

マルチメディアストレージの研究動向

町田賢司^{†1}, 加藤大典^{†1}, 吉村 哲^{†2}, 武者敦史^{†3}, 文仙正俊^{†4}

1. まえがき

近年, 世界中であらゆる産業のデジタル化が急速に進み, 2025年には世界で生まれるデータ量が175 ZB (zetta=10²¹, 1 ZB = 1兆GB) にまで増加すると言われている¹⁾. IDC Japanが2022年に発表した国内のクラウド市場予測では, 2021年は前年比34.7%増の4兆2,018億円に, 2026年は10兆9,381億円になると見込まれている²⁾. 新型コロナウイルス禍以降, 各業務のプロセスをデジタル化し, 新たな価値の創造につなげるデジタルトランスフォーメーション (DX) や, デジタルデータを一元管理して業務の高度化に活用するデータ駆動型ビジネスへの関心が高まったことがクラウド市場の成長要因と考えられる. これに伴い, データセンターの市場も成長を続けている. 国内データセンターの新設および増設については, 2022年に前年比21.2%増, 2023年は2022年の約80%増となる大幅な拡大が見込まれ, さながら建設ラッシュの様相を見せている³⁾.

モノのインターネット (IoT: Internet of Things) や, 人工知能 (AI: Artificial Intelligence) の進化により, インターネットを介してさまざまなモノが接続され, 大量のデータを扱うようになると, サーバ側で集中処理を行う従来型クラウドコンピューティングでは, データ通信の処理に遅延が生じる. IoTデバイスを瞬時に制御するためには, ユーザの近くでデータを処理・管理し, 必要なデータのみクラウドに送信するエッジコンピューティング技術を適用することが望ましい. これにより, トラフィックデータの大幅な削減や, リアルタイム性の向上, セキュリティの確保などの課題が解決される可能性があり, エッジコンピューティング技術は, 今後もますますの進展が期待される.

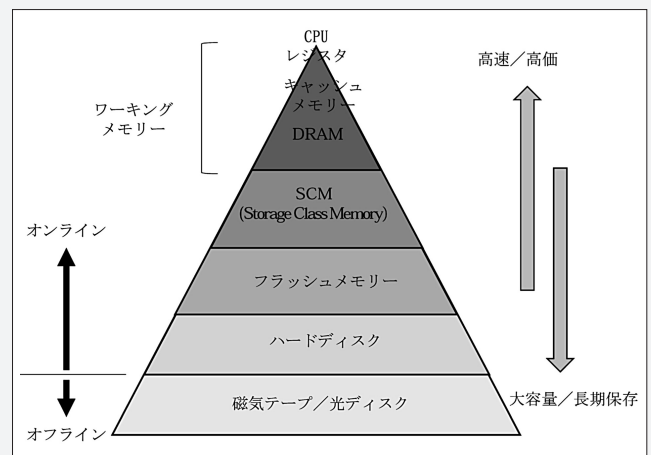


図1 ストレージデバイスの階層構造

さらに, インターネット上に構築された仮想3次元空間で自分の分身を操作し, 他の参加者との交流やサービス・コンテンツの利用が可能な「メタバース」が注目を集めており, 現実と仮想とが融合する未来社会の基盤技術として期待されている. メタバースでは, リアルタイムの双方向通信や3次元空間の演算処理が必要とされ, 高速なデータ転送・蓄積が可能な高性能ストレージをはじめ, グラフィックスのレンダリング処理速度の向上, AIによる高速演算処理など高度な技術が要求される.

こうした技術革新により, 各種ストレージデバイスに対する要求性能も, 超高速・大容量, 小型・低消費電力化の一途を辿ることが予測される. 一般的に, ストレージデバイスは記録性能によって図1のような階層的構造となる. 本稿では, 各種ストレージの製品および技術開発について, ここ数年間の動向を解説する.

(町田)

2. 固体メモリー

2.1 半導体メモリー

半導体メモリーは, アクセス速度と容量からいくつかの種類に分類可能で, アクセスの速い順かつ容量の少ない順から, CPU内に埋め込まれたレジスタ, CPU演算のキャッシュメモリーに用いられるスタティックRAM (SRAM: Static Random Access Memory), メインメモ

^{†1} NHK 放送技術研究所^{†2} 秋田大学 大学院理工学研究科^{†3} 富士フイルム株式会社 記録メディア研究所^{†4} 福岡大学 工学部

"Trend of Data Storage Device and Technology" by Kenji Machida, Daisuke Kato (NHK Science & Technology Research Laboratories, Tokyo), Satoru Yoshimura (Graduate School of Engineering Science, Akita University, Akita), Atsushi Musha (Recording Media Research Laboratories, FUJIFILM Corporation, Kanagawa) and Masatoshi Bunsen (Faculty of Engineering, Fukuoka University, Fukuoka)

リーのダイナミック RAM (DRAM: Dynamic Random Access Memory) のほか、IoT デバイスや AI 処理への利用が期待されるストレージクラスメモリー (SCM: Storage Class Memory), さらにフラッシュメモリーなどである。

2.2 DRAMの微細化

半導体業界では、昨今の世界的な景気低迷とインフレにより、メモリー市場の価格が低下しており、生産調整も余儀なくされているようである。半導体集積回路の製造技術において、世代を表すテクノロジーノードの微細化は、鈍化がいつそう強くなっているものの、着実な進展を見せている。一般的に、DRAMの微細化によりメモリー密度増加のほか、ゲート長が短くなることで低電圧駆動となり、高速化や省電力化のメリットがある。Micron Technology社は、2021年1月にDRAM 10nm第4世代「1 α 世代 (14~13nm)」の量産出荷を発表⁴⁾しており、転送速度は推定6.4Gbpsで前世代「1Znm世代」に比べて15%の省電力化を達成している。さらに同社は、2022年11月に第5世代「1 β nm世代 (13nm前後)」のDRAM量産を広島工場で開始した⁵⁾。転送速度は8.5Gbpsで消費電力をさらに15%削減したとしている。また、SK Hynix社は、2021年7月に取り扱いが難しいとされるEUV (極端紫外線) 露光装置を用いた1 α 世代DRAMの量産を開始した⁶⁾。20%の省電力化を達成し、2023年1月には転送速度9.6Gbpsを実現している⁷⁾。Samsung Electronics社もEUV技術を活用し、2022年12月に12nmクラス (第5世代に相当) のDRAMを開発した⁸⁾。転送速度は7.2Gbpsをサポートし、消費電力は23%低減している。

