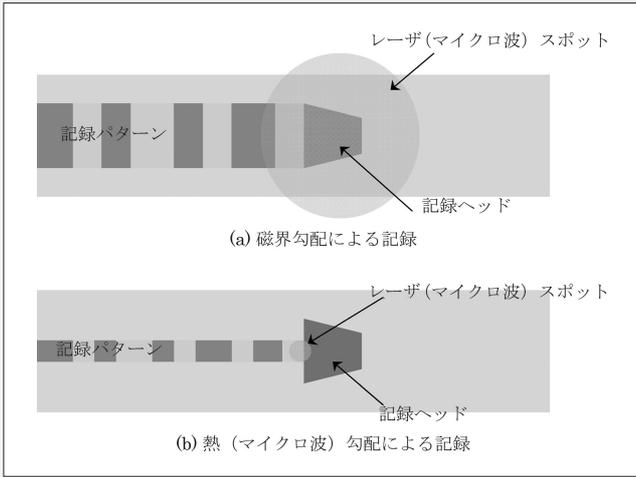


図3 エネルギーアシスト記録の原理

を超えるような記録密度で記録再生ができたという報告はいまだなされていない。実用化には、信号処理やサーボ方式を含めた研究の進展が待たれる。

強誘電体を用いたハードディスクを開発する試みもなされている。強誘電体を用いた記録は古くから研究されていたが、表面分極電荷が自由電子により中和されるため、高密度で記録されたビットを読出すことが困難であった。そこで、東北大では、表面誘電率を高精度で検出できるプローブを開発し、サブナノメートルの分解能での検出に成功した。このプローブを用いた強誘電体の記録実験装置で、面記録密度2 Tbit/inch<sup>2</sup>相当の高密度で、記録の可能性を示した<sup>17)</sup>。

(宮下)

### 3.2 磁気テープ

磁気テープストレージシステムは、膨大なデータを確実にかつ安価に保管可能なシステムとして定着している。近年も、継続的に開発が進められ、着実にその容量を向上させてきているものは、リニアテープシステムと呼ばれるものである。これらは、16～32 chの多チャンネル磁気ヘッドをサーペンタイン走行させることによって、数千トラックの記録を1/2インチ幅のテープ上で実現し、大容量と高速転送を両立させている。また、多くのシステムではデータのマイグレーションを容易にするために、1世代もしくは2世代前のカートリッジの読取り互換性を確保している。さらに、LTFS (Linear Tape File System) と呼ばれるファイルシステムに対応することでファイル単位でのアクセスを実現し、ユーザの利便性向上が図られている。リニアテープシステムは、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る。以下に、(1) ミッドレンジシステム、(2) エンタープライズシステム、(3) 技術デモンストレーションの順でそれぞれの動向を述べる。

表1 LTOのロードマップ(圧縮比2.5倍前提)

Generation	LTO-6	LTO-7	LTO8	LTO-9	LTO-10
容量 [TB]	6.25	16	32	62.5	120
転送速度 [MB/s]	400	788	1180	1770	2750

表2 Oracle (T10000D) と IBM (TS1150)

メーカー	Oracle	IBM
ドライブ型番	T10000D	TS1150
最大容量カートリッジ	T2	JD
発売年	2013年	2014年
容量(非圧縮) [TB]	8.5	10
転送速度(非圧縮) [MB/s]	252	360

#### (1) ミッドレンジシステムの動向

LTOは、HP、IBM、Quantumの3社が中心となり統一規格を作成したシステムである<sup>18)</sup>。現在発売されている最新製品は、2012年11月に発売された第6世代のLTO-6であるが、近い将来にカートリッジ容量6.4 TB (非圧縮)のLTO-7が発売されることが予定されている。また、2014年9月に第10世代までのロードマップが発表された。表1に第6世代以降の容量と転送速度のロードマップを示す。この表で示されている値は、2.5倍圧縮前提のものであるが、第10世代のシステムは、非圧縮時でも、容量48 TB、転送速度1100 Mbpsに達する。

