

マルチメディアストレージの研究動向

町田賢司^{†1}, 船橋信彦^{†1}, 武者敦史^{†2}, 文仙正俊^{†3}

1. まえがき

近年, モノのインターネット (Internet of Things: IoT) 時代の到来により, データ化された大規模な情報 (ビッグデータ) がネットワークを通じて活用され, 新たな付加価値が創出されている. また, サーバーを集約して集中処理を行うクラウドコンピューティングに対し, ユーザーの近くでデータを分散して処理するソリューションとして, エッジコンピューティングも注目されている. これにより, 大規模なトラフィックデータの軽減やデータ処理のリアルタイム性向上などのメリットが生まれる. また, 人工知能 (Artificial Intelligence: AI) の進化により, 複雑な解析をはじめ, 自ら学習し, 一定の判断まで行うことも可能になってきた. こうした技術革新により, いわゆる第4次産業革命の流れが始まったとも言える. さらに, 2020年は大容量のデータを高速に転送できる5G時代の幕開けとも呼ばれており, 各通信業者の競争も激化している. それに加

え, 新型コロナウイルス対策によるリモートワーク拡大や外出自粛による映像配信サービスの増加などもあり, 通信データ量は増加の一途を遂げている.

こうしたことから, 2020年における全世界のデータ生成量は44 ZB (zetta=10²¹), 2025年には175 ZBになる¹⁾と予測されていたが, 2020年の実際のデータ生成量は59 ZBを超える見通しである²⁾. 一般的に, ストレージデバイスは記録性能により図1のような階層的な構造となる. 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ある. 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 (Static Random Access Memory: SRAM), メインメモリーのダイナミックRAM (Dynamic Random Access Memory: DRAM), そして最近, 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 (Storage Class Memory: SCM), さらにフラッシュメモリーなどがある.

演算の作業記憶に用いるワーキングメモリーはDRAMより上の階層のメモリーであり, その一般的な構成は, CPU演算回路のごく近傍に配置された“ニアメモリー”と, 拡張メモリースロットの“ファームメモリー”などに分かれる. ニアメモリーには, High Bandwidth Memory (HBM) などの広帯域技術が用いられ, ファームメモリーにはDouble Data Rate (DDR) やNon-Volatile Dual Inline Memory Module (NVDIMM) などが用いられる.

2.2 DRAMの微細化

半導体プロセスによる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に応じて大容量化が進んでいる. DRAMでは, 2018年半ばの時点で「1X nm世代 (19~18 nm)」が量産に入り, 2018年末には「1Y nm世代 (17~16 nm)」が量産に入った. 2019年半ばには「1Z nm

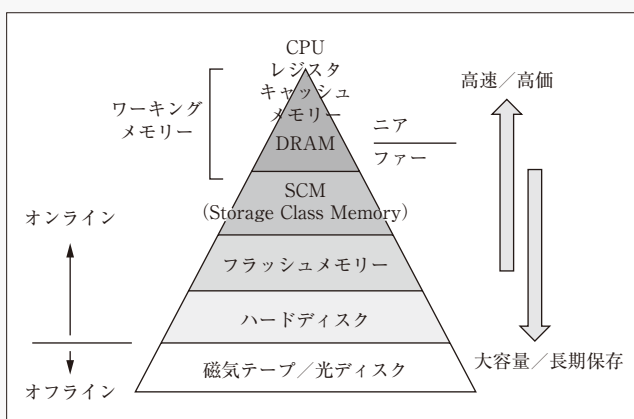


図1 ストレージデバイスの階層構造

^{†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} 福岡大学 工学部

"Trend of Data Storage Device and Technology" by Kenji Machida, Nobuhiko Funabashi (Science & Technology Research Laboratories, NHK, Tokyo), Atsushi Musha (Recording Media Research Laboratories, FUJIFILM Corporation, Kanagawa) and Masatoshi Bunsen (Fukuoka University Faculty of Engineering, Fukuoka)

世代（16～14 nm）」の量産が開始された。また、Micron Technology社は2021年1月に「1 α nm世代（14～13 nm）」の量産出荷を発表しており³⁾、8 Gbitから16 Gbit品を準備している。1 α 世代を適用したモバイルDRAMにおいては、1Z世代に比べて15%の低消費電力化を達成している。さらに、その先の世代は「1 β nm世代（13 nm～）」が予定されているが、さらに次の世代として「1 γ nm世代（推定12 nm）」と「1 δ nm世代（推定11 nm）」の2つの10 nm級が追加され、テクノロジーノードの微細化は鈍化の傾向が強くなっている。

