映像情報メディア年報2017シリーズ（第3回）

マルチメディアストレージの研究動向

宮下英一[†1]，川前　治[†2]，武者敦史[†3]，室井哲彦[†4]

1．まえがき

現在，DRAM，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（HDD），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ストレージデバイスとして利用されており，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．

スマートフォンやタブレットなどの携帯端末は，パソコンの出荷台数を大幅に上回っているが，総出荷台数は横ばいとなってきて，市場は飽和傾向である．また，ハードディスクや光ディスクも徐々に市場は減少傾向である．一方で，フラッシュメモリーは小型・低消費電力で振動などに強いこと，低価格化が進んでいることから携帯機器への搭載とともに，ノートPCへの搭載の増加，サーバのオールフラッシュ化などの進展により，ますます需要が増加している．さらに，フラッシュよりも高速なストレージクラスメモリー向けの新規メモリーの研究や磁気抵抗メモリー（MRAM）の研究も進展している．HDDについては，高密度化の進展は非常に緩やかではあるが，大容量化が進められている．光記録の高密度化も進展が小さく，ホログラムメモリーについて，記録メディアとしての実用化に向けた研究が進んでいる．

ストレージシステムでは，ストレージデバイス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．フラッシュメモリーが，高性能HDDを徐々に置き換えており，利用領域を広げつつある．MRAMはDRAMの置き換え用として研究が進んだが，高密度化の難しさなどにより現在は低消費電力性を生かしてCPUなどのキャッシュとして期待されている．DRAMについては，より広帯域化が進んだ．ストレージクラスメモリーは依然として強いニーズがあるが，まだ実用化に至ったものはない．しかし，実用化に向けて進展があった．SSDにおいては，高速インタフェースへの転換がますます進んでいる．

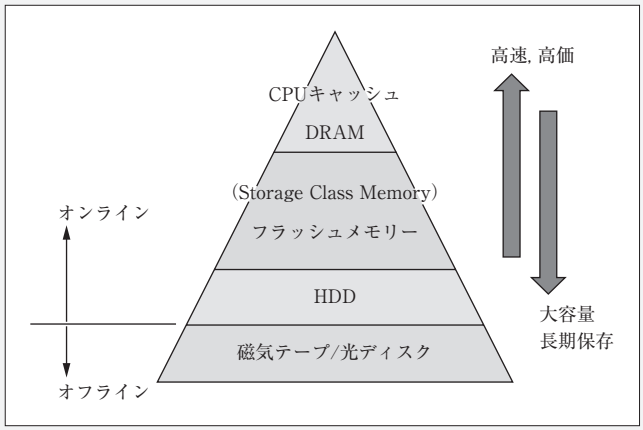

図1　ストレージの階層化構造

最近2年間におけるデータストレージについて，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解説する．

2．半導体メモリー

2.1　DRAM（Dynamic Random Access Memory）

メモリーアクセス性能の向上のため，DRAMの帯域拡張が進められた．DRAMダイをシリコン貫通ビアによりスタックして，メモリー帯域を広げるHBM2（High Bandwidth Memory）規格の製品化が進められた．HBMは，コストの観点からインタポーザを用いた，より実装しやすい2.5次元の実装により製品化されている．メモリーアクセスは1024 bit幅で接続され，128bitを単位として計8chで動作する．HBM1では，ライン当たりの転送レートが1 Gbpsでメモリーダイ当たり128 GBの帯域を持ち，最大4層スタックで512 GBの帯域が利用可能となった．しかし，512 GBフル帯域の実現には4層スタックが必須であり，コストの面

†1 NHK 放送技術研究所 テレビ方式研究部
†2 日立マクセル株式会社 光エレクトロニクス事業本部 光イノベーション部
†3 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
†4 NHK 放送技術研究所 新機能デバイス研究部
"Trend of Data Storage Device and Technology" by Eiichi Miyashita (NHK Science & Technology Research Laboratories, Tokyo), Osamu Kawamae (Hitachi Maxell, Ltd., Yokohama), Atsushi Musha (Recording Media Research Laboratories, FUJIFILM Corporation, Odawara) and Tetsuhiko Muroi (NHK Science & Technology Research Laboratories, Tokyo)

で課題があった．HBM2では，転送レートが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 TB/sの広帯域が利用可能となった．さらに，HBM2では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．HBM1は，AMDのビデオカードのみの製品化にとどまったが，HBM2はNVIDIAのビデオカードへの採用とともに，アルテラ，ザイリンクスのFPGA製品にも搭載され，対応製品が増加している．また，帯域をさらに2倍としたHBM3も規格化が進められており，最大で2 TB/sの帯域の実現とともに，インタフェース幅の削減やより安価な有機材料のインタポーザなど，性能を下げて低コストで利用できる構成も検討されている．