#### (2) エンタープライズシステムの動向

現在エンタープライズシステムとして一般に発売されているものは、OracleのT10000シリーズとIBMのTS11xx (IBM3592) シリーズである。Oracleからは2013年9月に1巻8.5 TBのシステム (T10000D) が発売された。これは、2011年1月に発売された容量5 TBのT10000Cシステムと同じテープカートリッジ (T2) を用いて実現されており、ドライブ技術の進歩で1.6倍以上の容量を達成していることになる。2014年10月には、1巻10 TBのシステム (TS1150) がIBMから発売された。これが現在市場に出回っているカートリッジ容量が最大のテープである。表2にこれらのシステムの概要を示す。これらは、磁性体としてバリウムフェライト微粒子を用いることで大容量化を実現している。

#### (3) 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は、発表されているロードマップに信頼性を与える上で重要な役割を担っている。近年の技術デモンストレーションのトレンドを図4に示す。図中AとBで示されているものは、いずれも2014年に発表されたものである。AはJ. Tachibana等によるもので、フレキシブル基板上にスパッタ法を用い

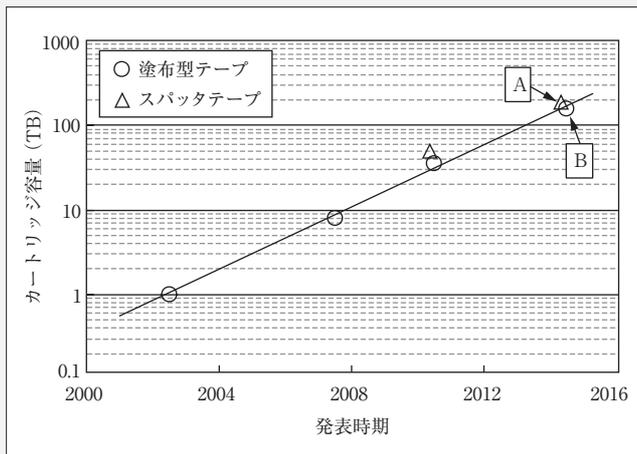


図4 リニアテープシステムの技術デモンストレーション動向

て垂直ハードディスクと類似の層構成を形成し、媒体での面記録密度148 (Gbit/inch<sup>2</sup>)<sup>19) 20)</sup>、対応するカートリッジ容量185 TBを達成<sup>21)</sup>したものである。図中Bで示したものは、S. Furrerらによるバリウムフェライト微粒子塗布型媒体を利用したもので、面記録密度85.9 (Gbit/inch<sup>2</sup>)を、ヘッドのトラッキング精度なども含めて、システムレベルで確認したものである<sup>22) 23)</sup>。対応するカートリッジ容量は154 TBになる<sup>24)</sup>。ここで示してきたように、技術的には現行製品の10倍以上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。(清水)

## 4. 光記録

### 4.1 光ディスク

これまで、光ディスク媒体は音楽、映画等のパッケージメディアとして普及してきたが、昨今のグローバルで生成されるさまざまなデジタルデータの増大とともに、図書館や美術館の原資料や公文書などの情報、放送番組など映像を電子化して長期保存するデジタルアーカイブ用途として用いられるようになってきた。光ディスク媒体は、データ保存時に温度・湿度の影響を受けにくく、耐水性などの対環境性に優れており、長期にわたって信頼性が確保される等の長所を有する。また、保存に電力を消費しないため長期保存を低運用コストで行えるという特長もある。このため、アーカイブ用保存媒体として注目されているが、他のHDD、磁気テープ媒体や半導体メモリーと比較すると光ディスク1枚当たりの記録容量はあまり大きくない。そこで、記録容量を増やす方法がいくつか発表されている。

ブルーレイディスク (Blu-ray Disc™) の片面で100 GB、両面で200 GBのデータを蓄積できる両面ディスク (Double-Sided Disc (BD-DSD)) の仕様がBlu-ray Disc Association (BDA) で策定された<sup>25)</sup>。数ペタバイトを扱う大規模データセンターでの運用を想定して、両面ディ

