

2005FY-001-02

情報記録テクノロジーロードマップ 報告書

2006（平成18）年3月

財団法人 光産業技術振興協会

KEIRIN



この事業は、競輪の補助金を受けて実施したものです。

序 文

光産業は、1980 年度に 800 億円程度であった国内生産額がこの 25 年間に 100 倍以上の成長を遂げ、2004 年度の国内生産見込み額は 8.4 兆円、前年度比 13.8%増の見通しであり、特に光機器・装置生産額の 20.3%を占めるに至った情報記録分野での進展が著しい。これらは高度情報化社会到来に伴うインフラ整備のみならず、光の持つポテンシャルを最大限に活用できる基礎から応用に渡る産官学の地道な研究開発推進のたまものである。

研究開発を効果的に推進していくためには、将来のニーズがいつ頃、どのような形で表れ、それに対してどのようなタイムスケジュールで技術開発を進めていくべきかの道筋を明らかにしていくことが重要である。当協会では、1997 年度から日本自転車振興会からの補助金を得て、技術開発の道筋を明らかにすることとし、学識経験者から成る光テクノロジーロードマップ策定委員会、及びその下に光テクノロジーロードマップ策定専門委員会を設置し、これまでに情報通信、情報記録、ディスプレイ、ヒューマンインターフェース、計測センシング、光エネルギー、光加工の各分野についてのロードマップを策定している。

特に情報化社会の情報通信分野と両輪をなす情報記録分野については、1998 年に第 1 回のロードマップ策定を行い、2010 年に面密度 1Tb/in²を実現する道筋を示した。

この流れの中で経済産業省のイニシアティブにより 1998 年には面記録 100Gb/in²を目標とした応用産技・大学連携 5 年間のプロジェクト「ナノメータ制御光ディスクシステムの研究開発」、更には 2002 年には情報通信基盤高度化プログラムとして面記録 1Tb/in²を目標とした 5 年間の「大容量光ストレージ技術の開発」プロジェクトが実施された。共に目標を達成しつつ、パイプロダクトを含めこれらの成果は積極的に産業界へ技術移転され、前回策定のロードマップは着実に実現しつつある。

今回のロードマップをローリングすると共に、2010 年代から 2020 年代に来たる超大容量ストレージ時代に描き出される世界像に符合し、牽引できる光情報記録テクノロジーの提言を目指して審議した。その結果、2020 年頃にはほぼ人間の脳と同じ容量のペタバイト級の情報記録社会、いわばヒューマンストレージ社会の到来が迫っているが、現在ペタバイトストレージ実現に向けた現実的な取り組みがない事が明らかになった。そこで新たに提言された記録方式に基づく要素技術を中心に 2020 年を目指した光テクノロジーロードマップを作成した。

本報告書は、大津元一策定専門委員長をはじめ、多くの委員各位および有識者の調査、審議活動、ご支援の下に完成したものである。ここに厚く感謝の意を表する次第である。

2006 (平成 18) 年 3 月

財団法人 光産業技術振興協会
会 長 金杉 明信

平成 17 年度光テクノロジーロードマップ策定委員会 委員名簿

	氏 名	所属機関名・役職名
委員長	田中 昭二	財団法人 国際超電導産業技術研究センター 超電導工学研究所 所長
委 員	荒川 泰彦	東京大学 先端科学技術研究センター 教授 生産技術研究所 教授
	有信 睦弘	株式会社 東芝 執行役常務 研究開発センター 所長
	池上 徹彦	会津大学 学長
	内山 隆	株式会社 富士通研究所 取締役 ペリフェラルシステム研究所長 ストレージシステム研究所長
	大津 元一	東京大学 大学院 工学系研究科 電子工学専攻 教授
	尾形 仁士	三菱電機株式会社 上席常務執行役 開発本部長
	神谷 武志	独立行政法人 大学評価・学位授与機構 学位審査研究部長
	國尾 武光	日本電気株式会社 執行役員 兼 中央研究所長
	古池 進	松下電器産業株式会社 代表取締役専務
	島田 禎晉	株式会社 オプトウエーブ研究所 フェロー
	島田 潤一	独立行政法人 産業技術総合研究所 研究顧問
	高橋 明	シャープ株式会社 技術本部 デバイス技術研究所 所長
	中原 恒雄	住友電気工業株式会社 顧問
	西村 吉雄	東京工業大学 監事
	福永 泰	株式会社 日立製作所 中央研究所 所長
	矢嶋 弘義	超技術開発者集団株式会社 技術顧問
事務局	田口 剣申	財団法人光産業技術振興協会 主幹 担当

平成 17 年度情報記録テクノロジー-ロードマップ 策定専門委員会 委員名簿

	氏 名	所属機関名・役職名
委員長	大津 元一	東京大学 大学院 工学系研究科 電子工学専攻 教授
委 員	池澤 直樹	株式会社 野村総合研究所 コンサルティング部門 チーフ・インダストリー・スペシャリスト
	伊藤 彰義	日本大学 理工学部 電子情報工学科 教授
	入江 正浩	九州大学 大学院工学研究院 応用化学部門(応化機能教室) 教授
	太田 憲雄	日立マクセル株式会社 執行役 開発本部長
	川田 善正	静岡大学 工学部 機械工学科 教授
	杉浦 聡	パイオニア株式会社 技術開発本部 技術戦略部 特許・国家プロジェクト担当部長
	高橋 明	シャープ株式会社 技術本部 デバイス技術研究所 所長
	高橋 研	東北大学 未来科学技術共同研究セクター 未来情報基盤創製分野 大学院工学研究科 電子工学専攻 教授
	土屋 洋一	三洋電機株式会社 研究開発本部 デジタルシステム研究所 担当部長
	都築 浩一	株式会社 日立製作所 中央研究所 副所長
	徳丸 春樹	日本放送協会 放送技術研究所 放送デバイス 主任研究員
	虎沢 研示	名古屋工業大学 テクノイノベーションセンター 教授
	内藤 勝之	株式会社 東芝 研究開発セクター 記憶材料・デバイスラボラトリー 室長
	中島 邦雄	セイコーインスツル株式会社 技術本部 マイクロナノセンター センター長
	波多野 洋	コニカミノルタオプト株式会社 新規事業推進室 マネージャー
	原田 衛	日経BP社 Tech-On! 編集 編集長
	藤村 格	株式会社 リコー 研究開発本部 先端技術研究所 メモリシステム研究室 室長
	前田 修一	株式会社 三菱化学科学技術研究センター R&TD 事業部門 フェロー R&TD コーディネーター 兼 光電材料研究所長
	山本 学	東京理科大学 基礎工学部 電子応用工学科 教授
	渡部 昭憲	エヌ・ティ・ティ・アフティ株式会社 取締役 ECR 事業部長
事務局	杉森 輝彦	財団法人光産業技術振興協会 大容量光ストレージ推進機室 室長
	村上 照夫	財団法人光産業技術振興協会 大容量光ストレージ推進機室 主幹
	横尾 脈	財団法人光産業技術振興協会 大容量光ストレージ推進機室 室員
	佐藤 恒之	株式会社 KRI 技術戦略部 部長