2.3 NAND型フラッシュメモリー

一方、否定論理積 (NAND: Not AND) 型フラッシュメモリーは、DRAMやSRAMとは大きく異なり、上述の微細化だけではなく、多値化と多層化により、記録容量を大きく上げることができる。多値化では、4bit/cellの16値・4ビット記録 (QLC: Quad-Level Cell) が開発されていたが、2022年8月にSolidigm社は、5bit/cell (PLC: Penta-Level Cell) の実証を報告した⁹⁾。PLC方式では、メモリーセルごとに5ビットのデータを保存し、QLC方式に比べて25%多くデータを保存することができる。さらに、その先の技術として、キオクシア社は、液体窒素温度 (77 K) 下において、6bit/cell (HLC: Hexa-Level Cell) の実証に成功した^{10) 11)}。液体窒素温度では、サブスレッショルド特性や閾値分布が急峻となり、読み出しノイズが減るためと考えられている。さらに同社は、多結晶シリコンから単結晶シリコンに変更し、極低温環境を組み合わせ、世界初の7bit/cellの実証にも成功した¹²⁾。

多層化では、各社とも3D NANDフラッシュメモリーと呼ばれる積層技術をここ数年で大きく進展させている。2022年7月にMicron Technology社は、232層の3D NANDフラッシュメモリーの量産を開始した¹³⁾。転送速度は従来の176層に比べて50%向上し、2.4Gbpsとされる。

また、3bit/cell (TLC: Triple-Level Cell) との組み合わせにより、面記録密度14.6Gb/mm²を実現している。また、SK Hynix社は、2022年8月に238層の3D NANDフラッシュメモリーを開発した¹⁴⁾と発表 (セルアレイの下に周辺回路を埋め込んでおり、一般的な3D NANDとは区別して4D NANDと呼んでいる)。転送速度は2.4Gbpsで従来比の50%向上した。2023年には記憶容量512Gbを量産し、翌年には1Tbも投入される見通しである。

2.4 ストレージクラスメモリー (SCM)

DRAMとNAND型フラッシュメモリーとの間を埋めるメモリーが、SCMと呼ばれるものである。SCMは、DRAMに比べて大容量かつ、電源OFF時もデータを保持できる不揮発性メモリーである。DRAMとNAND型フラッシュメモリーの性能差を縮める大容量メモリーとして位置付けられる。リアルタイム処理の必要なアプリケーションのほか、IoT デバイスや AI などの高速な情報処理を行うエッジコンピューティングでの利用が期待される。

SCMとして注目を集めたのが、相変化メモリー (PRAM: Phase change Random Access Memory) 技術を用いた3D Xpointである。Intel社とMicron Technology社の共同で開発され、高速・大容量の理想的な不揮発性メモリーとして期待されていた。しかしながら、7年におよぶ開発後、売上低迷などを理由に、Micron Technology社は2021年3月に撤退、Intel社は2022年7月に段階的縮小を発表した。これにより、3D Xpoint技術は終焉を迎え、在庫分を除いて市場からも消えていくことになるだろう。一方、フラッシュメモリー技術をベースにしたSCM開発は進展を続けている。キオクシア社は、一般的なフラッシュメモリーよりもワード線/ビット線を短くし、従来品の10倍となる5ps以下の高速読み出しを実現した。2022年8月には、2bit/cell (MLC: Multi-Level Cell) の256Gbチップをサンプル出荷している。(町田)

2.5 磁気メモリー (STT-MRAM, SOT-MRAM)

磁気抵抗メモリー (MRAM: Magnetoresistive Random Access Memory) は、磁性体の磁化方向をデータとして記録し、磁化方向に依存した電気抵抗の値を検出することでデータの読み出しを行う。高速な読み書きと優れた書き換え耐性、低消費電力などの特長を備えた不揮発性メモリーとして知られており、さらなる省電力化と高速化が望まれるエッジコンピューティングへの応用などに、大きな期待が寄せられている。

1990年代より開発が始まったMRAMは、近年、スピン注入磁化反転を利用したメモリー (STT-MRAM: Spin Transfer Torque MRAM) とスピン軌道トルクを利用したメモリー (SOT-MRAM: Spin Orbit Torque MRAM) の2種類について研究が進められている。まず、STT-MRAMの現況から報告する。STT-MRAMは記憶セル面積を小さくするのに有利な構造であり、磁気トンネル接合 (MTJ: Magnetic Tunnel Junction) 素子における自由層の磁化方向

で情報を記憶する2端子素子の構成をとっている。SOT-MRAMに比べてSTT-MRAMの開発は先行しており、例えば、Everspin Technologies社より垂直磁化膜を利用した記録容量1 GbitのSTT-MRAMチップがすでに市販され、0℃～85℃の温度範囲において、駆動電圧1.2V、動作クロック667 MHz、書き換え可能回数は 1×10^{10} 回とされる¹⁵⁾。印加電圧、書き換え時間、書き換え可能回数は、いずれもDRAM並の高い性能を持つだけでなく、データ保持期間10年以上などのスペックを持ち、車載用途でも利用が進みつつある。

マイクロコントローラやチップに埋め込まれる混載メモリ用途でも、STT-MRAMの技術を適用した混載MRAM (eMRAM: embedded MRAM) の開発が進められている。2021年、ルネサスエレクトロニクス社は、16 nm FinFET ロジックプロセスを用いて20 Mbit混載STT-MRAMテストチップを試作した¹⁶⁾。従来、記憶セルである各MTJ素子の書き込み電圧にバラつきがあることが課題であった。これを解決すべく、スローパルスを用いたセルフターミネーション書き込み方式と同時書き換えビット数の最適化によって、従来方式と比較して70%以上の書き込みエネルギーの削減と50%のトータル書き込みパルス時間の削減が可能であることを実証した。