スクを数枚から数百枚ディスクカートリッジに収納して、さらにこのディスクカートリッジを複数搭載する。その際、カートリッジはロボットアームでレーザ読取り・書込みヘッドに移され、データへのアクセスが行われる。ディスクのアクセスタイムは、通常のHDDのアクセスタイムに匹敵するもので、テープメディアより大幅に短縮される。費用対効果に優れた信頼性の高い仕様となっている。

1ディスクあたりの記録容量が300 GBの業務用次世代光ディスク規格 Archival Disc (アーカイバルディスク) をソニーとパナソニックが策定した<sup>26) 27)</sup>。片面3層の両面ディスクで、波長405 nmのレーザで記録と再生を行う。これまでは、記録面にトラックを形成し、グルーブ面だけに記録を行っていたが、Archive Discではグルーブ面とランド面の両方に記録を行うことにした。このためトラック間ピッチは従来の2/3に縮まり記録密度の向上が図られている。トラック間が短くなったため、従来のレーザスポットの大きさでは隣接のトラックの信号まで読出してしまうので、クロストークキャンセル技術と高次のPRML信号処理技術を用いて大容量化と高い再生信号品質とを実現している。このディスクをコンパクトなカートリッジに十数枚収納して、一つの大容量ストレージとしてアーカイブシステムに用いる。

記録容量を増やす別のアプローチとして記録面を多層化する方法があり、パイオニアとメモリーテックは、記録層とガイド層を別にした「サーボ層分離型多層ディスク構造」を採用した8層の積層で片面256 GB、両面で512 GBのデータアーカイブ用大容量光ディスクを発表した<sup>28) 29)</sup>。これまでの光ディスクの記録層内にあるトラックをなくし、案内溝専用のガイド層を設けることでディスクの構造を簡素化している。これにより記録層の積層が容易となり、ディスク製造の歩留まりも向上する。サーボ用光学系にレーザ波長650 nm、対物レンズ開口0.60が追加となるが、記録・再生に用いる光学系はレーザ波長405 nm、対物レンズ開口0.85などブルーレイディスク™ドライブと同じ光学的仕様であり、信号処理もエラー訂正方式、符号化など既存の技術を流用している。すでに10層の試作に成功しており、今後12層以上の積層をして、1枚のディスクあたり1 TB以上の大容量化の実現を目指している。

光ディスクシステム (装置) において、高密度記録に対応するために集光スポットサイズを小さくすることにより増加する球面収差を短時間で小さくする調整方法が報告されている<sup>30)</sup>。これまでの光ディスクシステムでは、光ディスクの保護層の厚み誤差により生じる球面収差と対物レンズの基準位置 (フォーカスオフセット) は、それぞれ交互に変化させ再生信号 (RF) の振幅値が最大となるように調整されていた。最適点を探索するのに多くのRF振幅測定点が必要であった。提案方法は球面収差とフォーカスオフセットをxy軸とした2次元平面で、RF振幅値が等しい軌跡を

楕円で近似することで4点におけるRF振幅計測点から最適点を演算で求める手法である。従来方法に比べて調整時間が1/6に短縮された。(多田)

#### 4.2 ホログラム記録

ホログラム記録は、元データを符号化して2次元バーコード状の画像(ページデータと称する)で信号光を空間変調し、参照光と重ね合わせることで生じる光干渉縞をホログラムとしてメディアに記録する。特に、ページデータを記録メディアの同一箇所にも多重記録(重ね書き)ができるため、高密度・大容量化に有利とされている。ホログラム記録はその光学配置によりコアキシャル方式と二光束方式に大別され、以下それぞれの動向について述べる。