策定経緯

- 平成 17 年 4 月～7 月 次々世代ペタビット級ストレージアンケート調査
- 8 月 3 日（水） 第 1 回情報記録テクノロジーロードマップ策定専門委員会
- 10 月 19 日（水） 第 2 回情報記録テクノロジーロードマップ策定専門委員会
- 10 月～11 月 有識者に対する意見収集、書面審議
- 12 月 1 日（木） 第 25 回光産業技術シンポジウムで第 1 次案報告
- 12 月～1 月 有識者に対する意見収集、書面審議
- 平成 18 年 3 月 28 日（火） 平成 17 年度第 1 回光テクノロジーロードマップ策定委員会
- 報告書案審議 -

目 次

序文

委員会名簿

第 1 章 超大容量ストレージ時代の情報環境と I T 世界像	1
1.1 はじめに	1
1.2 増大する情報ストレージ	1
1.3 ネットワークを介したコンテンツ配信の姿	9
1.4 デジタル映像サービスの高度化とストレージの関わり	18
1.5 記録密度と記録容量の切り口からみた情報ストレージの姿	22
1.6 通信の切り口から見た情報ストレージの姿	28
第 2 章 P B 級ストレージ実現までのロードマップ	31
2.1 前回 (1998 年) ロードマップに関して	31
2.2 1 ペタ bpsi の記録密度とペタバイト級ストレージ実現までの ロードマップ	35
2.2.1 ナノフォトニクスに基づく情報多重化記録再生 (近接場光技術)	36
2.2.2 ナノ自己組織化スピンクラスタ媒体	43
2.2.3 フェードインメモリ	49
2.2.4 ホログラムメモリ	54
2.2.5 超多層記録	62
2.2.6 自己組織化稠密 3 次元構造による超多層記録と 3 次元再構成法	70
2.2.7 単一分子光メモリ - 光記録方式と記録材料 -	74
2.2.8 その他のメモリ技術	77
第 3 章 まとめと今後の課題	79
資料編	83
. PB 級ストレージプロジェクト実現に向けた有識者アンケート調査	85
- 1 アンケート御協力者	87
- 2 アンケート回収票	90
. 1998 年 ~ 2005 年までのストレージ分野の開発動向	121
. 1 1Tbps 実現に向けて技術の開発状況と課題	125
. 現要素技術における技術トピックス	133
. 1 技術トピックス	135
. 2 1 Tbps を実現する技術スペック	148
あとがき	150

第 1 章

超大容量ストレージ時代の情報環境と I T 世界像

1.1 はじめに

1990 年代に始まったデジタル革命（I T 革命）は世界経済や企業の成長、個人のライフスタイルに大きな影響を及ぼしてきた。21 世紀となり I T がパーソナルレベルまで深く浸透し、高速大容量通信網の整備によるコンピュータとインターネット、そして携帯電話をベースとする巨大情報システムが重要な社会基盤となっている。さらに、デジタルカメラやフラットパネルディスプレイなど入出力機器技術の進展には目覚ましいものがあり、従来の CRT に替わり家庭でフル HD の映像が普通となる時代が迫っている。一方、少子化・高齢化社会の到来、大規模災害の発生、テロなどによる社会不安も増大している。このような状況の中で、10 年後 20 年後のデータストレージ環境がどうなるか、そのイメージを描いてみる。

1.2 増大する情報ストレージ

総務省では毎年「情報流通センサス」を実施し、その結果を通信白書に掲載している。平成 15 年度調査で対象としたメディアは図表 1-1 に示す 70 メディアであり、これらのメディアは、情報流通における物理的特性により、電気通信系、輸送系、空間系の 3 つのメディアグループ(系)に分類される。また、一般にメディアは、パーソナルメディアとマスメディアに分類されている。

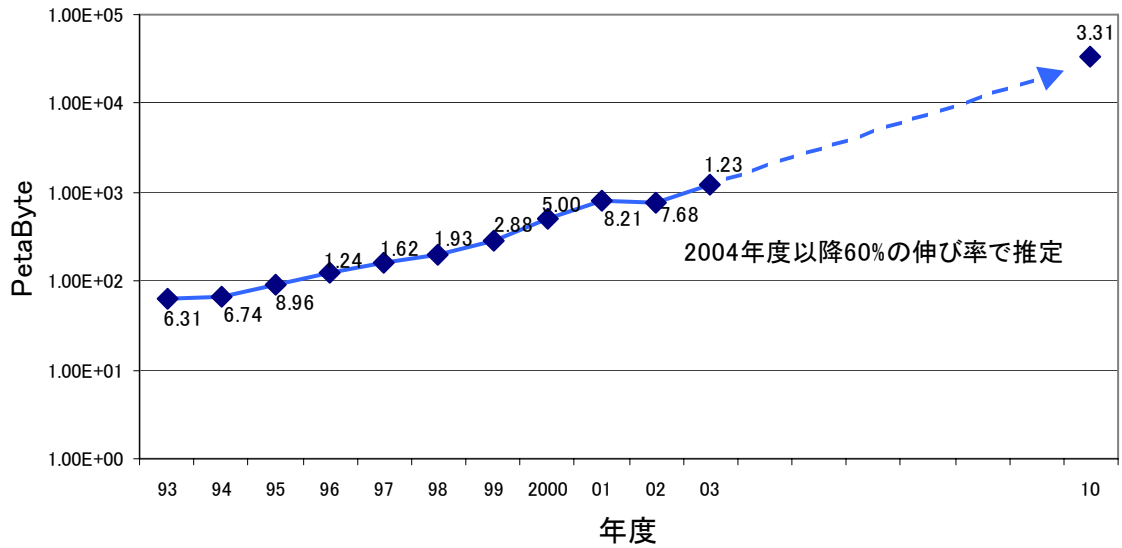
この調査結果による日本の発信情報量（各メディアの情報発信者が、1 年間に送り出した情報の総量。複製を行って発信した場合及び同一の情報を繰り返し発信した場合も含む。電気通信系では、各放送事業者から送信された全番組の情報量、輸送系では、印刷・プレスされて出回った書籍・CD・ビデオソフトの全情報量、空間系では、対話で話し手が話した情報量、各地の映画館・劇場で 1 年間に上映・上演された映画・演劇の情報量の総和。）の推移を図表 1-2 に示す。流通している情報の形態は、書き言葉（文書）、話し言葉、音楽、静止画、動画等に分類されるが、その総量は 2003 年度に 1.23 エクサバイトで、これを年率 60%の伸び率で推定すると、2010 年には 33.1 エクサバイトに増加する。