また、eMRAMのさらなる高集積化を目指した研究動向を紹介する。高集積化にはMTJ素子の微細化が必要となるが、これに伴いデータ保持性能が著しく劣化する課題がある。この課題に対して、2022年に東北大はMTJ素子内の自由層とトンネルバリア (MgO) 層で生じる界面磁気異方性を活用した新しい素子構造を提案した¹⁷⁾。この構造は、界面数を従来の3倍に増加させた、6重界面磁気トンネル接合素子 (iPMA-type Hexa-MTJ) から構成される。接合直径を25 nmとした微細なiPMA-type Hexa-MTJ素子を試作・評価したところ、20年間のデータ保持や 1×10^7 回以上の書き換え耐性など、優れたメモリ特性を持つほか、半導体実装に適合する260℃のソルダーリフロー耐性も同時に実現できたとしている。さらに、この微細MTJ素子は最先端の1 nm世代の半導体ロジックのデザインルールにも適合できることから、今後、大容量で高速処理が可能なマイクロコントローラの実現も期待される。そのほか、MTJ素子の高速書き込みに向けた研究も継続して進められている。2022年にIBM社とサムスン電子社の研究チームより、参照層を2層設けた新しい構造のMTJ素子からなるSTT-MRAMが提案された¹⁸⁾。-40℃から85℃の広い温度範囲において、225 psec幅のパルス信号で 1×10^6 回の高速書き込み動作に成功しており、書き込み速度は従来のnsecオーダーから1桁の高速化を実現している。

続いて、SOT-MRAMの現況について報告する。STT-MRAMは、MTJ素子に直接電流を流して磁化方向を反転させてデジタル情報の書き込みを行う。このため、大き

な電流を流して高速書き込みを行うとMTJ素子のトンネルバリア層がダメージを受け、書き込み耐性が劣化する課題がある。これを解決する一つの方法として、SOT-MRAMの研究が進められている。SOT-MRAMはMTJ素子に重金属薄膜を接合した基本構造を持ち、重金属層内のスピントルク効果で発生させた偏極スピンのスピントルクによって記憶セルの磁化反転を行う3端子素子構造である。SOT-MRAMでは書き込み電流はトンネルバリア層を透過しない構造をとるため、書き込み電流として大電流を印加可能であり、サブナノ秒での高速書き込み実証が期待されている。2020年、東北大は55 nmプロセスのCMOSデバイスとSOT素子による記憶セルを4 KB搭載したデュアルポート型SOT-MRAMチップを試作し、磁界を印加しない環境下において、60 MHz書き込みと90 MHz読み出しを実現した¹⁹⁾。これは、世界初のSOT-MRAMチップ動作の実証であり、実用化に向けた大きな一歩といえる。また、SOT-MRAMの書き込み電流の低減に向けた研究も進められている。SOT素子で従来使われてきた重金属層はスピントルク角 (θ_{SH}) が小さく、記憶セルに印加できるスピントルクの大きさに制限があった。そこで、大きな θ_{SH} を持つトポロジカル絶縁体をスピントルク供給源として採用することが検討されている。2022年、東工大とNHKの研究チームは、トポロジカル絶縁体であるBiSb薄膜と垂直磁化材料であるPt/Co多層膜を接合したSOT素子を作製し、従来よりも1桁小さな電流密度で1 nsecの高速磁化反転を実証した²⁰⁾。あわせて、SOT素子を90 nm以下に微細化すれば、SRAMに匹敵する200 psecの超高速磁化反転を期待できることを示した。

今後、研究・開発がさらに進展し、MRAM技術の応用領域がAI, IoT市場まで拡大することを期待したい。（加藤）

3. 磁気記録

3.1 ハードディスクドライブ

IoTの普及が加速する今日、インターネットやクラウドサービスに接続される情報機器や家電製品の数が増大し続けており、それに伴うデータ量は爆発的に増えている。これらのデータの多くはデータセンター内のハードディスクドライブ (HDD) で保管されており、その量は、2009年の時点では0.3 ZB (zettabyte: 3億TB) 程度であったのに対して、2023年にはその10倍程度になると予想されている。したがって、データセンターで使用される、容量とコストのバランスに優れたニアライン*向けHDDにおいて、需要が継続的に伸びており、更なる大容量化 (高密度記録化) が要求されている。なぜなら、HDDの1台当たりの記録容量が大

* 利用頻度が高く即時の応答性を要求される高性能かつ高速のオンラインシステム (online system) と、長期保存などが必要な時に使用されるオフラインシステム (offline system) との中間を表す「near-online」の略語。

きくなれば、データセンターの消費電力や規模を縮小できるからである（もちろん、データ量の増大よりも容量の増大の方が大きくないと、本当の意味でデータセンターの低消費電力化や規模縮小化はできない）。容量とコストについては、現在のHDDのGB単価は0.014ドル程度（2009年の約1/10）であり、2025年にはそれが1セントにまで下がると予想されている²¹⁾。モバイル型パソコンのメインストレージなどではSSD (Solid State Drive) に取って代わられる傾向にあるものの、HDDにはまだまだ容量とコストの面で分がある。ニアライン向けHDDの実際の需要の伸びについては、2020年における全HDDの生産量に対するニアライン向けHDDの生産量は15%程度であったが、この2～3年で40%程度にまで増大すると予想されており、2023年のニアライン向けHDDの市場規模は年間100億ドル以上になると予想されている。以下、そのデータセンターで使用されるニアライン向けHDDの製品および技術動向を中心に述べる。

(1) 製品動向

データセンターで使用されるニアライン向けHDDの中には、最大で10枚のディスクが入っており、現在の容量は、Western Digital社の製品では22 TB（通常の垂直磁気記録（PMR: Perpendicular Magnetic Recording）方式）と26 TB²²⁾（瓦記録（SMR: Shingled Magnetic Recording）方式）、Seagate社の製品では20 TB（通常の垂直磁気記録方式）、東芝の製品では20 TB（瓦記録方式）である。なお、高密度記録化に関する技術の向上により、これらニアライン向けの大容量HDD以外にも、テレビやレコーダなどの機器に接続して4K解像度で番組の録画ができる大容量外付けHDD²³⁾や高速転送が可能な外付けHDD²⁴⁾などの製品も発表されている。