2.3 NAND型フラッシュメモリー

一方、否定論理積（Not AND: NAND）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、4 bit/cellの16値・4ビット記録（Quad-Level Cell: QLC）が主流であるが、東芝メモリー（現・キオクシア）は、2019年12月に、ゲート電極を分断して半円型にすることでセルサイズを縮小してもQLCと同等性能の閾値電圧分布が得られることや、シリコンチャネルとの組み合わせにより5 bit/cellの32値・5ビット記録（Penta-Level Cell: PLC）が実現できることをシミュレーションで明らかにした⁴⁾。また、多層化では、いわゆる3D NANDフラッシュメモリーと呼ばれる積層技術が更なる加速を見せており、2019年には90～96層、2020年には96～176層の量産チップが実現されている。Micron Technology社は、2020年11月に176層の3D NANDフラッシュメモリーを出荷開始した⁵⁾。また、SK hynix社は、2020年12月に周辺回路もセルに積層することでシリコンダイ（シリコンウェハから切り出されたチップ）の面積を削減した独自の4D NAND技術を用いて、176層4D NANDフラッシュメモリーのサンプル出荷を開始した⁶⁾。容量は512 Gbit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り、注目されている。SCMは、DRAMと比べると安価・大容量でありながら、電源がOFFになってもデータを保持する不揮発性メモリーとしての機能を備えている。SCMの役割は、大きく分けて2つある。1つは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階層的な位置付けで利用する。もう1つは、オペレーティングシステム（Operating System: OS）にSCMを高速ストレージと見立て、アプリケーションのデータ領域に割り当てる方法である。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。

この代表的なメモリーには、高速にランダムアクセスが可能な相変化メモリー（Phase change Random Access Memory: PRAM）や抵抗変化メモリー（Resistance Random

Access Memory: ReRAM）がある。2018年5月に、Intel社が3D XPoint技術を基にNVDIMM規格の512 GBメモリーを発表している⁷⁾ほか、2019年10月には、Micron Technology社も同技術を用いたNon-Volatile Memory Express (NVMe) 対応のソリッドステートドライブ（Solid Storage Drive: SSD）を市場に投入した⁸⁾。容量はDRAMの16倍であり、NANDフラッシュメモリーに比べて1,000倍もレイテンシーが小さい。読み込み/書き込み速度は、9 Gbps以上と今日のSSDの3倍程度速い。3D XPoint技術は、Intel社とMicron Technology社の共同で発表されたPRAMであり、寿命も1,000倍長いと言われる不揮発メモリーである。3D XPointメモリーの特長は、ワード線とビット線が直交する点に縦型のメモリーセルを配置するもので、最もセル密度を高めることが可能である。

一方、ReRAM技術では、東芝メモリーより銀タンゲステン合金（AgW）を用いた新しいReRAMが提案された⁹⁾。電圧印加により銀（Ag）イオンを多孔質の酸化シリコン（SiO₂）の空隙に出し入れすることにより、抵抗が変化する。既存のReRAMでは低抵抗状態で流れる電流が大きく、テラビット（Tbit）級の高密度化が困難であるのに対し、AgイオンReRAMでは、低抵抗時の電流は、他のReRAMに比べて大幅に少ない。

2.5 MRAM

現在のグラフィックスプロセッシングユニット（Graphics Processing Unit: GPU）やAI専用チップは、1 W当たり数兆回程度の命令を処理できる演算性能が一般的と言われているが、2030年頃の自動運転等に必要な物体認識AI専用チップには、数100兆～1,000兆回/Wの高い演算性能が望まれている。データ中心のコンピューティング（Computation in Memory: CIM）用チップでは、数10兆～数100兆回/Wの性能が研究開発レベルで実現されているものの、完全自動運転が十分にできるほどの性能には至っていない。また、次世代スマートフォンとして期待されるARグラスと5Gを組み合わせたデバイスにおいても、現実空間のリアルタイム性に対応可能な高い演算性能が必要とされる。スピン注入磁化反転を利用した磁気抵抗メモリー（Spin Transfer Torque Magnetoresistive Random Access Memory: STT-MRAM）は、超低消費電力と高速アクセス性の面から、その最有力候補ではないかと期待されている。STT-MRAMの基本素子は、磁気トンネル接合（Magnetic Tunnel Junction: MTJ）素子である。印加電圧、書き換え時間、書き換え可能数は、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年の不揮発性メモリーである。STT-MRAMの課題は、記録容量の増大と低コスト化であると言われているが、2018年12月には、Everspin Technologies社が28 nm世代の容量1 Gbit STT-MRAMをサンプル出荷している。また、2019年12月には、Samsung Electronics社が、90%以上の高い歩留まりで28 nm世代の