DDR（Double Data Rate）やGDDR（Graphics Double Data Rate）についても広帯域化が進められた．DDRメモリーについては，DDR4の普及が進んだ．DDR4はDDR3に対してクロックあたりの転送レートを2倍にした規格で，DDR4-2133からスタートし，DDR4-2400，DDR4-2466，DDR4-2800，DDR4-3000，…，DDR4-3600，DDR4-3733と続いていく．広帯域化しても消費電力が増加しないよう，動作電圧はDDR3の1.5 VからDDR4では1.2 Vへと下げられている．低消費電力化規格のLPDDR4（Low Power DDR）も用いられる．ビデオカード向けに利用されているGDDRについては，サムスンから20 nmプロセスでピン当たり9 Gbpsと高速なGDDR5の試作が発表され，シングルエンドでは最高速を達成した[1]．

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，3bit/セルのTLC-NAND（Tri-Level Cell）を採用したSSDが低価格モデルとして多数販売され始めた．多値化を進めると，書換え可能回数が大幅に減少していくが，大容量化やウェアレベリング，高性能ECCの採用などにより使用上問題ないレベルに回避している．また，大容量化技術として，3次元NANDが各社より販売され，今後は3次元の積層数を増やすことで大容量化が図られる傾向にある．そのため，3次元プロセスの立ち上がりにより，メーカごとのシェアが変わっていくことが予想され，各社積層数を上げるプロセスの立ち上げを急いでいる．

フラッシュメモリーをDRAMモジュールに実装する，NV-DIMMという規格が策定され，製品化された．NV-DIMMは．通常のDDR3またはDDR4モジュールをそのまま使うもので，使い方により三つのタイプが規格化されている．一つは，DRAMと同容量のNANDを実装して，DRAMデータのバックアップ用としてNANDを使うNVDIMM-Nである．PCの電源が断となった場合にDRAMデータをNANDにコピーし，PC立ち上がり時にNAND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と同じ動作となる．2番目は，NAND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．DRAMは搭載せず，NANDのインタフェースがDRAMインタフェースになったSSDと同じであるため，特にリード動作ではNAND素子の性能をフルに生かすことができ，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のドライバが必要となる．3番目は，小容量のDRAMと大容量NANDを搭載したNVDIMM-Pである．DRAMはNANDのキャッシュとして利用され，ランダムアクセスなどの高速化が期待できる構成となる．NVDIMM規格については，不揮発メモリーはNANDに限定されないため，もしNAMD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．

SSDのインタフェースも高速化が進んだ．SATAは第3世代で6 Gbpsの帯域を持つが，これ以上の高速化は検討されておらず，PCIexpressインタフェースを利用したNVMe（Non-Volatile Memory express）への移行が進んでいる．NVMeインタフェースには，組込み系のmSATAの後継でM.2とよばれる製品が各社より製品化され，ノートPCや組込み系のPCに採用されている．M.2では，PCIeの2レーンまたは4レーンの帯域が利用でき，Gen3 2レーンで16 Gbps，4レーンで32 Gbpsの帯域となる．また，サーバやハイエンドストレージでは，2.5インチSSDプラットフォームを利用したU.2とよばれるインタフェースのSSDが利用される．U.2では，PCIe 4レーンの帯域が利用できる．その他，カードタイプのSSDはPCIeのカードエッジが利用され，8レーンまたは16レーンの広帯域が利用できるため，サーバ系で採用が増えている．組込み用途では，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，現在UFS2.0インタフェースのNANDチップが製品化されている．UFS2.0では，2レーンまでの構成で11.6 Gbpsの帯域が利用できる．今後は，スマートフォンなどでの採用が増えていくものと予想される．また，SASインタフェースでは，Gen4が規格化され，最大で24 Gbpsの帯域が利用できるようになる．

2.3　その他の半導体メモリー

ストレージクラスメモリーとして，NANDよりランダムアクセスが高速なReRAM（Resistance Random Access Memory）とPRAM（Phase change Random Access Memory）が実用化に向けて研究されてきた．大容量で実用化に近いものも試作されてきたが，いまだ量産には至っていない．ストレージクラスメモリーの実用化が期待される中，2015年7月にインテルとマイクロンよりNANDの1000倍高速な不揮発メモリー「3D XPoint」を開発したとの

発表[2]があり，多くの注目を集めた．しかしながら，このメモリーの詳細仕様などはなかなか明らかにされず，その後の実デバイスでのデモはNANDの約7倍程度の性能で，フルの性能を引き出すには，コントローラやシステムの最適化などの対応が必要となるようである．一方，インテルからは今後のチップセットでのサポートなどがアナウンスされ，いよいよストレージクラスメモリーが実用化されるとの期待が大きい．

筑波大と産総研からは，PRAMの超高速化技術が発表された[3]．従来，相変化記録ではジュール熱により材料を高温に加熱し急冷することで材料の状態変化を起こしていたため，加熱にかかるエネルギーが大きくなり，消費電力が大きいことが課題であった．産総研では，この状態変化を電界印加による構造変化で実現できる材料を開発していたが，さらにこの材料に筑波大の超短波パルスレーザを照射することで非常に高速に相変化を起こせることが確認できた．この原理を利用した新しい高速相変化メモリーの実現が期待される．