今後の製品動向として、Seagate社では、熱アシスト記録（HAMR: Heat Assisted Magnetic Recording）方式に対応したHDDを2023年半ばにリリースすることを明らかにし、その容量は30 TB以上²⁵⁾、そして2024年後半には40 TB以上、2026年には50 TB以上になることが予定されている。なお、2023年にリリースする予定の熱アシスト記録方式の30 TB以上のHDDについては、一般ユーザ向けに出荷されることはなく、まずはデータセンター市場の一部にのみ出荷されることが予定されている。また、HDDメーカー3社のうちで唯一、磁気ヘッドと記録ディスクを購入して開発・製造を行っている東芝では、今後もこの体制を維持しながら、2024年度までに22 TB・24 TB・29 TBの製品をリリースする予定とされている。特に30 TB以上の製品には、マイクロ波アシスト記録（MAMR: Microwave Assisted Magnetic Recording）方式を採用するとされている²⁶⁾。

これまで研究段階であった方式が今後実用化されていくことで、ますますの高密度記録化の促進（GB単価の低減）が見込まれ、特にニアライン向けのHDDの需要がさらに伸びていくことが期待される。

(2) 技術動向

最新のHDDには、前述の通り、通常の垂直磁気記録（PMR）方式に加え、瓦記録（SMR）方式が採用されている。本方式は、デジタル情報を記録する（記録ビットの磁化方向を上もしくは下に向ける）際に、屋根に瓦を葺くように、以前（ディスクの1回転前）に記録したビットの一部に重ねてデジタル情報を記録し、磁気記録ヘッドの幅を狭めることなく、トラック（ディスクに対する磁気記録ヘッドの進行方向に対して垂直の方向の）幅を狭めて記録密度を増大させる方法である。Seagate社では、この瓦記録方式の次の世代の記録方式として、前述の通り、熱アシスト記録（HAMR）方式を想定している。記録ビットを構成するナノメートルスケールの微細な磁性粒の磁化方向が、室温の熱エネルギーにより擾乱（変化）しないようにするために極めて大きな保磁力（磁気異方性エネルギー）を有する磁性材料薄膜を用いる必要があるが、その場合、通常の磁気記録ヘッドではデジタル情報を記録することができなくなる。それを可能にする方法が本方式である。デジタル情報を記録する際に、その記録したい領域に局所的に磁性薄膜のキュリー温度近くの熱を加え、その部分の磁性薄膜の保磁力を減少させることで、極端に大きくすることができない磁気記録ヘッドからの磁界でも容易にその部分だけ磁化反転させる手法である。この方式を用いることで、Seagate社は30 TB以上の容量を有するHDDを製品化することを予定している。東芝では、上記の瓦記録方式の次の世代の記録方式として、熱アシスト記録方式ではなく、前述の通り、マイクロ波アシスト記録（MAMR）方式を想定している。前述の通り、極めて大きな保磁力を有する磁性材料薄膜が記録媒体に用いられており、通常の磁気記録ヘッドではデジタル情報を記録することができないが、熱アシスト記録方式と相並び、それを可能にする方法が本方式である。デジタル情報を記録する際に、その記録したい領域に局所的に磁性薄膜の強磁性共鳴周波数のマイクロ波磁界を照射し、その部分の磁性薄膜に磁化振動を励起させて保磁力を減少させることで、極端に大きくすることができない磁気記録ヘッドからの磁界でも容易にその部分だけ磁化反転させる手法である。この方式を用いることで、東芝は30 TB以上の容量を有するHDDを製品化することを予定している。また東芝は、本マイクロ波アシスト記録方式を、記録層を多層化（3次元構造化）した記録媒体に用いることで、更なる高密度記録化を検討している²⁷⁾。これまでのHDDでは、記録ビットを微小化することで記録密度を高めてきたが、微小化による高密度化に関する技術が限界に達しつつあるとも言われている。本方式では、異なる強磁性共鳴周波数を有する磁性薄膜を積層し、ある磁性薄膜の強磁性共鳴周波数のマイクロ波磁界を照射すると、その磁性薄膜のみ保磁力を減少させることができ、磁気記録ヘッドからの磁界でその磁性薄膜のみを選択的に磁化反

転させることが可能になる。本方式は、これまでシミュレーションで議論されてきたが、最近、実証に成功したことで開発が進んでいくことが期待され、2025年頃を目標に3次元磁気記録の実現を目指すとしてされている。

研究レベルで情報記録のデモンストレーションが行われている新たな方式として、強誘電薄膜が成膜された記録媒体を用い、先端尖鋭な導電性プローブ電極からの電圧印加により、記録媒体の電気分極方向を上もしくは下に向けることでデジタル情報を記録する「強誘電体プローブデータストレージ」の研究も進んでいる^{28) 29)}。現在のところ情報再生速度に難があるものの、現行のHDDを超えるTbit/inch²オーダの密度でのデモンストレーション記録に成功している。また、円偏向をもつ光を磁性薄膜に照射し、その円偏向の極性で磁化反転を行う「円偏向誘起磁化反転」方式も提案されている^{30) 31)}。現在のところ磁化反転確率は小さいが、現行の磁気記録媒体に使用されている大きな垂直磁気異方性を有する金属磁性薄膜でのデモンストレーション記録に成功している。

新たな記録方式が次々と提案され、それぞれが着実に進展していき、実用化やデモンストレーション記録の成功につながっていることを考えると、今後もブレイクスルーを生み出す新しい方式が提案され、HDDがますます発展していくことが期待される。

(吉村)

3.2 磁気テープ

磁気テープは、大容量、低コスト、長期保存性に優れるといった特長に加えて、ネットワークから隔離したエアギャップの状態データ保管が可能ることからランサムウェアなどのサイバー攻撃によるデータ破損・消失のリスクも低い。そのため、生成されてから時間が経過しアクセス頻度が低くなったコールドデータを安全安価に長期保管する、いわゆるアーカイブ用途として大手データセンターを中心に利用が進んでいる。

また、データの保管時に常時通電する必要がないことから、HDDに比べてデータ保管において発生するCO₂の排出量を95%削減でき³²⁾、環境負荷を大幅に低減可能な製品としても注目されている。