容量1 Gbit埋め込みSTT-MRAM (embedded MRAM: eMRAM)を開発するなど、容量拡大の動きも活発化している。現在、マイクロコントローラーやチップに埋め込まれたフラッシュメモリー (embedded Flash: eFlash) の微細化が28 nm世代で留まっているのに対し、TSMC社やIntel社、Global Foundries社などは、軒並み22 nm世代のeMRAM製造に目途を立てている。2023年には16 nm世代が計画されているが、MTJ素子は10 nmサイズ以下でも動作実証されており、100 Gbit級以上の大容量ワーキングメモリーを実現するポテンシャルを十分に備えている。

磁化方向を電流で制御するSTT-MRAMは、スピン偏極した電子を強磁性層に注入することで、その磁化方向を反転させる技術である。これに対し、重金属表面にMTJの磁化自由層を接合し、重金属内のスピントルク効果により生じた、偏極スピン流のスピントルク (Spin Orbit Torque: SOT) を用いて磁化反転を行う磁気抵抗メモリー (SOT-MRAM) も開発されている。STT-MRAMでは、電流によるMTJの劣化は避けられない構造であるが、SOT-MRAMでは電流とスピンを分離して扱うため、より高速で低消費電力の動作が可能となる。すなわち、大きな電流を流しても素子が破壊されないため、書き込み速度を上げることができる。東北大は、2019年12月に300 mmウェハ上にSOT-MRAMを作製し、書き込み速度0.35 nsecとL1キャッシュ並の性能を達成した¹⁰⁾。

しかしながら、記録密度を上げるとMTJ素子の面積に反比例して電気抵抗が大きくなるため、ノイズにより読み込み速度が低下する問題がある。これを解決するため、SOT-MRAMの重金属層 (スピントルク効果の生じる層) を、膜面垂直方向に高い効率でスピン流を注入できるトポロジカル絶縁体のアンチモン化ビスマス (BiSb) で置き換えた2端子構造のSOT-MRAMが提案されている。最近、記録層に強磁性半導体の砒化ガリウム・マンガン (GaMnAs) を用いることで、実用に必要な1%以上の抵抗変化が観測された¹¹⁾。従来に比べて3桁も高く、実用化に向けた開発が期待される。

(町田)

3. 磁気記録

3.1 ハードディスクドライブ

ハードディスクドライブ (Hard Disk Drive: 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年の前回報告時点では、2019年の出荷台数は3.5億台程度と予測されていたが、実際には3.1億台程度にとどまっており、SSDへの置き換えが急速に進んでいる。世界的な情報量の増大を背景に、ストレージ用途におけるHDDの重要性は変わらないものの、出荷台数は、数年以内に2億台を割り込むとも予想されている¹²⁾。

こうした厳しい状況にも関わらず、持続的な大容量化を実現するため、次世代の記録技術を搭載した製品が発売された。

2020年7月にWestern Digital社から発売されたエンタープライズ向け3.5インチHDDモデルの最大容量は18 TBである。仕様によると、16 TB以上のモデルには、エネルギーアシスト磁気記録 (Energy Assisted Magnetic Recording: EAMR) とトリプルステートアクチュエーター (Triple State Actuator: TSA) が業界で初めて適用されている¹³⁾。これを受けて、9月にSeagate Technology社からヘリウム充填の従来磁気記録方式で18 TBモデルが発売¹⁴⁾されたほか、2020年12月に熱アシスト記録 (Heat-Assisted Magnetic Recording: HAMR) 搭載の20 TB HDDを発売するとの発表¹⁵⁾もあった。

従来の垂直磁気記録方式では、面記録密度1.1 Tbit/inch² (16 GB相当) が上限と言われている一方で、HAMRでは2.7 Tbit/inch²のデモンストレーションが実現されている¹⁶⁾。また、HAMRを超える高密度化技術として注目されているマイクロ波アシスト記録 (Microwave Assisted Magnetic Recording: MAMR) では、東芝による記録ヘッドの動作解析¹⁷⁾など、着実に技術開発が進められており、数年以内の実用化が期待される。