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）の開発も進められた．STT-MRAMも，書込み電力の低下と大容量化が課題となっている．大容量化および書込み電力の低下には素子サイズを小さくすることが有効であるため，MRAM素子を垂直磁化構造とすることで，これに対応している．しかしながら垂直磁化膜の体積が小さくなると熱揺らぎ等の影響が大きくなるため，素子の垂直異方性を上げるなど材料的な改善が必要になってくる．また，超高速記録や低書込み電力を実現するため，スピン軌道書込み（SOT: Spin- Orbit Torque）を用いた超高速SOT-MRAM，電圧書込み（VC: Voltage Controlled）を用いた超低消費電力VC-MRAMなど新たな書込み制御方式の研究も始められた．

固体メモリーでは，その他にカーボンナノチューブを用いた新しいメモリー素子が，富士通グループから発表されている[4]．このメモリーは構造的にはReRAMと同等であるが，隣接するカーボンナノチューブ同士の距離を制御することで抵抗を変化させ，書込みを行う．セット，リセット電力が非常に低く，超低消費電力で動作させることができる．また，10億回以上の書換えでも劣化がほとんどなく，300℃の高温下でも10年以上のデータ保持特性を示すという．2016年には，2bit/セルの書込みにも成功し，ストレージクラスメモリーやキャッシュメモリーへの応用が期待される．

3．磁気記録

3.1　ハードディスク

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おり，2019年にはその半分程度となる3億台を少し超える程度であると予想されている．パソコンの出荷台数が減少傾向であることと，SSDを搭載するノートPCが増加していることの影響が大きい．一方，クラウド向けのニーズは微増しており，大容量化のニーズは存在する．今後もノートPCのSSDの搭載率は増加していき，HDD市場の一部はSSDに置き換えられることが予想される．HDDは大容量で安価である特長が生かせる，コールドストレージまたはニアラインストレージ用途で使われていくようになっていくであろう．

HDDでは，大容量化に向けた研究が進められているが，次世代の記録技術として期待されている熱アシスト記録，マイクロ波アシスト記録とも，いまだ実用化には至っていない．HDDの市場の縮小により，新技術開発の勢いがなくなってきている印象である．現行では，瓦書き記録は実用化され，一部製品に採用されている．しかしながら，瓦書き記録では，オーバライト時にフラッシュメモリーと同じようにブロックイレーズを必要とし，従来ドライブと比べて書込み性能が落ちることがあるため，高速性が要求される用途では使いづらくなっている．そこで，最近のHDDの大容量化は，搭載ディスク枚数を増やして，ドライブあたりの容量を大きくすることで進められている．

ドライブへのディスク搭載量を増やすため，薄型のガラス基板を用いたディスクが実装されている．また，HGSTから実用化された，ヘリウムを充てんしたヘリウムドライブを使うと，振動の低減やヘッドディスクインタフェースの安定化などにより，搭載ディスク枚数を増やせるメリットがあり，その他のメーカからもヘリウムドライブが製品化された．現在，3.5インチドライブではヘリウム充填式のドライブで最大容量12 TBの製品[5]が，2.5インチでは通常ドライブで15 mm厚の4 TBのドライブが製品化[6]されている．今後も少しずつ大容量化が進んでいくと予想される．

エネルギーアシスト記録以外でも，新しい記録手法が研究されている．磁性細線に磁区を形成し，電流印加による伝導電子から局在電子へのスピントランスファートルクにより磁区を移動させて記録を行う磁性細線記録デバイスの研究がNHK[7]，豊橋工大[8]より発表され，可動機構のない磁気記録デバイスの実現をめざした研究が進められている．実用化には，低電流で磁区を移動できる磁性材料や低コストでのデバイス作製法などの開発が待たれる．また，東芝からは磁気共鳴を用いた多層磁気記録手法が提案され，研究が進められている．共鳴周波数を層ごとに変化させた多層磁性膜に，マイクロ波アシスト記録用に開発が進められているスピントルクオシレータの発振周波数を変更することで，磁気共鳴する磁性層を選択して記録を行う方式である．これまでに，磁性層への選択的な書込み・読出しの原理検証が行われており，今後のデバイスの開発が期待される．また，キラルな結晶構造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いる[9]．今後のデバイスへの応用が期待される．（宮下）

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大手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．また，磁気テープストレージシステムの特長の一つとして，低コストである点が挙げられる．ストレージコストに関する定量的な議論は，前提とするストレージシステムの規模に大きく依存するが，例えば，HDDとテープを比較した場合，一般にストレージの規模が大きくなるほど，テープのコスト優位性が顕著になる．これは，HDDがデータ保管期間中も常時ディスクを回転させるための電力供給が必要であるのに対し，テープはカートリッジに一度記録した後は保管のための電力を必要としないため，電力コストを抑えられることに由来する．いくつかの仮定のもとで試算した結果，HDD（SATA）のみで構築したストレージシステムに対して，テープを組合せたシステムでは，2倍[10]から，前提とするモデルによっては20倍以上[11]のコストメリットがあると報告されている．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．