それでは、日本国内でどれだけの情報量がストレージ媒体に蓄積されているだろうか。前回 1998 年のロードマップでは、「情報流通センサス」にある情報ストック量で表していたが、この統計量は 1999 年以降見当たらない。また、21 世紀になり、蓄積情報量の構成に大きな変化がおきている。図表 1-3 は総務省郵政研究所「WWW コンテンツ統計調査」による、JP ドメインの W E B 上に蓄積されているコンテンツ量の推移である。2004 年 2 月時点で、13.6 ペタバイトが蓄積されている。図表 1-4 は、ファイル種類別情報量の推移である。2002 年から 2004 年にかけて、音声と動画ファイルが急激に増加している。また図表 1-5 に示すように、1998 年と 2004 年の種類別ファイルの構成比を比べると、静止画像の構成

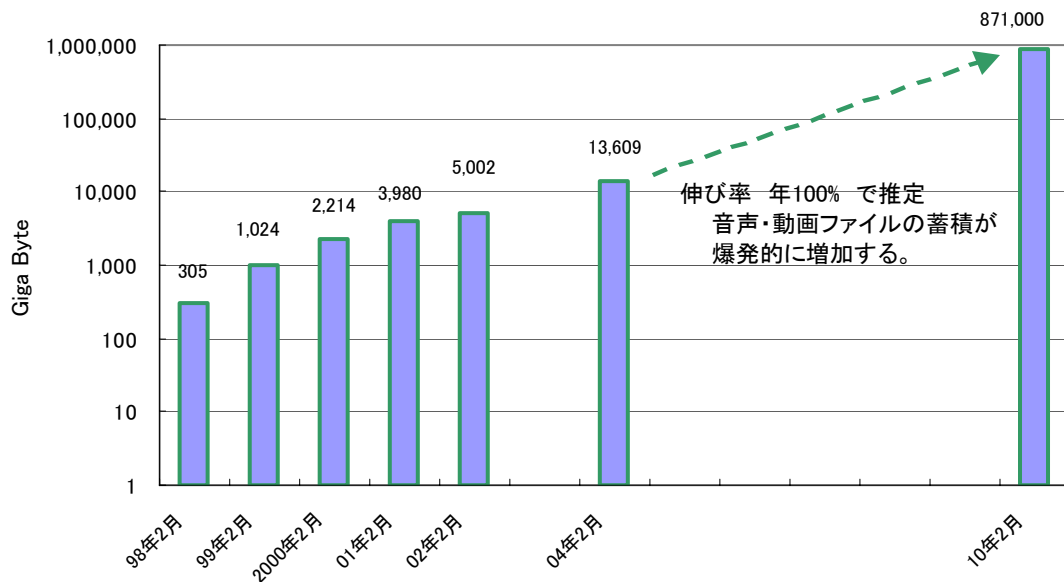
比が減少しているのに比べ、文書画像・データ、音声、動画の割合が大幅に伸びている事がわかる。今後ますます、1ファイルあたりの容量が大きい音声や動画ファイルの流通が増加することを加味し、2004年以降の情報蓄積量を年伸び率100%で予測すると、2010年には870ペタバイト程度になる。これはJPドメインのみなので、すべてのドメイン上の情報蓄積は少なくとも4~5エクサバイトに達すると予測される。

図表 1-1 情報流通センサスの計量対象メディア（出典：総務省 情報通信白書）

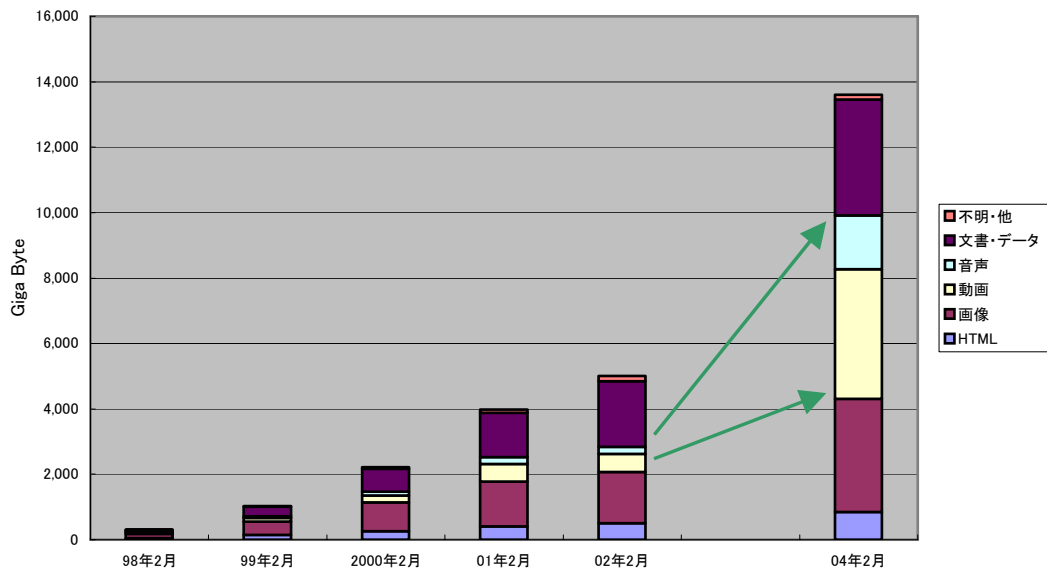
電 気 通 信 系	パーソナル メディア	加入電話、携帯・自動車電話、PHS、無線呼出し、加入回線ファクシミリ、テレビ番組配信（地上波テレビ局への配信）、テレビ番組配信（ケーブルテレビ局への配信）、ラジオ番組配信（地上波ラジオ局への配信）、新聞紙面伝送、専用サービス（電話）、専用サービス（ファクシミリ）、専用サービス（データ伝送）、デジタルデータ伝送サービス、ISDN（電話）、ISDN（ファクシミリ）、ISDN（データ伝送）、ISDN（画像映像伝送）、電報、構内電話（構内通信）、LAN、私設無線、有線放送電話、オフトーク通信、MCA無線、AVM、パソコン通信、データベース、インターネット
	マスメディア	地上波テレビ放送、ケーブルテレビ放送、BSテレビ放送、CSデジタルテレビ放送、衛星デジタルテレビ放送、衛星データ放送、AMラジオ放送、FMラジオ放送、衛星ラジオ放送、有線ラジオ放送、文字放送、FM文字多重放送、構内放送
輸 送 系	パーソナル メディア	封書、はがき、電子郵便、手書き文書、ワープロ文書、コンピュータ文書、パソコン文書、文書コピー
	マスメディア	新聞、雑誌、書籍、その他印刷物、CD-ROM、ビデオソフト、オーディオソフト、DVDソフト、コンピュータソフト、パソコンソフト、図書館、レンタルビデオ、レンタルオーディオ
空 間 系	パーソナル メディア	学校教育、社会教育、会議、対話
	マスメディア	掲示伝送、講演・演劇・コンサート、スポーツ観戦、映画上映