近年、磁気記録分野の注目は、スピントロニクスに基づく固体メモリーや量子コンピュータへの応用に移りつつあるが、EAMRの実用化を契機に、これまで記録不可能とされてきた高Ku材料の開発や新しい記録方式の検討などの研究活性化に繋がることを期待したい。

(船橋)

3.2 磁気テープ

磁気テープは、HDDやSSDと比較し、可搬性が高くオフサイトで保管可能、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。また、磁気テープの特長の一つとして、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総所有コスト (Total Cost of Ownership: TCO) 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¹⁸⁾。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。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、8 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¹⁹⁾。

(1) 製品動向

近年の磁気テープは、市場セグメント的にリニアテープオープン (Linear Tape Open: 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生素子を搭載したヘッドを用いたりニア・サーベント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 Mbps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IBMから発売されたTS1160²⁰⁾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 Mbps（いずれも非圧縮）である。

(2) 磁気テープストレージシステムの動向

磁気テープは、長らく一次ストレージ装置のバックアップ用途に用いられてきたが、データの読み書きに専用のソフトウェアが必要であり、書き込み時と読み出し時には同じソフトウェアを使用しなければならなかった。これに対し、2010年、磁気テープを利用したファイルストレージシステム（Linear Tape File System: LTFS）²¹⁾がIBM等から提唱され、2016年にISO標準として認定された²²⁾。ファイルシステムをサポートしたことで利便性が向上しており、例えば、長期保管時における世代間のデータ引継ぎも容易になっている。また、近年AIやIoTの利用拡大に伴い、膨大なデータを扱えるオブジェクトストレージが急速に普及しており²³⁾、Amazon S3²⁴⁾、Azure Blob Storage²⁵⁾、Google Cloud Storage²⁶⁾などのクラウドサービスが提供されている。これらクラウドサービスに広く用いられているAPIと互換性を持たせた磁気テープオブジェクトストレージシステム²⁷⁾²⁸⁾の提供も開始され、より幅広いサービスやシステムとのインテグレーションが可能となった。今後の普及が期待される。

(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²⁹⁾³⁰⁾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³¹⁾³²⁾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201 Gbit/inch²を達成³¹⁾してい

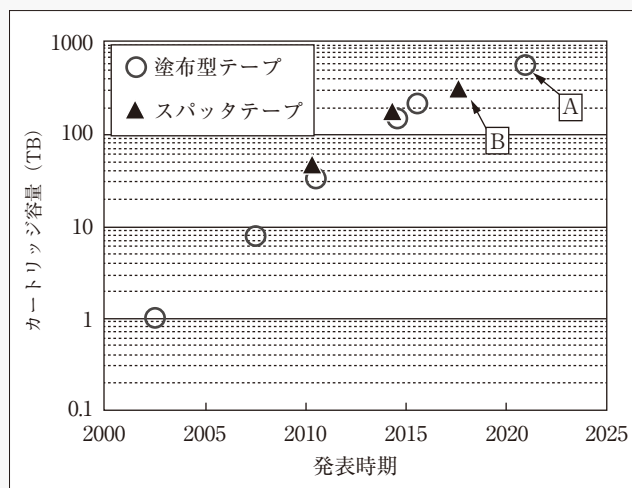


図2 技術デモンストレーションのトレンド

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/inch²を達成³²⁾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、ストレージシステムとしても、クラウドサービスと連携可能な利便性の高い環境が整備されつつあり、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いる。今後の更なる普及と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

近年、光ディスクドライブを備えたPCの激減や、ネット動画配信も普及してきたことから、国内の光ディスクプレーヤーの出荷台数は、2011年のピーク時8,645千台/年から2019年には1/3以下の2,860千台/年³³⁾と急激に減少した。そのため、国内の多くのメーカーは光ディスク事業から撤退している。一方、新たな規格のArchival Disc (AD)では、データセンターや映像ライブラリーなどアーカイブ向けの開発が継続されている。IoT等による情報爆発で保存データ量も増加する一方であり、低コストのアーカイブ用記録装置が注目を浴びている。特に中国での需要増が著しい。

ソニーとパナソニックは、第3世代ADにおいて振幅4値の多値化により、訂正前エラーレートで 6.54×10^{-4} という実用上問題ないレベルを達成した³⁴⁾。ソニーは、容量5.5 TB、読み込み375 Mbpsのデータ転送を実現した第3世代ADを2020年1月より発売している³⁵⁾。（町田）