磁気テープをデータアーカイブ用途に導入した最近の事例を表1に示す．基礎研究からエンタテインメントにいたる幅広い分野でテープアーカイブの活用が進んでいることがわかる．米国立スーパーコンピュータ応用研究所（NCSA）におけるBlue Watersプロジェクトでの導入事例では，5年間で380 PBまで増え続けるデータの内，アクセス頻度の少ないものをテープライブラリーに保存することで膨大なデータを低コストでアーカイブすることに成功した[12]．さらにHDDのRAID（Redundant Array of Independent Disk）に類似するRAIT（Redundant Array of Independent Tape）と呼ばれる技術を活用することで，アーカイブデータの保存・読出し作業の高速化と，信頼性の向上を1/5の冗長度を付与（5巻あたり1巻のパリティカートリッジを作成）することで実現している．

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（Linear Tape-Open）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．ボリュームゾーンとなるLTOでは，2015年11月に6.0 TBの容量と，300 Mbpsの転送速度（いずれも非圧縮）を有する第7世代のLTO-7が市場導入された．表2に第7世代以降のLTOシステム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，転送速度は1100 Mbpsに達する．なお，現在市場に出回っているカートリッジ容量が最大のシステムは2014年10月にIBMから発売されたTS1150であり，1カートリッジ当たりの容量は10 TB，転送速度は350 Mbps（いずれも非圧縮）である．

また，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はJ. Tachibanaらによるもので，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し，媒体での面記録密度148 Gbit/inch^2[13][14]，対応するカートリッジ容量185 TBを達成[15]したものである．

表1　テープの使用状況

研究機関	映像・娯楽	気象	ITベンダー製造業	文化資料保管
NCSA	Red Bull Media House	German Weather Service	nVidia	CyArk
NIH	LosAngels Lakers	Météo France	T3 Media	LOC
NERSC	MLB	ECMWF	Google	
CERN	Endemole		Anna Aluminum	
OSU	Fox Sports		CSC	
JAXA	Magic TV		Bombardier	
RIKEN	Maple Leaf			
USC				
U. Oklahoma				
CIT				
NASA				
Oxford Univ.				
千葉大				

表2　LTOのロードマップ（圧縮比2.5倍前提）

Generation	LTO-7	LTO-8	LTO-9	LTO-10
容量［TB］	15	32	62.5	120
転送速度［MB/s］	750	1180	1770	2750

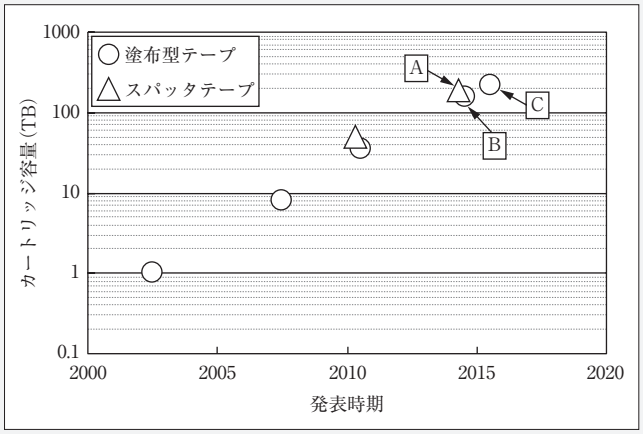

図2　技術デモンストレーションのトレンド

図中のB，C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，ヘッドのトラッキング精度なども含めて，システムレベルでの性能を実証[16)17)]したものである．なお，2015年4月に発表された図中のCでは面記録密度123 Gbit/inch^{2}を達成しており，対応するカートリッジ容量は220 TBになる[18)]．これら結果が示すように，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．（武者）

4．光記録

4.1 光ディスク

これまで光ディスクは，映像・音楽データの配布媒体として，また情報データの記録媒体として広く普及してきた．そして今日も，再生専用ディスクと記録型ディスクはそれぞれ進化を続けている．

まず一つ目は，BD-ROMの進化である．4Kテレビの普及により，UHD（Ultra-High Definition）映像が身近になってきている．それに伴い，UHDに対応したBD-ROM規格であるUltra HD Blu-ray規格[19)]が策定された．これにより，話題作・名作の映画等の4Kコンテンツを記録したUltra HD Blu-rayが登場し，それに対応したBDプレーヤも各社から発売されている．

Ultra HD Blu-rayは，高精細な4K解像度を再現するだけでなく，HDR（High Dynamic Range）に対応して輝度のレンジが大幅に拡張され，明暗の差が大きなシーンでも，忠実に再現できるようになった．また自然界に存在する色の約99.9%を再現できるように色域も拡張された．そして4Kテレビとの組合せにより，鮮やかな映像表現が可能となった．

もう一つの進化は，記録型ディスクによる長期データ保存である．近年，映像・音声・文章等のデータ量は飛躍的に増大している．さらに，これらのデータは，資産・資料として保存されるだけでなく，データ解析により新たな価値を生む可能性がある．そのため，有用なデータを長期間にわたって保存する要求が高まってきている．そこで，光ディスクの特徴である長期保存性や信頼性，長期にわたる装置との互換性を活かした新たな光ストレージシステムが地位を確立しつつある．