コアキシャル方式は、参照光と信号光が同軸に配置されたものを指し、参照光・信号光とも同一のレンズを用いて記録メディアへアクセスする。最近では、参照光や信号光の位相を積極的に制御して性能向上を図る報告が多くなされている。参照光について、相関が極めて低い複数の位相分布を切替えながら記録することで、記録メディア中の同一箇所にも多重記録を行う試みが報告された<sup>31)</sup>。従来のコアキシャル方式は、記録メディアを数 $\mu\text{m}$ ずつシフトさせながら記録するシフト多重を基本としており、これに同一箇所への多重を加えれば記録密度の向上に繋がるのが期待される。また、レンズアレイにより参照光を複数の球面波の集合とすることで、再生信号品質を向上する提案もなされた<sup>32)</sup>。一方、信号光に位相情報を持たせて高密度化・高速化を図る手法も多く報告された。従来、信号光の位相検出には干渉計測の手法が用いられていたが、干渉用の光波を生成・照射する機構を必要とせず、参照光の照射のみで位相変調信号を復調する2重参照型ホログラム記録が提案された<sup>33)</sup>。さらなる進化形として参照光そのものを不要にし、信号光の各シンボル自身を他のシンボルの参照光として機能させる自己参照型ホログラム記録も登場した<sup>34) 35)</sup>。また、信号光の各シンボルに位相傾斜を持たせるよう空間位相を変調し、これを簡便に検出する方法も提案された<sup>36)</sup>。この手法によれば、各シンボルが異なる進行方向の波面を有しており、シャックハルトマンセンサで容易にシンボルの位相傾斜情報を検出できる。一方コアキシャル方式において、各シンボルがデータチャンネルであることに着目し、チャンネルの時間軸方向の長さを符号に対応させる手法も提案されており、詳細な理論解析結果が報告された<sup>37) 38)</sup>。

二光束方式は、参照光と信号光が同軸でない系を通過するものを指す。最も典型的な多重方式は角度多重と呼ばれるものであり、参照光の記録メディアへの入射角度を変えながら複数のホログラムを多重記録する。通常、参照光の角度範囲に限りがあるため多重数が制限されるが、これを打破すべく信号光領域の大きさを動的に制御し、空いた角度スペクトルを参照光入射角に割当てて多重数を向上するDynamic Apertureと呼ばれる手法が提案された<sup>39)</sup>。これ

を用いれば240%の記録密度向上が可能であると試算している。また、記録メディアをその面内方向に回転させる回転多重を、従来の角度多重と併用することにより4倍以上の記録密度向上が可能手法も提案され、600多重記録実験の結果、 $10^{-4}$ 台の低い平均誤り率が得られている<sup>40)</sup>。角度多重の際にはガルバノミラーを用いて参照光角度を変えるが、その機械的振動を時間平均ホログラフィの概念でモデル化し、解析した結果も報告された<sup>41) 42)</sup>。

角度多重以外には、スペックルパターンを有する参照光により記録メディア位置に対するシフト選択性を持たせるシフト多重記録において、メディアの深さ方向にも3多重し誤り率を評価した報告があった<sup>43) 44)</sup>。また、参照光として球面波を用いたシフト多重記録に上述の回転多重を併用した方式において、多重数が最大で3600になる試算結果が示された<sup>45) 46)</sup>。

ホログラム記録は2次元のページデータを記録/再生するので、その信号処理手法が従来の光ディスクのものとは大きく異なる。いわば画像処理の要素を多分に含んでいることに注目し、GPU(Graphics Processing Unit)により信号処理系を構築した報告があった<sup>47) 48)</sup>。また、誤り訂正符号としてLDPC(Low Density Parity Check)符号を用い、映像再生実験にも成功している<sup>49)</sup>。

永らくその実用化が期待されてきたホログラム記録であるが、最近においても高多重数と記録密度向上を狙う研究成果発表が活発になされている。競合する固体メモリーや磁気記録などと互角の記録密度を達成できれば、ホログラム記録の実用化が一気に加速すると考えられる。(木下)