4.2 ホログラム記録

ホログラムメモリーでは2次元のページデータにより変調された信号光と参照光の干渉縞を、ホログラム材料中に多重記録・再生することで大容量性と高速性が実現される。

従来、記録情報として明暗の強度2値によるシンボルからなるページデータを用いる方式が主流であったが、さらなる高記録密度化、データ転送速度の高速化を目指し、多値変調のページデータを用いる試みが検討されている。信号光の空間強度変調のみでなく位相に対しても変調を行う方式が注目され、複素振幅変調信号の生成法、変調符号法、検出法等、さまざまな観点から広く研究され始めている。

複素振幅変調信号光を1台の位相変調器とレンズ、空間フィルタからなる簡易な光学系により生成する方法として位相交互配置法が提案されている³⁶⁾。この方法ではまず、足し合わせると所望の複素振幅値となるような一様強度の2光波の位相分布を求め、これら位相分布を空間的に交互に配置した位相ページデータにより信号光を変調する。この位相変調光がレンズと空間フィルタにより構成されるローパスフィルタを通過すると不要な信号成分が除去され、所望の複素振幅変調信号光が生成される。実験により振幅2値、位相4値に変調された複素振幅変調信号光が生成され、コンスタレーションマップ上の各シンボル値が十分に分離可能であることが報告されている。

また、信号光の多値複素振幅変調に適した変調符号として20:9変調符号が提案された³⁷⁾。この変調符号では、 3×3 シンボルからなる1ブロック中の中心位置のシンボルを振幅値255、位相値0を持つ参照シンボルとして固定する。1ブロック中にはこの参照シンボル以外に3値振幅レベルを持つ4つの明シンボルが存在し、これらの明シンボルは振幅変調に加えて位相変調も施される。1ブロックが表現する20ビットのうち最初の4ビットはブロック内における明シンボルの位置変調が、残りの16ビットは明シンボルの複素振幅変調が担う。変調に際し、ホログラムメモリーの実際の光学系とノイズ特性を考慮したシミュレーターを利用し、遺伝的アルゴリズムにより最適化された位置変調と複素振幅変調用の2種類の変調テーブルが用いられる。この手法により、ランダム変調符号を用いた場合と比較し、ビットエラーレートを半分に低減することができるため、多値複素振幅変調に効果的な変調符号であることが示された。

位相変調信号光や複素振幅変調信号光を検出する際には、イメージセンサーでは光波の強度分布しか得ることができないため、位相検出法が必要となる。干渉計測法が用いられる場合も多いが、干渉計測に拠らない強度輸送方程式法やフーリエ反復法の適用も研究されている^{38) 39)}。フーリエ反復法を用いる位相変調信号光のシングルショット検出法では、一様強度分布を持つ信号光中の位相ページデータに位相値が既知のシンボルが複数配置される。データ再生時には再生信号光がレンズによりフーリエ変換され、フーリエスペクトル強度分布が撮像される。物体領域における一様強度分布および既知位相シンボルとフーリエ領域におけるフーリエスペクトル強度分布を拘束条件として反復計算を行うと、信号光位相値が検出できる。文献³⁹⁾では

フーリエスペクトル強度分布のダイナミックサンプリングを用いた反復計算の収束速度および位相検出精度の向上法が提案された。ダイナミックサンプリングでは閾値以下のフーリエスペクトル強度が0と置き換えられ、この閾値を反復計算の初期には比較的大きく、反復計算が進むにつれて小さな値とする。フーリエスペクトル強度分布は一般的には低空間周波数成分ほど大きく、高空間周波数成分ほど小さな値を持ち、ダイナミックサンプリングを施すことで収束速度および位相検出精度が向上するとしている。数値シミュレーションおよび実験により、この手法の有効性が検証された。その結果、従来のフーリエ反復法と比較して10回の反復計算終了時の検出位相誤差が、1/3程度に低減されることが実験により示されている。

一方で、記録媒体からの微弱再生信号光を高い信号対雑音比で検出することを目的とし、従来信号光の複素振幅検出に用いられてきた干渉光学系を、ページデータ間の強度差分信号の増幅・検出に利用する方法が提案された⁴⁰⁾。本手法では、再生信号光とオシレーター光を光学系中で重ね合わせた後4分岐し、光学系中に配置された4つのカメラにより、それぞれに位相差を持つ干渉光強度分布を同時に撮像する。さらに、次の再生信号光に対する干渉強度分布もこれらのカメラで撮像し、それぞれのカメラにおいて直前に撮像された干渉強度分布との差分を計算した後、これら差分値を文献中に示される関係式に代入して計算を行うことで、オシレーター光の振幅倍に増幅された信号光強度の差分信号を得るものである。同様に、複数の検出器を使用する従来のホモダイン増幅は、異なる検出器間の光強度差を利用するため誤差の影響を受けやすいのに対し、本手法は同一カメラで検出された光強度差分信号を用いるため、誤差の影響の小さい強度差分信号の増幅が可能であるとしている。実験により提案手法の原理が確認され、また、オシレーター光の強度分布の均一性が低い場合にも、提案手法は従来手法に比べて誤差の小さな増幅が行われることが示されている。