光ディスクは，これまで継続的な規格策定により，大容量化を進めてきた．また，ディスク自体が，環境の変化（温度や湿度の変化，電磁界の影響，防塵や耐水性等）に強いという特徴があり，さらに，非接触でデータの記録再生を行うため，データを繰り返し再生するときの再生耐力も優れた性能を備えている．そのため，低炭素社会の実現に向けてさらなる電力削減が要求される状況において，光ディスクは長期間データを保存するストレージとしてだけでなく，運用維持のための所要エネルギーが低いストレージとして注目されている．ソニーとパナソニックは，2014年3月に長期保存用ディスクとして，“Archival Disc”（以下ADと略す）規格[20)]を策定し，第1世代では，ディスク1枚あたりの記憶容量が300 GB，第2世代では500 GB，さらに第3世代では1 TBに拡張していく計画を発表した．

ADでは，3層の積層構造を両面に備え，表と裏を逆スパイラルにすることにより，両面同時に記録再生することを可能としている．ディスクの記録層は，溝と溝間の両方にデータを記録するランド＆グルーブ構造と，隣接トラックからのクロストークノイズを低減するクロストークキャンセル技術を採用することで，1層当たり50 GBの容量を実現した．また，記録層は耐腐食性の高い材料を用いることで長期間の保存に耐えるものとなっている．さらに，第2世代では符号間干渉除去技術，第3世代では多値記録再生技術を導入し，更なる大容量化を目指す．また，ドライブはディスクの両面に複数個のピックアップを搭載することにより，同時に複数個所のデータを読み書きし，高速データ転送に対応する．

そして両社は，ADを用いた光ディスクアーカイブシステムの製品化を行った．ソニーは，業務用放送機器で培った技術を基に，「オプティカルディスク・アーカイブ」を発表した[21)]．本システムではAD11枚を一つのカートリッジに入れることにより，3.3 TB大容量の記録媒体として取り扱われる．またカートリッジを格納するライブラリーを拡張可能とし，最大1.7 PBのシステムを構築可能とした．またパナソニックは，Facebookと共同開発した「freeze-ray」をAD対応させたと発表した[22)]．本システムでは，ADを12枚搭載したカートリッジを3.6 TBの記録媒体として取り扱い，カートリッジ内のディスクでRAIDを構成することにより，信頼性を高めている．また19インチラックにカートリッジ532本を格納可能とし，1.9 PBの大容量を実現している．また，ADは寿命推定試験ISO/IEC16963に基づいた加速試験を行い，100年以上の保存寿命が確認されている．

近年では，光ディスクの長期保存性に着目し，医療データの保存への活用も検討されている．医療データは，アクセス頻度の高いデータと低いデータが混在しており，アクセス頻度の低いデータに対しては，保存コストが低く，長期保存に適している光ディスクを用いることで，最適な医療データシステムの構築を目指している．このように光ディスクは，従来の適用分野に加えて，新たな分野での市場拡大を目指している．（川前）

4.2 ホログラム記録

ホログラムメモリーは，ディジタルデータを2次元に配列したページデータを使用し，ページデータで変調された信号光と参照光の干渉縞として記録媒体に記録する．同一箇所に異なるページデータを多重記録できるため高密度記録が可能である．また，多くのデータを並列で処理できるため高データ転送速度が期待できる．これまでホログラム

メモリーの方式として，信号光と参照光が同軸のコアキシャル方式と異なる軸の二光束方式が検討されてきた．近年のドライブ化に向けた研究開発では，二光束方式の検討が進められている．また，更なる高記録密度化，高データ転送速度化を目指して多値記録が注目されており，多くの研究発表が行われている．

ドライブ化に向けた高密度記録のための多重記録方式として，3次元クロスシフト多重方式が開発された[23]．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，その平面に対して垂直方向の回転軸で記録媒体を回転させて多重記録するチルト多重，および記録媒体を水平方向に移動しながら多重記録するシフト多重を組合せたものである．これらの多重記録方式を組合せることにより，記録容量2 TBが達成できるホログラムメモリーの技術を開発したとしている．

高密度記録のための信号処理方法も開発された[24]．データの符号化変調方式は，誤り訂正符号としてターボ符号を用い，これを2値RLL（Run-Length Limited）で変調したRLLターボ符号である．RLL変調率は2/3としている．この符号化変調されたデータをページデータに配列するときに，輝点ビットが水平方向に連続して二つ以上並ぶように配列する．これにより，光学系内に設けられている，隣接するページデータを分離してクロストークを避けるための空間フィルタの水平方向サイズを小さくすることができるため，記録密度が向上できるとしている．従来から利用されているLDPC符号と比較して，記録密度が1.78倍に増加したとしている．