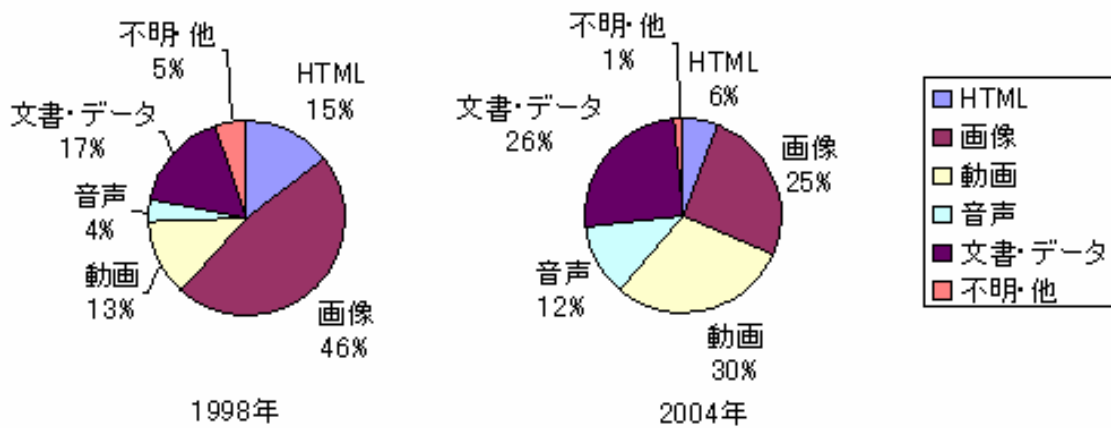
図表 1-2 日本の情報流通量の推移（総務省 情報通信白書を基に作成）



図表 1-3 JP ドメインにある蓄積コンテンツ量の推移
（総務省郵政研究所「WWW コンテンツ統計調査」を基に作成）

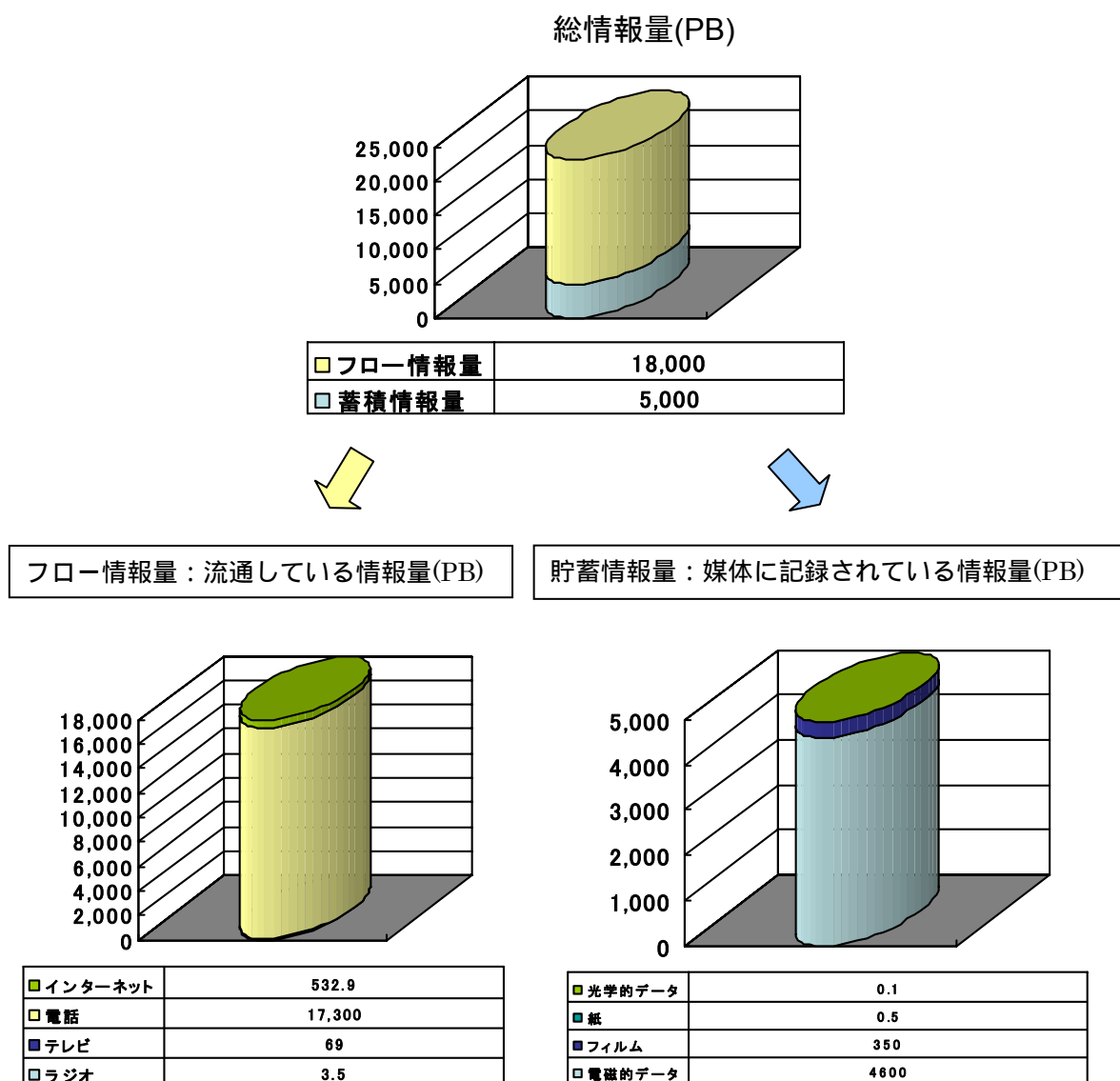


図表 1-4 JP ドメインにあるファイル種類別の情報量の推移
 (総務省郵政研究所「WWW コンテンツ統計調査」を基に作成)