## 5. ストレージシステム

### 5.1 ストレージインタフェース

SSDでは高速化の進展が著しく、記録インタフェースの帯域がボトルネックとなってきた。このため、高速なSSDを接続するための新しいインタフェースが提案された。一つは、SATAの後継とされる、SATAExpressである。SATAExpressでは、SATA-IIIとPCIexpress2レーンを選択して使えるような仕様となっており、現行では最大10Gbpsの帯域が利用できる。また、組み込み用のmSATAの発展規格としてM.2というインタフェースが規格化された。M.2では、SATAExpressと物理的には同等のインタフェースとなっており、SATAとPCIExpressが選択して使用できる。コネクタは、SSD以外も接続できるように改良され、SSDと他のカードは、コネクタ端子の切欠きにより区別される。M.2は、最大でPCIExpress4レーンで接続され、NVMeExpressでデータの送受信が行われる。PCIExpress Gen.3の4レーンで接続することで、最大4GB/sの帯域が得られる。

PCの標準バスインタフェースであるPCIExpressは、第3世代のGen.3が利用でき、1レーンあたり1GB/sの帯域

で、16レーンでは16 GB/sが利用できる。次の第4世代では、1レーンあたり倍になる2GB/sの帯域になる予定である。PCIExpressと同時期に規格化されたInfinibandは、外付けのインタフェースとして、HPC (High Performance Computing) の分野で、ノード間通信に主に使われているが、現状ではFDRと呼ばれるモードまで利用でき、4レーンを束ねたケーブルで56 Gbpsの帯域が利用できる。次のEDRモードも近々サポートされ、4レーンで100 Gbpsとなる<sup>50)</sup>。高性能化のロードマップが策定され、NDRモードでは4レーンで400 Gbpsがサポートされる予定である。

## 5.2 ストレージシステム技術

ストレージシステムにおいても、取り扱うデータ量は増加の一途をたどっており、高性能化が進められた。フラッシュメモリのストレージシステムへの採用は順調に進んでおり、非常に高性能なオールフラッシュストレージ製品が各社から多く発表された。ディスクと比べて高価な点が課題であるが、IOPS (Input Output Per Second) 当たりのコストで比べるとディスクを大きく上回っており、ハイエンドな市場でシェアを伸ばしている。高性能ストレージでは、データ重複排除機能が、プライマリストレージでも利用され始めた。特に、高価なフラッシュストレージでは容量の効率的利用に有効である。

ストレージ容量と性能を同時にアップする手法として、スケールアウト型ストレージが一般的となった。従来型のストレージでは、スケールアップによらなければ性能を向上できなかったが、スケールアウトNASでは、NASコントローラをシステムに追加することで性能をアップでき、HDDあるいはSSDユニットを追加することでデータ容量の追加に対応できる。物のインターネット化 (Internet of Things: IOT) に伴う、センサネットワークからの大量のデータ、天文データや金融データ、監視映像などのデータは、ビッグデータとして利用され、巨大データベースも扱われ始めた。このようなビッグデータを扱うストレージとして、スケールアウトNASやHadoopのような分散ストレージシステムが利用され、更なる性能向上が図られている。

これまで、ストレージシステムは、各メーカーが個別にハードウェアおよびソフトウェアを開発し、メーカーごとに独自の方法で高性能化を進めてきた。部分的には違うメーカー間の機器を接続しても利用できていたが、汎用的な使い方には限界があった。そこで、ユーザがハードウェアを意識せずに簡単にストレージシステムを構築・管理できるよう、ソフトウェア定義ストレージ (Software-Defined Storage: SDS) とはい概念が生まれた。SDSはストレージの仮想化を、さらに推し進めたようなものであるが、特に巨大なストレージシステムでは非常に有効となるため、データセンターにおいて大きな割合を占めるようになるという。SDSでは、ソフトウェアコンポーネントにより、ストレージモジュールを仮想化して連結し、ストレージのリソ