サーボ技術では，データを再生するときに照射する参照光の角度を高精度に制御する方法が提案された．p偏光とs偏光の光をホログラムに照射し，ホログラムを通過したそれぞれの光強度を信号として参照光角度を制御することにより，最適な角度と比較したときの角度残差が1 mdegに抑えられることが報告された[25]．さらに，このサーボ制御の高速化を行い，1ページデータ当たりの参照光角度制御を300 μ sで行えたことが示されている[26]．また，ディスクの水平方向および垂直方向のポジショニングエラーによる再生信号の劣化を改善する方法も提案された．従来は，再生信号をもとにディスクの位置を調整することでポジショニングを行ってきたが，サーボ制御に時間がかかる．ポジショニングエラーによる再生信号の劣化は，光学系内に設けられたナイキストアパーチャーによって再生光が遮断されることにより生じることから，ナイキストアパーチャーを移動することにより再生信号を改善する方法が提案された[27)28)]．

このようなドライブ化に向けた技術をもとに，プロトタイプドライブが開発された．多重記録方式は角度多重記録のみで，角度多重数は440である．記録するデータはRLLターボ符号で符号化変調されたデータである．1ページデータ当たりのデータ量は2.7 Mbit，記録領域は0.00050 inch^{2}であることから，記録密度2.4 Tbit/inch^{2}が得られ，直径13 cmのディスク当たりの容量では2 TB相当を記録できるとしている[29)]．このドライブを用いて超高精細映像のリアルタイム再生が行われた．HEVC（High Efficiency Video Coding）で85 Mbpsに圧縮した8Kスーパーハイビジョン映像をホログラムディスクに記録し，映像をリアルタイムで再生している[30)]．

更なる高記録密度化，高データ転送速度化を目指して，多値記録に向けた技術の研究開発が進められている．変調符号として，2値RLLの変調方式を基本とした4値の位相多値記録方式が開発された[31)]．計算量の増加を抑えるため，4値RLLを適用するのではなく，位相多値情報を実部と虚部に分け，それぞれにおいて2値RLLを適用するデュアル2値RLLを提案し，利用可能であることを実証した．また，多値記録のためのシンボル間干渉を低減する変調方式も検討された．4値の12/16変調方式において，12bitを4×4のアレイの16bitに変調する過程において，2値と4値のシンボルを交互に配置することでシンボル間の干渉を低減できることが報告された[32)]．また，2×3のアレイの6bitに変調する変調方式において，4値のうちの最小値のシンボルを最大値のシンボルに近づけないように配置することでシンボル間の干渉を低減することも報告された[33)]．さらに，空間直交振幅変調（SQAM）方式では，パイロット信号を用いることにより，高精度にSQAM信号を再生する方法が提案された[34)]．

ホログラムメモリーは，高記録密度化，高データ転送速度化ための要素技術や，ドライブ化に向けたサーボ技術，信号処理技術が進展し，記録容量がTBを超えるプロトタイプドライブが開発された．更なる記録密度向上のための基礎技術も検討されており，今後の大容量，高速データ転送速度の記録装置として期待される．（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

PCの標準バスインタフェースであるPCIExpressは現在，1レーンあたり8 Gbpsの帯域を持つ第3世代が長く続いている．転送レートが2倍となる第4世代への対応が待たれるが，いつ頃となるのかまだアナウンスはされていない．内蔵用のストレージインタフェースは，従来のSAS/SATAからPCIeインタフェースを用いたNVMeへ急速に移行している．このため，内蔵向けのストレージインタフェースはPCIeの帯域に依存して増加することになった．

外付けのインタフェースも高速化が進んでいる．FiberChannelでは，16 Gbpsのスイッチとアダプターが利用され始めた．さらに，32 Gbpsの機器も製品化が予定されている．Ethernetベースのストレージネットワークは，10 Gbit

のスイッチ，アダプタの価格低下により普及が進んだ．特に10 Gbase-Tのスイッチは8ポートで10万円台の製品も市販された．また，スイッチはまだ高価であるが，40 Gbit，100 Gbit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きた．一方，InfiniBandはハイパフォーマンスコンピューティング（HPC）市場に注力しており，56 Gbpsの製品が利用できるようになった．2017年以降は，100 Gbpsへの移行が進行するとの予想もある．

インタフェースの広帯域化が進み普及する中で，高速ネットワークを利用してNVMeプロトコルを利用するNVMe over FC，NVMe over Ethernet，NVMe over InfiniBandなどが検討されている．

5.2　ストレージシステム

ストレージデバイスの大容量化に伴い，従来のRAID方式の限界が見えてきている．HDDの容量は10 TBを超えてきており，RAIDのリビルド時間が増大するため，リビルド中に別のHDDが故障を起こすリスクが大きくなっている．そこで，高速にデータの修復を行える消失訂正符号が利用され始めた．この消失訂正符号は，後述するオブジェクト・ストレージシステムと相性のよい符号となっている．データを複数のチャンクに分割し，冗長化データを付け加えてストレージアレイ内の物理的に異なるノードにチャンクを配置，保存する．デバイスが破損またはデータが消失したとき，関連するチャンクを読出し，冗長化データをもとにデータの復旧が行われる．付加する冗長化データ量が大きいほど，少ないチャンクから復旧が可能となる．消失訂正符号により，従来のRAIDに比べてより高速なデータのリビルドが可能になった．また，複数ドライブに障害が起こっても，パフォーマンスをあまり劣化させることなくデータの整合性を保つことができる．消失訂正符号は，膨大な量のデータを保護する拡張性を持っているために，クラウドストレージや分散ストレージでのデータ保護に適している．