図表 1-5 1998年と2004年のJP ドメインにあるファイル種類別構成比推移
 (総務省郵政研究所「WWW コンテンツ統計調査」を基に作成)

図表 1-6 は、カルフォルニア大学バークレー校が調査した、2002 年における全世界の情報量である。この調査によると 2002 年の全世界の情報量は 23 エクサバイト（フロー情報量 18 EB、蓄積情報量 5EB）に達している。このデータから、年 60%で増加し続けるとすると、2010 年の全世界の総情報量は 1580 エクサバイト、そのうち蓄積情報量は 340 エクサバイトとなる。前述した、2010 年の日本のWEB上にある情報量が、4~5 エクサバイトで、それ以外の蓄積情報量が 10 倍、日本の情報量は全世界の 10 分の 1 とするとオーダ的にも合っている。



図表 1-6 2002 年 世界の蓄積情報量

米国カルフォルニア大学バークレー校「How much information 2003?」を基に作成
<http://www.sims.berkeley.edu/research/projects/how-much-info-2003>

次に大容量光ストレージの具体的な活用ニーズについて考察すると、以下の利用形態が予測できる。

- ・世界的にブロードバンド化が加速し、さらに既存メディア（放送，通信，印刷など）のオール・デジタル化（過去のコンテンツも含む）などが起こる。

（ パーソナルユース、ビジネスユース、アーカイバルユース共通）

- ・デジタル AV 機器の低価格化と世界的な普及によって、世界 65 億のエンド・ユーザーがどんどんデジタル・データをつくり始めて、その量が爆発的に増える。

（ 主にパーソナルユース）

- ・すべての取引や経済活動について、そのデータの厳格な保存が求められる。軍事関係などでもセキュアな大容量ストレージが必須になる。（ 主にビジネスユース）

- ・センサ・ネットワークが普及し、大量の計測データがネットワーク上を駆け巡るようになり、セキュリティ強化のためのカメラが街中だけでなく学校やクルマなど至るところに設置され始める。こうした、記録が必要なリアルタイムに生成されるデータがどんどん増えていく。（ 主にビジネスユース、アーカイバルユース）

- ・P（ペタ）バイトもの容量のデータを、携帯型機器に入れて（または媒体そのものを）一般ユーザーが持ち歩くのは、あまりにも危険になっていく。紛失や盗難があったときの金銭的・精神的な被害が甚大になるからである。そうした機会は減る可能性が高い。（ただし、極めて安全な認証技術や暗号化方式などが考案されればこの限りではない）

（ パーソナルユース、ビジネスユース）

また多様化する情報コンテンツのなかで、今後急速に増大するのが「現状のままこれ以上変更されることのない情報」、すなわちフィックスコンテンツと呼ばれる情報である。フィックスコンテンツには、ビジネス、法律、科学技術等の書類や書籍（大量情報の蓄積場所としては図書館）、図面、静止画像（医療分野におけるレントゲン写真、金融分野における小切手画像、軍事・気象分野における衛星画像等等）、放送用動画（デジタルハイビジョン、配信映画、音楽コンテンツ）など、パーソナルユース、ビジネスユースおよびアーカイバルユース形態がある（図表 1-7）。

これらのコンテンツには、常時更新されるデータベースやデータファイルとは異なり、保存の完全性と長期保存性などが要求される利用形態が多く含まれており、しかも情報量はきわめて大きい。またこれらの様々な配信形態を持つ情報をオンデマンド利用するニーズは、携帯電話等に代表されるモバイル情報端末の普及や進歩に伴い、今後益々増大することは容易に予想されるため、ストレージのシステムには情報通信速度の超高速化とともに認証/暗号化など情報セキュリティも必要となるであろう。

そして新たに生成したデータと過去につくられたPB級の大容量累積データを利用する形態が定着する社会では、

- ・1ビットを格納するためのコストが極めて安価であること。

- ・記録の維持コスト（記録媒体の消費電力、バックアップの手間、媒体寿命にともなう媒体交換時のコピー処理の手間、装置の筐体やそれを入れた建物の維持管理コストを含む）も低価格であるシステムであること。
- ・ストレージの初期導入コストだけでなく、例えば「円 / (ビット・年) = 1 ビットを 1 年間記録しておくためのコスト」といった新しい評価軸で、データ・ストレージのニーズなり媒体開発の方向性を考える必要があること。
- ・携帯型機器や家庭での据置型機器のローカル・メモリなどを想定すると極めて小型で低消費電力の高密度メモリが必要なこと。
- ・テープとは違ってオンライン（かつランダムアクセス）であること。
など、利用形態にあわせた商品開発や運用面における利便性の視点が必要となる。

図表 1-7 フィックスコンテンツの活用し得る分野

業種（大区分）	業種／業務（小区分）	分野
全業種	eメール	取引内容の記録、eメールのログ保管 (パーソナルユース、ビジネスユース)
	Web サイトログ	インターネットビジネスのログ保存、アクセスログの分析や不正侵入の証拠の記録 (ビジネスユース、アーカイバルユース)
	PCデータ	サポートツールとの併用によるデータバックアップ (パーソナルユース、ビジネスユース)
	ERP 電子帳票	保管スペースの削減、検索管理(ビジネスユース)
	コールセンター	通話時の会話音声、オペレータの端末スクリーンの状態記録、トレーニングやクレーム対策 (ビジネスユース、アーカイバルユース)
	eラーニング	講義の動画画像をはじめとする eラーニングコンテンツを保管。時間、場所によらない閲覧。 (ビジネスユース、アーカイバルユース)
通信	コンテンツ配信事業者	MP3音楽ファイルやMPEG動画コンテンツの管理、運営(ビジネスユース、アーカイバルユース)
	アーカイビングセンター	大容量データの保管・管理のアウトソーシング業務 (アーカイバルユース)
製造・建設	CADデータのアーカイブ	過去のCADデータ管理、保管 (ビジネスユース、アーカイバルユース)
医療・医薬	医療全般	レントゲン写真、医療画像、デジタルカルテの管理、薬剤管理(ビジネスユース、アーカイバルユース)
流通・サービス	流通／運輸業	注文書、伝票等の原本のイメージ化と保管 (ビジネスユース)
	印刷／出版業	版下データ(ビジネスユース、アーカイバルユース)
	放送	膨大なコンテンツ管理をアナログ媒体からデジタル化し、保管・管理 (ビジネスユース、アーカイバルユース)
金融	銀行／金融	小切手、伝票、契約書等の原本イメージ化、照会作業の迅速化(ビジネスユース、アーカイバルユース)
大学・官公庁	大学／官公庁	論文や研究資料データ、裁判記録、特許情報、図書館の蔵書をデジタルイメージ化し保管 (アーカイバルユース)