(1) 製品動向

近年の磁気テープは、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規格と、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、

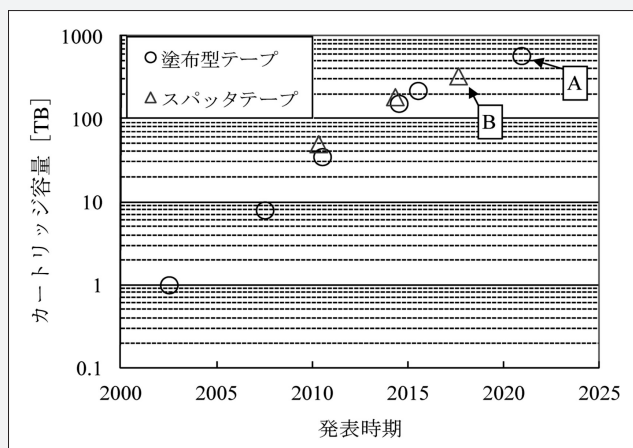


図2 技術デモンストレーションのトレンド

2021年9月に1巻あたり18TBの容量と、400MB/sの転送速度 (いずれも非圧縮) を有する第9世代のLTO-9が市場導入された。LTOのロードマップも第14世代まで拡張されており³³⁾、第14世代では1巻あたりの容量が576TB (非圧縮) にも達する。エンタープライズ分野では、2019年にIBMから発売されたTS1160³⁴⁾が、1カートリッジあたり20TBの容量と、400MB/sの転送速度 (いずれも非圧縮) を実現している。また、これらテープドライブをサポートするIBM社テープライブラリー「TS4500」は、テープドライブ最大128台、LTOテープ最大23,170巻 (最大容量417PB)、3592テープ最大17,550巻 (最大容量351PB) を管理することが可能となっている³⁵⁾。磁気テープは、大容量・高転送速度であることに加えて、保管時に電力を必要としないことから、一定規模のデータを長期間保存するような用途においては、テープドライブ、ライブラリー等のストレージ装置の導入、運用、管理費用も含めた総コストTCO (Total Cost of Ownership) の観点で優れている。LTO第8世代にデータを10年間保管した場合にかかるTCOは、HDDよりも88%、クラウドよりも66%それぞれ低くなるという分析³⁶⁾があり、長期的なデータ保管におけるもっとも経済的な選択肢となっている。

(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。2006年に発表されたバリウムフェライト微粒子塗布型媒体^{37) 38)}は、現在に至るまで、磁気テープの大容量化を牽引しているが、これに代わる次世代テープの研究も進んでいる。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S. Furrerらによる報告^{39) 40)}であり、Aで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201Gbit/inch²³⁵⁾を達成している。また、Bはバリウムフェライトと同じ六方晶フェライトで、高い抗磁力と更なる微粒

子適性を有するストロンチウムフェライト磁性体を用いた塗布型媒体により 317 Gbit/inch²³⁷⁾ を達成したものであり、対応するカートリッジ容量は 580 TB にもなる。

以上より、磁気テープは、技術的にも現行製品の約 30 倍までの容量達成の可能性が確認されており、今後の更なる普及と継続的な大容量システムの継続的な製品化が期待される。
(武者)

4. 光記録

4.1 光ディスク

CD や DVD, Blu-ray Disc などの光ディスクは、ドライブ装置と分離して記録する媒体であり、HDD に比べて安価である。主に、コンテンツの販売やデータのバックアップなどの用途に用いられる。国内の光ディスクプレーヤの出荷台数は 2011 年のピーク時 8,645 千台/年から 2022 年は 1/5 程度の 1,794 千台/年⁴¹⁾ へと急激に減少した。国内の多くのメーカーは光ディスク事業から撤退したが、2022 年 8 月に米 Folio Photonics 社は、動的多層書き込み/読み取り機能を備えた、低コスト/大容量の光ディスクストレージを開発した⁴²⁾。現在のアーカイブディスクが片面あたり 3 層の光学層しかないのに対し、片面 8 層または 16 層のフィルム積層を実現した。2024 年にカートリッジあたり 10 TB (ディスクあたり 1 TB) の発売からスタートすることを目指しており、HDD の 1/5 程度の低価格で提供できる見込みとのことである。
(町田)

4.2 ホログラム記録

近年、増加の一途を辿るビッグデータのアーカイブ保存の重要性は広く認識され、この用途へのホログラムメモリーの適用を目的とした研究が内外の大学や企業において着実に続けられている。主に、より高記録密度・高転送速度を小型で簡素な光学系により実現するためのさまざまな要素技術が提案され実証されている。従来型のホログラムメモリーでは、デジタルデータが明暗 2 値のピクセル値の 2 次元的配列 (ページデータ) に変換され、空間光変調器へ表示される。これにより信号光強度分布が変調され、信号光と参照光の干渉縞がホログラム材料中に記録される。ホログラムは、例えば参照光の入射角を変更すると材料中の同一箇所へ多重記録でき、また、ホログラムへ参照光を照射すると記録された信号光が再生される。撮像素子によりこれを検出することでページデータを一括に再生できることから、大容量性と高速性が実現される。近年は、さらなる大容量化・高転送速度化を目指し、信号光強度の多値変調、信号光位相の多値変調、さらにその両方を併用する複素振幅変調方式が注目され、研究が続けられている。

文献⁴³⁾では、ホログラムメモリーのデータ転送速度の向上を目的として、角度多重記録された 2 枚のホログラムを同時再生する手法が検討されている。ホログラム再生時に記録媒体に照射され 1 枚のホログラムを再生した参照光が、

媒体透過後に再度参照光として記録媒体へ照射される光学系となっている。これら二つの参照光は角度多重ホログラムのうち隣接角度で記録されたホログラムが適切に再生されるように複数のガルバノミラーを用いて角度調整され、また、直交する偏光状態とすることで二つの再生信号光が偏光ビームスプリッタにより分離可能となり、光利用効率の高い高速データ転送が実現される。偏光により異なる光学的損失を補償するためのホログラム露光スケジューリング、位相共役再生や収差補正等の技術も導入され、誤り訂正によりエラーフリーとなるビットエラーレートと 1 Gbps の転送速度を実現可能としている。本技術は、多値変調技術と併用することも可能とされ、さらなる性能の向上が期待される。