現在、広範な分野で応用されているディープラーニングや圧縮センシングをホログラムメモリーにおけるデータ検出に利用する試みも報告されている。文献⁴¹⁾においては、畳み込みニューラルネットワークが前述の20:9変調符号を用いた複素振幅変調信号の復号に用いられ、従来の硬判定手法と比較して誤りを1/2程度に低減できたことが報告されている。多値変調信号の検出におけるエラーを低減するために、圧縮センシングを利用した復号法も提案されている⁴²⁾。K-SVD法による辞書学習と直交マッチング追跡アルゴリズムが使用され、圧縮センシングにおけるノイズ抑制特性が期待できるとしている。提案された方法は5値振幅変調を用いたシミュレーションと実験により評価され、シミュレーションでは従来の閾値を用いた復号法と比較して、ガウスノイズおよびライスノイズに対し1/4、レイ

リーノイズに対し1/20, これらの複合ノイズに対して1/6程度のビットエラー率が達成可能であることが示されている。現状, 本手法は振幅変調のみに適用可能であるなどの制限もあるが, ホログラムメモリーの多値変調信号の検出法として従来の閾値を用いた方法よりも堅牢であるとしている。

ホログラムメモリーは多値変調, 位相・複素振幅変調やディープラーニング等の新たな技術も取り込みながら, 大容量・高速データ転送に向けた発展が続けられており, 今後の更なる進展が期待される。(文仙)

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PCI Express (PCIe)は, AMD社が2019年より1レーンあたり2 Gbpsの帯域を持つ第4世代のサポートを開始した。また, 第5世代の規格策定は2019年5月に完了しており, 第4世代の2倍の速度(4 Gbps)を実現する。また, 同年6月には第6世代の規格化も開始され, 1レーンあたり8 Gbpsの帯域を目指している。

SSDの通信プロトコルであるNVMeは, PCIeバスを基にSSDに最適化した高速なストレージインタフェースとして策定された。このNVMeをイーサネット, Infiniband, ファイバーチャネルに拡張したものがNVMe over Fabrics (NVMe-oF)であり, プロトコル変換などの手間が減ることと通信効率も高くなる。また, CPUへの負担が小さく, CPU使用率を軽減できることから, オールフラッシュメモリーのデータセンターなどで需要が広がっている。今後, SSDより高速なSCMを用いた新たな高速ストレージアレイに応用する動きもあり, 更なる進展が期待できる。

5.2 オブジェクトストレージ

ネットワークの進歩とともに, クラウドの利用が一般的になってきた。クラウドでは, ユーザーがどこに居てもインターネットに接続できる環境であれば, 同じようにデータへアクセスすることができる。このクラウドを担っているストレージデバイスがHDDやSSDなどである。ファイルサーバーやOS等で扱うデータファイルは, ディレクトリー/サブディレクトリーの形式で階層的に整理され, 一意のパスでアクセスする。小中規模のファイル管理には向くが, 大規模なデータや非構造化データの管理には向かない。

一方, 多くのメタデータとともに, フラットなアドレス空間にデータを保存するオブジェクトストレージが広く利用されるようになった。メタデータの検索とインデックスの作成により, 大規模データや非構造化データへのアクセスも一意の識別子で可能となり, メタデータによるグルーピングも容易になる。また, 通信規格にHTTP(S)が採用されたことで, インターネットを介してRepresentational State Transfer (REST) APIを呼び出し, さまざまな操作

を行うことができる。昨今の非構造化データの増大は著しく, ログやバックアップ, 映像, 音声などのコンテンツ管理など, 今後もさらに拡大していくと考えられる。(町田)

6. むすび

IoTの普及やAIの活用などが進み, さまざまなデータの蓄積も年々大きく増加している。そのため, 各種ストレージの高速化と大容量化がますます要求されており, 特にSCMやワーキングメモリーの研究開発は非常に活発になっている。一方, オフライン用ストレージの研究開発はやや停滞気味である。しかしながら, 爆発的なデータ生成量の拡大の中でこれまで無駄に保存していたと思われるデータであっても, 見方を変えて分析すると有益な情報に変化することもある。そのため, 今後のオフライン用ストレージも更なる高速・大容量化が必須であるとともに, 小型・省スペースで安価であることが求められる。(町田)