ースをより効率的に使えるようになることが期待されている。

## 6. むすび

IDCの予想では<sup>51)</sup>、地球上で1年間に生成されるデジタルデータの量は2013年の4.4ZB (4兆4000億GB) から、2020年には44ZB (44兆GB) へと10倍規模に拡大するという。インターネットに接続されている端末は、2013年は1870億台で、このうち7%が“モノのインターネット (IoT)”によるもので、2020年には、全2120億台の端末のうち約15%の320億台規模に拡大するとみている。その結果、生成されるデジタルデータ全体に占めるIoTの比率は、2013年の2%から、2020年には10%に拡大するとしている。ネットワークの高速化が進めば、ストレージにも大容量化、高速化が必要とされる。

スマートフォン、ウェアラブルデバイス、データセンター、将来の4K/8Kの高精細放送サービス、大規模データアーカイブスなど、いろいろなアプリケーションに対応すべく、ストレージは進化し続けている。さらに、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も研究されており、今後もストレージの動向が注目される。

(宮下)  
(2015年1月30日受付)

## 〔文 献〕

- 1) [http://pc.watch.impress.co.jp/docs/column/kaigai/20141215\\_680069.html](http://pc.watch.impress.co.jp/docs/column/kaigai/20141215_680069.html)
- 2) <http://techon.nikkeibp.co.jp/article/NEWS/20130926/305622/>
- 3) A.R. Junaidi, Y. Take and T. Kuroda, IEEE Symposium on VLSI Circuits, Dig. Tech. Papers, pp.29-30 (2014)
- 4) [http://www.eetimes.com/document.asp?doc\\_id=1319938](http://www.eetimes.com/document.asp?doc_id=1319938) [2014/12/26 11:22:31]
- 5) Ki-Tae Park et al, ISSCC2014 Technical Paper, pp.334-335 (2014)
- 6) <http://www.businessnewsline.com/news/201401081059270000.html> [2014/12/25 17:26:40]
- 7) 吉井謙一郎ほか, 信学技法, ICD2014-2, pp.3-9 (2014)
- 8) [http://www.chuo-u.ac.jp/common\\_d/uploads/2014/06/c60a8fa2964067cc48c2fc0b3510f89d.pdf](http://www.chuo-u.ac.jp/common_d/uploads/2014/06/c60a8fa2964067cc48c2fc0b3510f89d.pdf)
- 9) <http://techon.nikkeibp.co.jp/article/EVENT/20140214/334060/>
- 10) [http://pc.watch.impress.co.jp/docs/news/event/20141222\\_681373.html](http://pc.watch.impress.co.jp/docs/news/event/20141222_681373.html)
- 11) <http://techon.nikkeibp.co.jp/article/EVENT/20141213/394320/>
- 12) 富永淳二, Do Bang, 栗野博之, 信学技法, MR2014-16, pp.17-21 (2014)
- 13) <http://www.seagate.com/jp/ja/products/enterprise-servers-storage/nearline-storage/archive-hdd/>
- 14) <http://japanese.engadget.com/2014/09/10/hgst-10-tb-hdd-3-5/>
- 15) <http://techon.nikkeibp.co.jp/article/EVENT/20130930/306346/>
- 16) <http://techon.nikkeibp.co.jp/article/EVENT/20141006/380782/>
- 17) 青木朋徳, 平永良臣, 長康雄, 信学技法, MR2013-35, pp.15-20 (2014)
- 18) <http://www.lto.org/technology/what-is-lto-technology/>
- 19) 立花淳一, ほか: “スパッタ磁気テープにおける面記録密度148 Gb/in<sup>2</sup>の基礎的検証”, 信学技報, 114, 140, MR2014-12, pp.23-28 (July 2014)
- 20) J. Tachibana, et al: "Exploratory Experiments in Recording on Sputtered Magnetic Tape at an Areal Density of 148 Gb/in<sup>2</sup>", IEEE Trans. Magn, 50, 11, #3202806 (Nov. 2014)
- 21) <http://www.sony.co.jp/SonyInfo/News/Press/201404/14-044/>
- 22) S. Furrer, et al: "85.9 Gb/in<sup>2</sup> Recording Areal Density on Barium Ferrite Tape", TMRC2014, F2, pp.79-80 (Aug. 2014)
- 23) S. Furrer, et al: "85.9 Gb/in<sup>2</sup> Recording Areal Density on Barium Ferrite Tape", to be published in IEEE Trans. Magn, 51, 2 (Feb.