深層学習をページデータの検出へ応用する試みも盛んになりつつある^{44) 45)}。文献⁴⁴⁾では、多値位相変調が施された信号光を、従来から知られる干渉計測やフーリエ反復法等を用いずに、深層学習により回復する方法が提案された。深層学習のネットワークアーキテクチャとしては Unet が用いられている。位相変調された信号光のページデータとこの信号光のデフォーカス強度画像を教師データとしネットワークの学習を行い、信号光のデフォーカス強度画像を学習済みネットワークに入力することでその位相ページデータを推測することが可能となっている。ネットワーク学習の高速化のために、ページデータ内の 3×3 シンボルのうち一つに既知の位相データを埋め込むことも提案され実証されている。4 値および 8 値のランダム位相変調信号光がフォトポリマ中にホログラム記録され、ホログラムから再生された信号光を 2 mm だけデフォーカスし強度画像が撮像されている。10,000 枚の強度画像のうち 90% がトレーニングに、10% がテストに用いられている。実験の結果、この手法により 4 値変調の場合に 0.1%、8 値変調の場合に 2.5% のビットエラーレートが達成されている。

ホログラムメモリーを新たな光学システムで実現しようとする試みもある^{46) ~ 48)}。文献⁴⁷⁾では、計算機合成ホログラム (CGH) 技術を利用したホログラムメモリー CGH-HDS に角度多重記録を適用する技術が提案された。CGH-HDS では、ホログラム記録時にはホログラム記録に必要な信号光と参照光を生成するための CGH が空間光変調器 (SLM) に表示され、生成された信号光と参照光が共通の光学系を伝搬したのちホログラム媒体内で干渉することで信号光のホログラムが記録される。ホログラム再生時には参照光のみを生成する CGH が SLM へ表示され、媒体中のホログラムが再生される。CGH の設計において参照光の回折角は任意に設定可能であり、単一光路で構成されるシンプルな光学系による角度多重記録および再生が実現されている。原理実証実験により記録ホログラムの角度選択性が評価され、また、4 枚のホログラムの多重記録が実証された。信号光再生時に参照光の高次回折成分が再生信号光と重畳す

る影響を低減するためにアポダイゼーションフィルタがCGHに適用され、高精度な信号光再生を可能としている。

また、文献⁴⁸⁾においては、複数の複素振幅変調信号光を一括に記録媒体へ記録可能とし、また、信号光検出時に外部参照光を必要としないホログラムメモリーシステムが提案された。データの記録時には、異なるページデータにより複素振幅変調された信号光それぞれに対し異なる線形位相を付与し、これら信号光を一括して生成可能なCGHを位相変調空間光変調器に表示する。CGHにより生成された信号光をレンズによりフーリエ変換すると線形位相に応じて信号光の空間位置が変化し空間的にアレイ状に配列される。参照光との干渉によりこれをホログラム記録することで複数信号光の一括記録が実現される。これら信号光のうち一つは一定振幅・位相を持つ光波とし、データの再生時にはこれを干渉計測の参照光として用いる。記録媒体への参照光の入射により一括記録された信号光はすべて同時に再生されるが、上記の干渉計測用参照光と計測対象の信号光のみをレンズのフーリエ面に配置された二つの開口を有する空間フィルタで抽出し、これらの干渉縞に対しフーリエ縞解析を行うことで信号光の複素振幅が検出される。数値シミュレーションにより低ビットエラーレートで複素振幅変調信号光の検出が可能なことが示されている。

記録媒体に関する研究⁴⁹⁾や、ホログラムメモリーを光学的ニューラルネットワークへ応用する新たな試み⁵⁰⁾などもあり、現状打破へ向けたさまざまな取り組みが展開されている。

(文仙)

5. むすび

IoTの普及やAIの活用により急速なデジタル化が進んでいる。誰もが情報発信できるSNS社会の浸透や、未来社会の基盤として期待されるメタバースの進展のほか、5Gから6Gへの通信速度の大幅な向上、ブロックチェーンにより個人同士でデータ共有・取引を行うWeb3技術への注目など、あらゆる産業で大きな変革が進んでいる。生成されるデータ量の増加はますます加速することが予想される。各種ストレージデバイスは、さらなる高速化と大容量化が要求されるだけでなく、低コスト化と環境にも優しい技術への取り組みも必要とされる。今後も、各種ストレージ技術の研究開発に大きな進展が期待される。

(町田)

(2023年2月3日受付)

〔文 献〕

- 1) Data Age 2025, a collaboration between Seagate and IDC, <https://www.seagate.com/files/www-content/our-story/trends/files/idc-seagate-dataage-whitepaper.pdf>
- 2) IDC Media Center: “国内クラウド市場予測を発表”, <https://www.idc.com/getdoc.jsp?containerId=prJPJ49272922>
- 3) IDC Media Center: “国内データセンター建設投資予測を発表”, <https://www.idc.com/getdoc.jsp?containerId=prJPJ49145522>
- 4) Micron Technology Press Release: “マイクロン、業界初の1 a