1.3 ネットワークを介したコンテンツ配信の姿

高速・大容量ネットワークの整備とストレージ機器の多様化・大容量化により、ネットワーク上を流通する音声や動画ファイルの量が劇的に増加している。このことは、相対的に音楽CDと映像DVDに代表されるパッケージメディアによるコンテンツ配信の比重が軽くなっていることを示し、2010年代にはオンデマンド型あるいはダウンロード型による配信が主流となる事が予想できる。

図表 1-8、図表 1-9、図表 1-10、図表 1-11 に国内のアクセスネットワークの種類、ブロードバンドネットワークの特徴、回線容量と利用可能なコンテンツの関係、各種コンテンツのダウンロード時間について、平成 13 年度情報通信白書から纏める。

図表 1-12 にコンテンツ市場に占める通信系ソフト（インターネット、携帯電話、通信カラオケ、オンラインデータベースを通じて流通するソフト）の割合の推移を示す（平成 17 年度情報流通白書）。通信系ソフト市場は平成 12 年(3000 億円)から平成 15 年(5000 億円)の3年間で約 2000 億円増加している。また、平成 15 年はデジタル系ソフト市場 2.1 兆円の約 40%を占るまでに拡大している。図表 1-13 は、これら通信系ソフト市場の拡大の様子を示したもので、家庭へのブロードバンドの普及に伴い、高い伸び率で音楽配信、ビデオ配信が普及してきているのがわかる。

音楽配信では、2003 年 4 月に米国アップル社が携帯音楽プレーヤ iPod 向けに始めた音楽配信サービスが、爆発的にヒットし、1 週間で 100 万曲のダウンロードがあり、2005 年 3 月には累計販売楽曲数は 3 億曲を突破している。この米国における音楽配信サービスと CD の出荷状況の様子を図表 1-14 に示す。平成 17 年度の情報通信白書によると、日本国内でも平成 16 年度以降、多くの企業が音楽配信市場に参入し、大手二社の平成 17 年 1 月の月間販売楽曲数は 51 万曲と、5 ヶ月間で 2 倍以上の高い伸びとなっている。図表 1-15 はインタラクティブ配信（音楽配信等ネットワークを用いた放送及び有線放送以外の公共通信等）に係わる J A S R A C（日本音楽著作権協会）が徴収した使用料の推移である。著作権使用料は平成 14 年以降急増し、平成 16 年度には約 10 億円のオーダーに近づいている。また、携帯電話での音楽配信サービスも拡大の一途をたどっている。図表 1-16 は KDDI(株)と沖縄セルラー電話(株)による、「着うたフル」のダウンロード数である。2004 年 11 月にサービスを開始し、2005 年 9 月には累計ダウンロード数が 2000 万曲を突破した。

一方、映像コンテンツについては、サービスが始まったばかりであるが、2005 年 10 月 12 日に、アップル社が iTunes Music Store (iTMS)で動画の販売を開始し、同月 31 日までのわずか 20 日弱で 100 万コンテンツを突破している。また、動画対応の携帯プレーヤ、第 5 世代 iPod も発売されている。日本国内でも、テレビキー局三社が動画のインターネット配信事業に本格的に参入開始するなど、今後急速に普及が進む事が予想される。

このように、ネットワークを介して音楽や動画のコンテンツが、家庭内では PC や HDD + DVD レコーダ等の据え置き型ストレージに、モバイル環境ではフラッシュメモリや小型 HDD を記録メディアに用いる音楽・動画携帯プレーヤ、そして携帯電話にまで一般的に普及

し始めた姿が浮かび上がってくる。

それでは、今後の情報・通信環境はどうなるであろうか。財団法人光産業技術振興協会では、光テクノロジーロードマップ報告書 - 情報通信分野 - の改訂版を2004年3月に纏めている。この中から、情報通信システムロードマップを図表 1-17 に、そして情報家電ロードマップを図表 1-18 に引用して示す。また、情報・通信分野で必要となる技術分野について、総務省が H17 年度情報通信白書に纏めているので、図表 1-19 にこれを示す。

分類	名称	伝送速度	サービス開始年	
固定系	固定電話	電話サービス：上り33.6kbps/下り56kbps	明治23年～	
	ISDN(64kbps)	64kbps	昭和63年～	
	メタリックケーブル	xDSL	ADSL：上り16kbps～1Mbps /下り1.5Mbps～9Mbps程度	平成11年～
			SDSL：1対で1.5Mbps～2Mbps	
			HDSL：2対で1.5Mbps～2Mbps VDSL：上り最大2.3Mbps程度/下り最大52Mbps程度	
光メタル併用	HFC ケーブルテレビ網	ケーブルインターネット：～30Mbps程度 HFC：50Mbps程度	平成8年～	
光ケーブル	FTTH	10Mbps以上	平成12年～	
固定無線系	FWA	～156Mbps	平成11年～	
	高速光空回線	～1Gbps	研究段階	
移動系	移動無線系	PHS：32kbps～64kbps 携帯電話：～28.8kbps (PDC) ～64kbps (cdmaOne) 下り2.4Mbps/上り307kbps (QWAVE EV-DO) IMT-2000：144kbps (高速移動時)～2Mbps (静止時)	自動電報昭和54年～ 携帯電話昭和62年～ PHS平成7年～ IMT-2000 平成13年～ (予定)	
		衛星移動電話	2.4Mbps～9.6Mbps	平成8年～
	衛星系	衛星通信	LEO：数Mbps (固定利用で数10Mbps) GEO：30Mbps (下りのみ)	昭和59年～