(2021年2月8日受付)

〔文 献〕

- 1) <https://www.seagate.com/jp/ja/our-story/data-age-2025/>
- 2) IDC Media Center: "IDC's Global DataSphere Forecast Shows Continued Steady Growth in the Creation and Consumption of Data", <https://www.idc.com/getdoc.jsp?containerId=prUS46286020>
- 3) Micron Technology Press Release: "マイクロン, 業界初の1α DRAM技術を実現", <https://investors.micron.com/node/41931/pdf>
- 4) キオクシアプレスリリース: "3次元フラッシュメモリーの大容量化を実現する半円型構造セル「Twin BiCS FLASH」の開発", <https://about.kioxia.com/ja-jp/news/2019/20191212-1.html>
- 5) Micron Technology Press Release: "マイクロン, 世界初の176層 NANDを出荷開始, フラッシュメモリーに画期的なパフォーマンスと高密度を実現", <https://investors.micron.com/news-releases/news-release-details-204>
- 6) SK Hynix Press Release: "SK hynix Unveils the Industry's Most Multilayered 176-Layer 4D NAND Flash", <https://news.skhynix.com/sk-hynix-unveils-the-industrys-highest-layer-176-layer-4d-nand-flash/>
- 7) Intel Press Release: "Reimagining the Data Center Memory and Storage Hierarchy", <https://newsroom.intel.com/editorials/re-architecting-data-center-memory-storage-hierarchy/#gs.sazb52>
- 8) Micron Technology Press Release: "Micron, 3D XPoint™ Technologyを世界最速SSDと併せて市場投入", <https://investors.micron.com/static-files/8ce1925c-f488-47c1-be33-15ba6049b747>
- 9) M. Yamaguchi, S. Fujii, Y. Yoshimura, R. Nagasawa, Y. Asayama, H. Shirakawa, M. Araidai, K. Shiraishi, T. Nakayama and M. Saitoh: "Physical Origin of Excellent Data Retention over 10years at sub-μA Operation in AgW-Alloy Ionic Memory", IEEE IMW (2019)
- 10) H. Honjo, T.V. A. Nguyen, T. Watanabe, T. Nasuno, C. Zhang, T. Tanigawa, S. Miura, H. Inoue, M. Niwa, T. Yoshiduka, Y. Noguchi, M. Yasuhira, A. Tamakoshi, M. Natsui, Y. Ma, H. Koike, Y. Takahashi, K. Furuya, H. Shen, S. Fukami, H. Sato, S. Ikeda, T. Hanyu, H. Ohno and T. Endoh: "First demonstration of field-free SOT-MRAM with 0.35 ns write speed and 70 thermal stability under 400°C thermal tolerance by canted SOT structure and its advanced patterning/SOT channel technology", IEEE IEDM (2019)
- 11) N.H.D. Khang and P.N. Hai: "Giant unidirectional spin Hall magnetoresistance in topological insulator - ferromagnetic semiconductor heterostructures", J. Appl. Phys. 126, 233903 (2019)
- 12) IDEMA JAPAN: "2020年のストレージとHDD業界展望", <http://idema.gr.jp/common/pdf/news/tenbo2020.pdf>