- DRAM技術を実現”, <https://investors.micron.com/node/41931/pdf>
- 5) Micron Technology Press Release: “マイクロン、「1ペータ」ノードによる世界最先端DRAMを出荷”, <https://investors.micron.com/node/44661/pdf>
- 6) SK Hynix Press Release: "SK hynix Starts Mass Production of 1anm DRAM Using EUV Equipment", <https://news.skhynix.com/sk-hynix-starts-mass-production-of-1anm-dram-using-euv-equipment/>
- 7) SK Hynix Press Release: "SK hynix Develops World's Fastest Mobile DRAM LPDDR5T", <https://news.skhynix.com/sk-hynix-develops-worlds-fastest-mobile-dram-lpddr5t/>
- 8) サムソン電子ニュース: “サムスン電子、業界最先端技術の12nmクラスDRAMを開発”, <https://semiconductor.samsung.com/jp/newsroom/news/samsung-electronics-develops-industrys-first-12nm-class-ddr5-dram/>
- 9) Solidigm newsroom: "Solidigm Demonstrates World's First Penta-Level Cell SSD at Flash Memory Summit", <http://news.solidigm.com/en-WW/217006-solidigm-demonstrates-world-s-first-penta-level-cell-ssd-at-flash-memory-summit>
- 10) Y. Aiba, H. Tanaka, T. Maeda, K. Sawa, F. Kikushima, M. Miura, T. Fujisawa, M. Matsuo and T. Sanuki: "Cryogenic Operation of 3D Flash Memory for New Applications and Bit Cost Scaling with 6-Bit per Cell (HLC) and beyond", 5th IEEE EDTM Conference, 9421051 (2021)
- 11) T. Sanuki, Y. Aiba, H. Tanaka, T. Maeda, K. Sawa, F. Kikushima and M. Miura: "Cryogenic Operation of 3-D Flash Memory for Storage Performance Improvement and Bit Cost Scaling", IEEE JXCD, 7, 2, pp.159-1 (2021)
- 12) H. Tanaka, Y. Aiba, T. Maeda, K. Ota, Y. Higashi, K. Sawa, F. Kikushima, M. Miura and T. Sanuki: "Toward 7 Bits per Cell: Synergistic Improvement of 3D Flash Memory by Combination of Single-crystal Channel and Cryogenic Operation", IEEE IMW, pp.1-4 (2022)
- 13) Micron Technology Intelligence Accelerated: “業界初の市場投入:世界初の232層NAND”, <https://jp.micron.com/in-japan/articles/2022/july/first-232-layer-nand>
- 14) SK Hynix Newsroom: "SK hynix Develops World's Highest 238-Layer 4D NAND Flash", <https://news.skhynix.com/sk-hynix-develops-worlds-highest-238-layer-4d-nand-flash/>
- 15) Everspin Technologies: <https://www.everspin.com/file/157238/download>
- 16) 齊藤, 伊藤, 帯刀, 園田, 渡辺, 松原, 神田, 下井, 武田, 河野: “16nm Fin FETプロセス混載STT-MRAMにおける72%の書き込みエネルギー低減を達成したセルフターミネーション書き込み方式”, 信学技報, 121, 365, SDM2021-68, pp.1-4 (2022)
- 17) H. Honjo, K. Nishioka, S. Miura, H. Naganuma, T. Watanabe, T. Nasuno, T. Tanigawa, Y. Noguchi, H. Inoue, M. Yasuhira, S. Ikeda and T. Endoh: "25 nm iPMA-type Hexa-MTJ with solder reflow capability and endurance > 10⁷ for eFlash-type MRAM", 2022 IEEE Int. Electron Devices Meet. (IEDM2022), pp.10.3.1-10.3.4. DOI: 10.1109/IEDM45625.2022.10019412 (2022)
- 18) C. Safranski, G. Hu, J.Z. Sun, P. Hashemi, S. Brown, L. Buzi, C. D'Emic, E. Edwards, E. Galligan, M. Gottwald, O. Gunawan, S. Karimeddiny, H. Jung, J. Kim, K. Latzko, P. Trouilloud and D. Worledge: "Reliable Sub-nanosecond MRAM with Double Spin-Torque Magnetic Tunnel Junctions", 67th Annu. conf. Magn. Magn. Mater. (MMM2022), DOB-09 (2022)
- 19) M. Natsui, A. Tamakoshi, H. Honjo, T. Watanabe, T. Nasuno, C. Zhang, T. Tanigawa, H. Inoue, M. Niwa, T. Yoshiduka, Y. Noguchi, M. Yasuhira, Y. Ma, H. Shen, S. Fukami, H. Sato, S. Ikeda, H. Ohno, T. Endoh and T. Hanyu: "Dual-Port Field-Free SOT-MRAM Achieving 90-MHz Read and 60-MHz Write Operations under 55-nm CMOS Technology and 1.2-V Supply Voltage", 2020 IEEE Symposium on VLSI Circuits, pp.1-2, DOI: 10.1109/VLSICircuits18222.2020.9162774 (2020)
- 20) N.H. D. Khang, T. Shirokura, T. Fan, M. Takahashi, N. Nakatani, D. Kato, Y. Miyamoto and P.N. Hai: "Nanosecond ultralow power spin orbit torque magnetization switching driven by BiSb topological insulator", Appl. Phys. Lett., 120, p.152401 (2022)
- 21) IT之家, <https://www.ithome.com/0/661/065.htm>