- 2015)
- 24) [http://www.fujifilm.co.jp/corporate/news/articlefnr\\_0877.html](http://www.fujifilm.co.jp/corporate/news/articlefnr_0877.html)
- 25) [http://www.jp.blu-raydisc.com/wordpress/wp-content/uploads/2011/07/081914BDA\\_Announces\\_DSD\\_FINAL2R\\_rc\\_PRAP\\_R2.pdf](http://www.jp.blu-raydisc.com/wordpress/wp-content/uploads/2011/07/081914BDA_Announces_DSD_FINAL2R_rc_PRAP_R2.pdf)
- 26) <http://www.sony.co.jp/SonyInfo/News/Press/201403/14-0310/>
- 27) <http://news.panasonic.com/press/news/official.data/data.dir/2014/03/jn140310-1/jn140310-1.html>
- 28) <http://pioneer.jp/corp/news/press/index/1757>
- 29) <http://www.memory-tech.co.jp/new/news/2014/0513.html>
- 30) 金武佑介, 的崎俊哉, 竹下伸夫, 映情学技報, 37, 10, pp.9-10 (2013)
- 31) T. Nobukawa and T. Nomura: "Shift Multiplexing with Uncorrelated Computer-Generated Reference Patterns in Coaxial Holographic Storage", Tech. Dig. ISOM'14, Tu-E-03, pp.36-37 (2014)
- 32) C.C. Sun, Y.W. Yu and C.Y. Cheng: "Improving storage capacity and transfer rate of collinear volume holographic storage system with lens array modulation", Tech. Dig. ISOM'13, Tu-H-01, pp.60-61 (2013)
- 33) 瑞慶寛, 岡本, 高林, 渋谷, 富田: "2重参照型ホログラフィックメモリーにおける38値空間直交振幅変調信号の記録再生", 映情学技報, 37, 10, pp.1-7 (2013)
- 34) 高林, 江藤, 文仙, 岡本, 岡本: "自己参照型ホログラフィックメモリーにおける単一記録プログラムの読出し特性", 映情学技報, 37, 42, pp.11-16 (2013)
- 35) 江藤, 高林, 岡本, 岡本: "ランダム2値位相パターンを用いた自己参照型ホログラフィックメモリーに関する", 秋季応物講演予稿集, 19a-S11-2, p.03-078 (2014)
- 36) Y. Saita and T. Nomura: "Phase Gradient Coding and its Detection Method for Holographic Data Storage", Tech. Dig. ISOM'14, Tu-E-04, pp.38-39 (2014)
- 37) T. Shimura: "Influence of the Spatial Frequency Dependence of the Recording Materials in the Temporal Coding Holographic Memory", Tech. Dig. ISOM'14, Tu-E-02, pp.34-35 (2014)
- 38) M. Kawasaki, T. Shimura, R. Fujimura and K. Kuroda: "Relation between the Reference Pattern and Inter-Track Cross-Talk in Temporally Coded Holographic Memory", Tech. Dig. ISOM'13, Mo-C-03, pp.20-21 (2013)
- 39) K. Anderson, M. Ayres, F. Askham and B. Sissom: "Holographic Data Storage: Science Fiction or Science Fact", Proc. SPIE, 9201, pp.920102-1-8 (2014)
- 40) N. Kinoshita, T. Muroi, K. Kamijo, K. Masaki, T. Ando, T. Shimizu and N. Saito: "Angle and Peristrophic Multiplexing Holographic Memory with High Numerical Aperture Lens", Tech. Dig. ISOM'14, Th-K-03, pp.198-199 (2014)