データをオブジェクト単位で扱うオブジェクトストレージが使われ始めた．ディレクトリ構造で管理する従来のファイルシステムとは異なり，データのサイズや数に制限がないため，大容量データの保存に適する．電子メールやWeb，画像などの非構造化データが急増し，ビッグデータの活用など扱うデータ量の爆発的な増大により，ストレージにはこれまでと異なる性能が要求され始めた．オブジェクトストレージでは，データをオブジェクトという単位で扱い，固有のID（URI）が付与され，データとそれを扱うためのメタデータによって構成される．データの種類，保存期間やコピー回数など，通常のファイルシステムで管理されるより多くのメタデータ情報を付加できる．ディレクトリのような階層構造はなく，ストレージプールというオブジェクトの入れ物のみが作成され，メタデータによって管理される．オブジェクトストレージは，汎用ストレージを並列化した分散ファイルストレージで構成され，スケールアウトに容易に対応できる．アクセスはHTTPS上のREST（REpresentational State Transfer）を利用し，ファイルシステムは使用されないため，OSに依存することなくWebアプリケーションのように利用できる．オブジェクトストレージは，更新，書換えの少ない大容量データの保存に効果的であり，動画や音楽，ゲームなどのコンテンツデータの保管・配信に適している．オブジェクトストレージは，ファイルシステムを介さずオブジェクトをディスクに直接書込むため，ボリューム設計や複雑な運用管理が不要となるなど多くのメリットがあるが，RAIDのような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．そのため，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．

ソフトウェア定義ストレージ（Software-Defined Storage: SDS）はさまざまなメーカのストレージを統一的に使えることで期待され，対応製品が利用できるようになっている．しかし，実際に性能を確保するには性能の高いハードウェアは必要であるという認識が広まり，流行も一段落している．

また，高負荷の処理をクラウドで実行するアプリケーションとして，グラスバレーの映像編集ソフトのEDIUSにより，クラウド上で編集処理を実行するデモが行われ，注目を集めた．

6．むすび

IDCの予測では，2020年には年間に生成されるデータ量は44 ZB（ゼータバイト：10億テラバイト）と予想されている．一方で，通信も高速化が進んでおり，将来はクラウド上で処理できるデータ量も格段に増加していくことが予想される．コンシューマ用では，光ディスクに代わってUSBメモリーやSDカードのような固体メモリーが主要メディアとなってきており，将来は新たなメモリーが主役となるかもしれない．今後も引き続き，携帯することが容易で大容量かつ低消費電力な小型ストレージメディアが，大きく需要を伸ばしていくものと予想される．ハードディスクや磁気テープは，クラウドやコールドストレージ用に特化していくことになりそうであるが，2020年から普及が予想される4K/8Kの放送サービスに対応したレコーダなどにより，大容量記録メディアとしての大きなニーズ創出の可能性もあり，予想が難しいところである．PCやスマートフォン，クラウドストレージなどの進化に伴い，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今後も実用化されることを期待したい．（宮下）