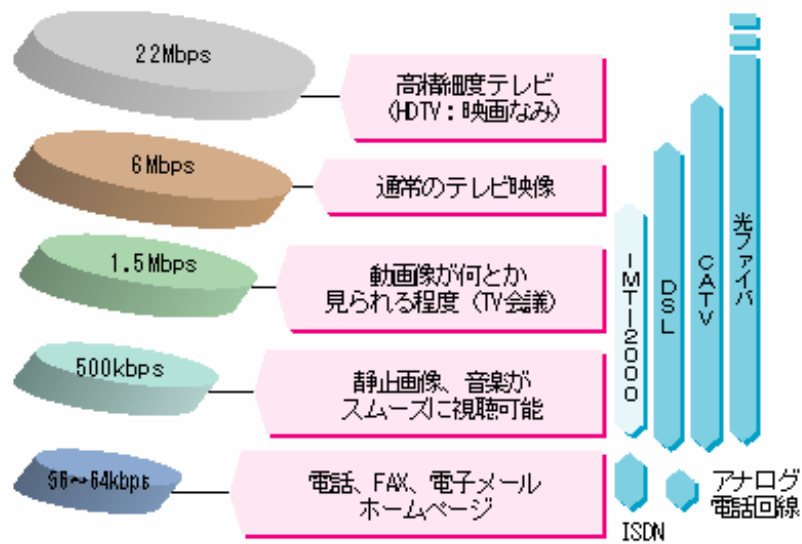
図表 1-8 アクセスネットワークの種類

(出典)H13年 情報通信白書

分類	特徴	
固定系	ケーブルインターネット	一般に低廉な高速サービスを提供しているが、地域ごとの事業者によってサービス内容には相違がある。
	DSL	従来の電話回線（メタリックケーブル）に特殊なモデムを設置し大容量の通信を行う。光化された回線網では利用できないほか、伝送距離が長い場合には十分な通信速度が確保できない場合もある。
	FWA	ギガ帯域の電波を利用して通信を行う。加入者系無線アクセスシステム。回線整備が容易であるが、建築物等による遮蔽の影響を受ける。
	FTTH	光ファイバケーブルを直接契約者建物内に引き込み接続する。東・西NTTでは平成13年度よりサービスが本格化する予定であるが、提供エリアは一部にとどまる。
無線系	IMT-2000	第3世代移動通信システムとも呼ばれ、我が国ではNTTドコモにより平成13年5月から試験サービスが実施されており、本サービスは同年10月から開始予定。従来、9,600bpsだった伝送速度を384kbps(音声通話時64kbps)まで高速化しており、将来的には2Mbpsまで拡張可能な規格となっている。
	第4世代移動通信システム	IMT-2000に次ぐ世代の移動通信システムで、現在システム概念・規格を精査中。2010年頃に、IMT-2000の数～数百倍程度の伝送速度実現を目指す。

図表 1-9 ブロードバンドアクセスネットワークの特徴

(出典)H13年 情報通信白書

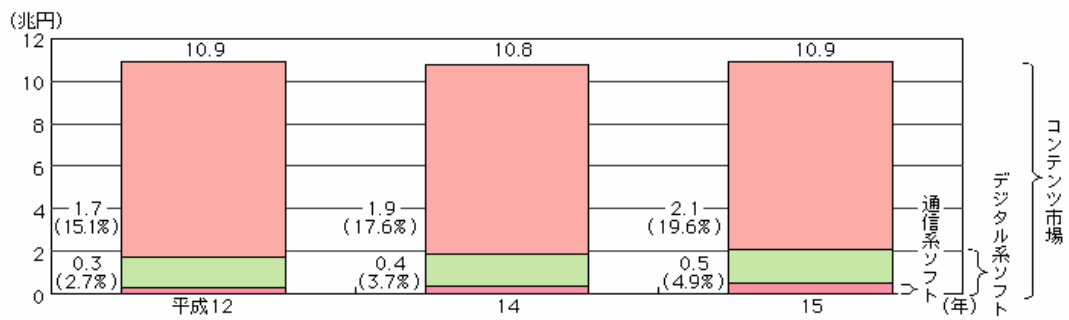


- ※1 ■部分は既に一般家庭で利用されているもの
- ※2 上記図表では、ストリーミング技術を用いた場合に各コンテンツが必要とする回線容量の目安を示している（例えば通常のテレビ映像と同等の画質のコンテンツをインターネット経由で見る場合、6Mbps程度の回線容量が必要となる。）。

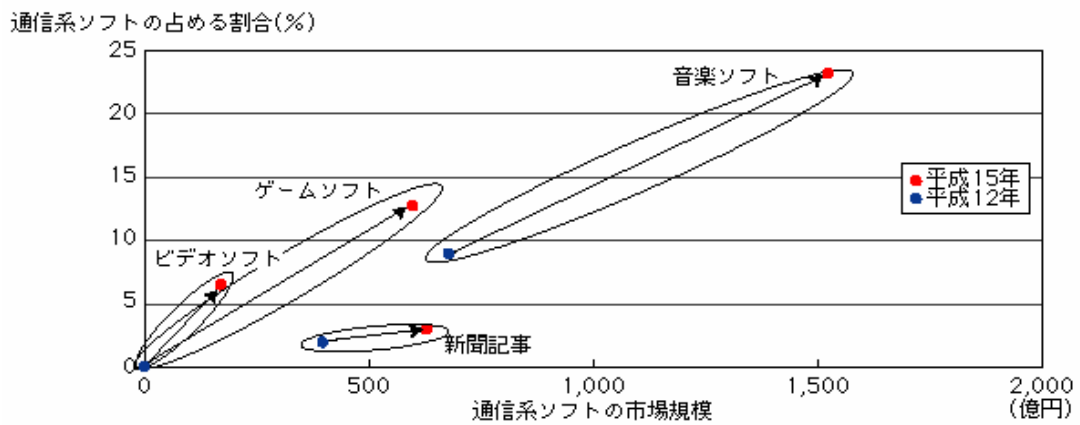
図表 1-10 回線容量と利用可能なコンテンツ
(出典) H13年 情報通信白書

	ISDN(64kbps)	DSL (600kbps*実効)	ケーブルテレビ網(1.5Mbps)	FTTH(100Mbps)
音楽(1曲・約5分) 約4.8Mバイト (MP3)	約10分	約64秒	約25.6秒	約0.4秒
音楽(アルバム・約74分) 約72Mバイト (MP3)	約2時間半	約15分	約6分	約6秒
映画(約2時間) 約3.6Gバイト (MPEG2)	約125時間	約13時間	約5時間	約5分

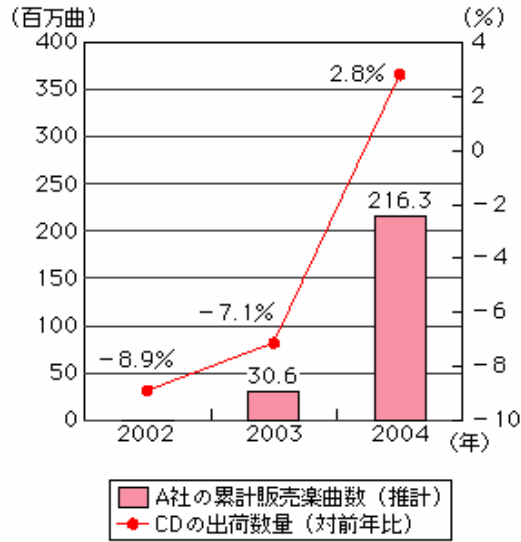
図表 1-11 各種コンテンツのダウンロード時間
(出典)H13年 情報通信白書