- 41) K. Shimada, T. Ishii, T. Hoshizawa and Y. Takashima: "New Optical Modeling of the Effect of Mechanical Instabilities on Holographic Data Storage System using Time Average Holography", Tech. Dig. ISOM'14, Th-K-02, pp.196-197 (2014)
- 42) T. Ishii, K. Shimada, T. Hoshizawa and Y. Takashima: "Efficient Write Mode Control Against Vibration Effect on Holographic Data Storage System", Tech. Dig. ISOM'14, Th-PD-03, pp.230-231 (2014)
- 43) T. Nishizaki, K. Nitta and O. Matoba: "Bit Error Rate of Layered Recording in Reflection-type Holographic Memory using Three-dimensional Shift Multiplexing", Tech. Dig. ISOM'14, We-J-30, pp.140-141 (2014)
- 44) 西崎, 仁田, 的場: "スペックル3次元シフト多重記録を用いた反射型ホログラフィックメモリーにおけるビットエラーレート特性評価", 秋季応物講演予稿集, 19a-S11-3, p.03-079 (2014)
- 45) H. Kurata, K. Yamamoto, Y. Tsukamoto, J. Mori, S. Yoshida and M. Yamamoto: "Examination of maximum multiplexing number using shift-peristrophic recording method", Tech. Dig. ISOM'14, We-J-31, pp.142-143 (2014)
- 46) 塚本, 石原, 吉田, 山本: "シフト・ペリストロフィック多重ホログラフィック・メモリー記録方式の高密度多重特性", 秋季応物講演予稿集, 19a-S11-4, p.03-080 (2014)
- 47) 木下, 室井, 石井, 上條, 菊池, 清水: "高精細映像再生に向けたホログラムメモリー信号処理アルゴリズム", 映像学誌, 68, 8, pp.J348-J357 (2014)
- 48) N. Kinoshita, T. Muroi, K. Kamijo and H. Kikuchi: "Precise Symbol Extraction in Holographic Data Storage", Tech. Dig. ISOM'13, Mo-E-02, pp.34-35 (2013)
- 49) 室井, 石井, 木下, 上條, 菊池: "ホログラム記録におけるLDPC符号化5:9変調方式の復号とHD映像再生", 映情学技報, 36, 55, pp.9-12 (2012)
- 50) [http://www.publickey1.jp/blog/14/200\\_gbs20162017.html](http://www.publickey1.jp/blog/14/200_gbs20162017.html)
- 51) [http://internet.watch.impress.co.jp/docs/news/20140421\\_645394.html](http://internet.watch.impress.co.jp/docs/news/20140421_645394.html)



みやした えいいち  
宮下 英一 1987年, 九州大学大学院総合理工学研究科修了。同年, NHKに入局。宮崎放送局を経て, 1990年より, 放送技術研究所に勤務。デジタルVTR, 垂直磁気記録技術, スーパーハイビジョン記録装置の研究に従事。現在, 放送技術研究所上級研究員。博士(工学)。正会員。



しみず しずお  
清水 治 1983年, 電気通信大学電気通信学部材料科学科卒業。1985年, 同大材料科学専攻修了。同年, 富士フイルム(株)入社。磁気ヘッド用軟磁性材料や塗布型磁気媒体等の開発を担当。現在, 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。



ただ ゆきお  
多田 行伸 1988年, 大阪大学工学部通信工学科卒業。同年, (株)日立製作所家電研究所入所。ビデオカメラ, ビデオレコーダ, 光ディスクドライブなどの信号処理LSIの開発に従事。現在, (株)日立エルジーデータストレージに所属。正会員。



きのした のぶひろ  
木下 延博 1997年, 同志社大学大学院工学研究科博士前期課程修了。同年, NHK入局。2011年, 神戸大学大学院工学研究科博士後期課程修了。光ディスク, ホログラムメモリーなど記録技術の研究に従事。博士(工学)。正会員。