- 13) Western Digital Press Releases: "Western Digital Extends Capacity-Enterprise HDD Technology Leadership into Broad Family of Data Center Solutions Enabling Unmatched TCO", <https://www.westerndigital.com/company/newsroom/press-releases/2020/2020-07-08-western-digital-extends-capacity-enterprise-hdd-technology-leadership>
- 14) Seagate Technology Press Releases: "Seagate Delivers Enterprise-Ready Exos 18TB Hard Drive Designed for Hyperscale Applications with Proven Enterprise Class Reliability and Data Security", <https://www.seagate.com/news/news-archive/seagate-delivers-enterprise-ready-exos-18tb-hard-drive-designed-for-hyperscale-applications-pr-master/>
- 15) Seagate Technology a Virtual Event: "Datasphere 2020. We're Evolving: Seagate Corporate Strategy Update and Announcements", <https://www.seagate.com/datasphere-2020-us/>
- 16) Seagate Technology Blog: "Energy Assisted Magnetic Recording Will Solve the Need for Capacity", <https://blog.seagate.com/enterprises/energy-assisted-magnetic-recording-will-solve-the-need-for-capacity/>
- 17) 竹尾, 小泉, 高岸, 成田, 前田: "Extended Concept of MAMR and Its Performance and Reliability", 映情学技報, 44, 33, pp17-22 (2020)
- 18) "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 Feb. 1, 2021
- 19) "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_yKSGflVlix.pdf, アクセス日: 2021/2/1
- 20) IBM TS1160 テープ・ドライブ, <https://www.ibm.com/downloads/cas/G9ZQGN7L>
- 21) Linear Tape File System, <https://www.snia.org/ltfs>, accessed Feb. 1, 2021
- 22) ISO/IEC 20919:2016, <https://www.iso.org/standard/69458.html>, accessed Jan. 31, 2021
- 23) "IDC, Worldwide File- and Object-Based Storage Forecast", 2017-2022 (Dec. 2018)
- 24) Amazon S3, <https://aws.amazon.com/s3/>, accessed Feb. 1, 2021
- 25) Azure Blob Storage, <https://azure.microsoft.com/services/storage/blobs/>, accessed Jan. 31, 2021
- 26) Google Cloud Storage, <https://cloud.google.com/storage/>, accessed Feb. 1, 2021
- 27) Tape-based S3 Object Storage, <https://www.point.de/en/products/point-archival-gateway/tape-based-s3-object-storage/>, accessed Feb. 1, 2021
- 28) FUJIFILM オブジェクトアーカイブ, <https://www.fujifilm.com/jp/ja/news/list/3217>, アクセス日: 2021/2/1
- 29) 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)
- 30) 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)
- 31) S. Furrer, M.A. Lantz, P. Reininger, A. Pantazi, H.E. Rothuizen, R.D. Cideciyan, G. Cherubini, W. Haeberle, 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, Art No.3100308 (July 2018)
- 32) S. Furrer, et al.: "317Gb/in² recording areal density on strontium ferrite tape", TechRxiv. Preprint. <https://doi.org/10.36227/techrxiv.13379594.v1>, accessed Feb. 1, 2021
- 33) 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/>
- 34) SONY and Panasonic: "Archival Disc White Paper", https://www.sony.jp/oda/about/J_White_Paper_Archival_Disc_Technology_Ver2_00_20180731.pdf
- 35) SONY Press Releases: "莫大なデータを長期間安全に保管するオプティカルディスク・アーカイブ第3世代発売1カートリッジ5.5TBの大容量と平均3Gbps (375Mbps) の高速データ転送を実現", <https://www.sony.co.jp/SonyInfo/News/Press/201911/19-116/>
- 36) H. Funakoshi and S. Honma: "High density recording by interleaved method with RLL code for holographic memory", Technical Digest of ISOM'19, Mo-C-03 (2019)
- 37) N. Kinoshita, T. Nobukawa, Y. Katano, T. Muroi and N. Ishii: "20:9 Modulation Code for Complex Amplitude Multi-Level Recording in Holographic Memory", Technical Digest of ISOM'20, Su-A-02 (2020)
- 38) M. Bunsen and S. Tateyama: "Detection method for the complex amplitude of a signal beam with intensity and phase modulation using the transport of intensity equation for holographic data storage", Opt. Express, 27, pp.24029-24042 (2019)
- 39) X. Lin, R. Chen, J. Hao, C. Yu, Q. Zheng, X. Qiu, S. Wang, K. Wang and X. Tan: "Dynamic sampling iterative phase reconstruction for holographic data storage", Technical Digest of ISOM'20, We-D-02 (2020)
- 40) K. Yamazaki and M. Yamaguchi: "Optical Signal Amplification between Pages for Holographic Data Storage", Technical Digest of ISOM'20, Su-A-01 (2020)
- 41) Y. Katano, T. Nobukawa, T. Muroi, N. Kinoshita and N. Ishii: "CNN Demodulation for Complex Amplitude Modulation Code in Holographic Data Storage", Technical Digest of ISOM'20, Mo-F-04 (2020)
- 42) J. Liu, L. Zhang, A. Wu, Y. Tanaka, M. Shigaki, T. Shimura, X. Lin and X. Tan: "High noise margin decoding of holographic data page based on compressed sensing", Opt. Express, 28, pp.7139-7151 (2020)



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。



船橋 信彦 2001年, 東京工業大学大学院理工学研究科修了。同年, NHK に入局。放送技術研究所に勤務。HDD用垂直磁気記録媒体, スピントロニクスデバイスの研究に従事。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。



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。