（2017年2月6日受付）

〔文　献〕

1）H.-Y. Joo et.al: ISSCC2014 Technical Paper, pp.314-315（2016）
2）http://pc.watch.impress.co.jp/docs/news/20150729_713996.html
3）http://www.aist.go.jp/aist_j/press_release/pr2015/pr20150925_2/pr20150925_2.html
4）http://www.fujitsu.com/jp/group/fsl/resources/news/press-releases/2016/0831.html
5）http://pc.watch.impress.co.jp/docs/news/1033812.html
6）http://akiba-pc.watch.impress.co.jp/docs/news/news/1034474.html
7）奥田，宮本，川那，宮下，斎藤：“磁性細線中の磁区を利用した新しいメモリー構成”，映情学技報，40，16，pp.27-32（2016）
8）粟野，鷲見，黒川，Do Bang：“重金属Pt層と希土類・遷移金属合金層からなる磁性細線における電流磁壁移動”，映情学技報，40，16，pp.33-38（2016）
9）望月：“磁気スキルミオンのデバイス機能とダイナミクス”，映情学技報，40，16，pp.39-44（2016）
10）"Total cost of ownership - tape versus disk", Spectra Logic Corporation, https://edge.spectralogic.com/index.cfm?fuseaction=home.displayFile&DocID=4617, June 2014）
11）井上陽治：“テープシステム技術資料第1章テープストレージの未来”，JEITA情報産業システム部会テープストレージ専門委員会，http://home.jeita.or.jp/upload_file/20130924142151_WbQPI2w6x4.pdf（Sep. 2013）
12）"Case study NCSA（National Center for Supercomputing Applications）", http://www.activearchive.com/common/pdf/AA-Case-Study-NCSA.pdf（Sep. 2014）
13）立花淳一ほか：“スパッタ磁気テープにおける面記録密度148Gb/in^{2}の基礎的検証”，信学技報，114，140, MR2014-12, pp.23-28（July 2014）
14）J. Tachibana, et al: "Exploratory Experiments in Recording on Sputtered Magnetic Tape at an Areal Density of 148Gb/in^2", IEEE Trans. Magn, **50**, 11, #3202806（Nov. 2014）
15）“世界最高の面記録密度148Gb/in^{2}を実現した磁気テープ技術を開発”，ソニー，http://www.sony.co.jp/SonyInfo/News/Press/201404/14-044/（Apr. 30, 2014）
16）S. Furrer, et al: "85.9Gb/in^2 Recording Areal Density on Barium Ferrite Tape", IEEE Trans. Magn. **51**, 4, #3100207（Apr. 2015）
17）S. Furrer, et al: "123Gb/in^2 Recording Areal Density on Barium Ferrite Tape", IEEE Trans. Magn. **51**, 11, #3101304（Nov. 2015）
18）“世界最大容量1巻あたり220TB磁気テープの高容量化技術を開発！”，富士フイルム，http://www.fujifilm.co.jp/corporate/news/articleffnr_0972.html（Apr. 9, 2015）
19）White Paper: Blu-ray Disc Format - General 4th Edition（2015），http://www.blu-raydisc.com/Assets/Downloadablefile/White_Paper_General_4th_20150817_clean.pdf（2016.12.15現在）
20）White Paper: Archival Disc Technology, 1st Edition（2015），https://www.sony.jp/oda/about/J_White_Paper_Archival_Disc_Technology_Ver100_20150702.pdf（2016.12.15現在）
21）http://panasonic.biz/archiver/（2016.12.15現在）
22）https://www.sony.jp/oda/（2016.12.15現在）
23）http://www.tus.ac.jp/today/20151105000.pdf（2017.1.26現在）
24）Y. Nakamura, T. Hoshizawa: "Two high-density recording methods with run-length limited turbo code for holographic data storage system", Jpn.J. Appl.Phys., **55**, 09SA01（2016）
25）M. Hosaka, T. Ogata, K. Yamada, K. Yamazaki and K. Shimada: "Highly Accurate Servo Control of Reference Beam Angle in Holographic Memory with Polarized Servo Beam", Technical Digest of ISOM'15, Tu-H-03（2015）
26）K. Yamada, T. Ogata, M. Hosaka, K. Fujita and A. Okuyama: "High-Speed Reference Beam Angle Control Technique for Holographic Memory Drive", Technical Digest of ISOM'15, Tu-H-04（2015）
27）K. Shimada, M. Hosaka, K. Yamazaki, T. Ide: "New Compensation for Positioning Error of Hologram for Balancing Large Date Capacity with Fast Transfer Rate", Technical Digest of ISOM'16, Mo-C-01（2016）
28）Y. Tanaka, T. Ide, J. Hashizume, T. Hoshizawa: "Relaxation of Tolerance for Holographic Disk Positioning Based on Triaxial Position Control of Nyquist Aperture", Technical Digest of ISOM'16, Mo-C-02（2016）
29）T. Hoshizawa, K. Shimada, K. Fujita and Y. Tada: "Practical angular-multiplexing holographic data storage system with 2 terabyte capacity and 1 gigabit transfer rate", Jpn.J. Appl. Phys. **55**, 09SA06（2016）
30）http://www.nhk.or.jp/strl/open2016/tenji/a4.html（2017.1.20現在）
31）K. Tajima, Y. Nakamura, T. Hoshizawa: "High-Density Recording in Holographic Data Storage System by Dual 2-Level RLL Modulation", Technical Digest of ISOM'15, We-L-03（2015）
32）H. Kim, S. Jeong and J. Lee: "4-level 12/16 Modulation Code for Holographic Data Storage, Technical Digest of ISOM'15, Tu-I-27（2015）
33）Keunhwan Park, Jaejin Lee: "4-level Balanced Modulation Code mitigating Two-Dimensional Inter-Symbol Interference for Holographic Data Storage", Technical Digest of ISOM'15, Tu-I-28（2015）
34）Satoshi Honma, Mitsuki Takahashi: "Duplex Phase Code based on Two-Step Exposure Technique for Holographic Data Storage", Technical Digest of ISOM'16, Tu-J-07（2016）

宮下　英一（みやした　えいいち）　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．ディジタル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．

川前　治（かわまえ　おさむ）　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，日立マクセル（株）光イノベーション部に所属．正会員．

武者　敦史（むしゃ　あつし）　2005年，国際基督教大学教養学部理学科卒業．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．2017年，愛媛大学大学院理工学研究科博士後期課程修了．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．

室井　哲彦（むろい　てつひこ）　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，ホログラフィックメモリーの研究に従事．博士（工学）．正会員．