- 22) Impress, <https://pc.watch.impress.co.jp/docs/news/1408009.html>
- 23) エレコム新製品情報, <https://www.elecom.co.jp/products/ELD-GTV060UBK.html>
- 24) エレコム新製品情報, <https://www.elecom.co.jp/news/new/20221206-02/>
- 25) Tom's Hardware, <https://www.tomshardware.com/news/seagate-aims-to-ship-30tb-hamr-hard-drives-in-mid-2023>
- 26) Impress, <https://pc.watch.impress.co.jp/docs/news/1455334.html?ref=smartnews>
- 27) Impress, <https://pc.watch.impress.co.jp/docs/news/710488.html>
- 28) Y Cho, K Fujimoto, Y Hiranaga, Y Wagatsuma, a Onoe, K Terabe and K Kitamura: "Terabit inch-2 ferroelectric data storage using scanning nonlinear dielectric microscopy nanodomain engineering system", *Nanotechnology*, **14**, 6, p.637, DOI 10.1088/0957-4484/14/6/314 (2003)
- 29) Yasuo Cho and Seungbum Hong: "Materials for Advanced Semiconductor Memories", *MRS Bulletin*, **43**, 5, pp.365-370, DOI: <https://doi.org/10.1557/mrs.2018.98> (2018)
- 30) Y.K. Takahashi, R. Medapalli, S. Kasai, J. Wang, K. Ishioka, S.H. Wee, O. Hellwig, K. Hono and E.E. Fullerton: "Accumulative Magnetic Switching of Ultra-high-Density Recording Media by Circularly Polarized Light", *Phys. Rev. Appl.*, **6**, 5, p.054004, DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.6.054004> (2016)
- 31) J. Wang, S. Sugimoto, S. Kasai and Y.K. Takahashi: "Interlayer exchange coupling modulated all-optical magnetic switching in synthetic ferrimagnetic heterostructures", *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **53**, 47, p.475002, DOI:10.1088/1361-6463/ababd0 (2020)
- 32) Brad Johns Consulting, LLC: "Improving Information Technology Sustainability with Modern Tape Storage", https://asset.fujifilm.com/www/sg/files/2021-09/d9c014a35ae86bdc41d78abf6e693bb1/Improving_IT_Sustainability_with_Tape_BJC.pdf (accessed Jan. 23, 2023)
- 33) "LTO Ultrium Roadmap", <https://www.lto.org/roadmap/> (accessed Jan. 23, 2023)
- 34) "IBM TS1160 テープ・ドライブ", <https://www.ibm.com/downloads/cas/G9ZQGN7L>
- 35) "IBM TS4500 Tape Library Data Sheet", <https://www.ibm.com/downloads/cas/KXYRJYW1> (accessed Jan. 23, 2023)
- 36) A. Arcilla: "Quantifying the Economic Benefits of LTO-8 Technology" (Aug. 2018), <https://www.lto.org/wp-content/uploads/2018/08/ESG-Economic-Validation-Summary.pdf> (accessed Jan. 23, 2023)
- 37) T. Nagata, T. Harasawa, M. Oyanagi, N. Abe and S. Saito: "A recording density study of advanced barium-ferrite particulate tape", *IEEE Trans. Magn.*, **42**, 10, pp.2312-2314 (2006)
- 38) A. Matsumoto, Y. Endo and H. Noguchi: "The feasibility of +15Gb/in² high-density recording with barium-ferrite particulate media and a GMR head", *IEEE Trans. Magn.*, **42**, 10, pp.2315-2317 (2006)
- 39) S. Furrer, M.A. Lantz, P. Reininger, A. Pantazi, H.E. Rothuizen, R.D. Cideciyan, G. Cherubini, W. Haeverle, E. Eleftheriou, J. Tachibana, N. Sekiguchi, T. Aizawa, T. Endo, T. Ozaki, T. Sai, R. Hiratsuka, S. Mitamura and A. Yamaguchi: "201Gb/in² recording areal density on sputtered magnetic tape", *IEEE Trans. Magn.*, **54**, 2, pp.1-8, Art no.3100308 (2018)
- 40) S. Furrer, P. Ebermann, M.A. Lantz, H. Rothuizen, W. Haeverle, G. Cherubini, R.D. Cideciyan, S. Tsujimoto, Y. Sawayashiki, N. Imaoka, Y. Murata, T. Ueyama, Y. Akano, T. Kaneko, H. Suzuki and M. Shirata: "317Gb/in² Recording Areal Density on Strontium Ferrite Tape", *IEEE Trans. Magn.*, **57**, 7, Art no.3101311 (2021)
- 41) 電子情報技術産業協会: "民生用電子機器国内出荷統計", <https://www.jeita.or.jp/japanese/stat/shipment/>
- 42) Folio Photonics news: "Folio Photonics Announces Break-through Multi-Layer Optical Disc Storage Technology to Enable Industry-Disruptive Cost, Cybersecurity and Sustainability Benefits", <https://foliophotonics.com/news/folio-photonics-announces-breakthrough-multi-layer-optical-disc-storage-technology-to-enable>
- 43) Y. Katano, T. Muroi, N. Kinoshita and N. Ishii: "Highly efficient dual page reproduction in holographic data storage", *Opt. Express*, **29**, 21, pp.33257-33268 (2021)
- 44) J. Hao, X. Lin, Y. Lin, H. Song, R. Chen, M. Chen, K. Wang and X. Tan: "Lensless phase retrieval based on deep learning used in holographic data storage", *Opt. Lett.*, **46**, 17, pp.4168-4171 (2021)
- 45) Y. Saito and S. Yoshida: "A study of demodulation Scheme using deep learning for holographic data storage", *Technical Digest of ISOM'21, Tu-A-07* (2021)
- 46) S. Hirayama, R. Fujimura, Y. Tanaka and T. Shimura: "Evaluation of memory characteristics in a surface shift-multiplexing holographic memory", *Technical Digest of ISOM'22, Tu-A-07* (2022)
- 47) N. Yoneda, T. Nobukawa, T. Morimoto, Y. Saita and T. Nomura: "Common-path angular-multiplexing holographic data storage based on computer-generated holography", *Opt. Lett.*, **46**, 12, pp.2920-2923 (2021)
- 48) J. Igarashi, H. Ito and S. Honma: "Synthesis of angular multiplexed SQAM signals and signal detection by self-interference for holographic memory", *Technical Digest of ISOM'22, P-ITu-18* (2022)
- 49) Y. Nakamura, S. Korekawa, H. Aoki, S. Mito and P. Lim: "Effects of Al or Ga substitution on the optical properties of Bi-substituted rare earth iron garnets for magnetic hologram memory", *Technical Digest of ISOM'22, ITuAF-01* (2022)
- 50) R. Tomita and M. Takabayashi: "Dependence of activation function on image recognition accuracy in self-referential holographic deep neural network", *Technical Digest of ISOM'22, ITuPJ-01* (2022)



町田 賢司 1993年、広島大学大学院工学研究科博士前期課程修了。同年、NHK入局。放送技術研究所に勤務。垂直磁気記録ヘッド、スピントロニクスデバイス、空間光変調器の研究に従事。博士(工学)。正会員。



加藤 大典 2003年、関西大学大学院工学研究科博士前期課程修了。同年、NHK入局。放送技術研究所に勤務。プラズマディスプレイ、空間光変調器、磁性細線メモリーの研究に従事。正会員。



吉村 哲 2002年、東北大学大学院工学研究科博士後期課程修了。同年、日本学術振興会特別研究員。名古屋大学助手、九州大学助教、秋田大学准教授を経て、現在教授。機能性磁性薄膜材料、薄膜作製プロセス、磁気デバイスの研究に従事。博士(工学)。正会員。



武部 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。



文仙 正俊 2005年、北海道大学大学院工学研究科博士後期課程修了。同年、福岡大学工学部助手。助教、准教授を経て、現在、同大学教授。ホログラムメモリー、デジタルホログラフィ等、ホログラフィ応用技術の研究に従事。博士(工学)。正会員。