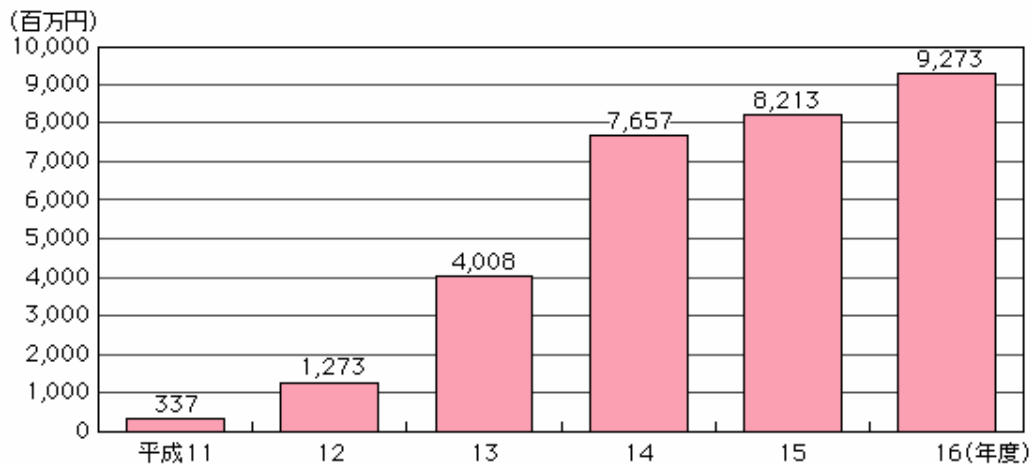
図表 1-12 コンテンツ市場に占める通信系ソフトの割合
(出典)H17 年度情報通信白書



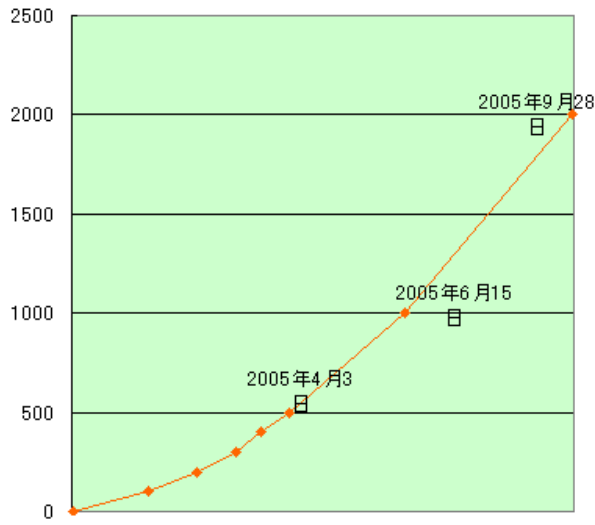
図表 1-13 通信系ソフト市場の拡大
(出典)H17 年 情報通信白書
総務省情報通信政策研究所「メディア・ソフトの制作及び流通の実態調査」



図表 1-14 米国の音楽配信サービスと CD の出荷状況
(出典)H17年 情報通信白書

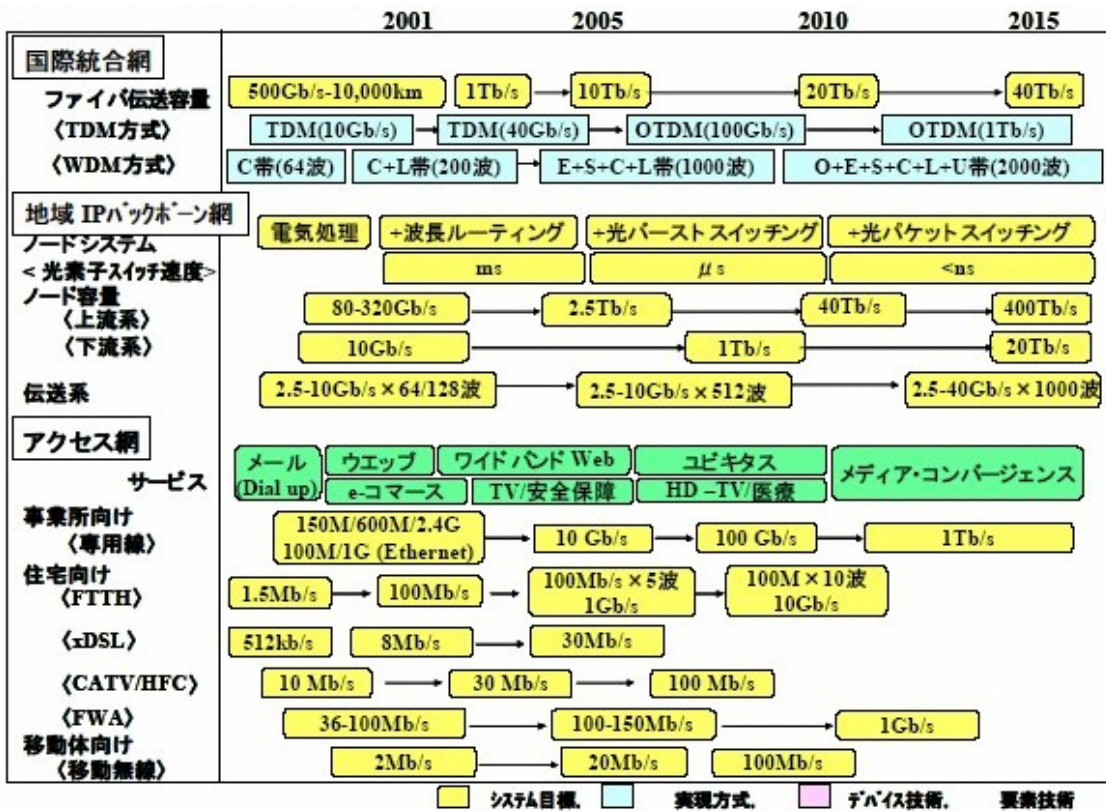


図表 1-15 インタラクティブ配信に関わる JASRAC 使用料徴収額
注：インタラクティブ配信とは、音楽配信等ネットワークを用いた放送及び有線放送以外の公衆通信などを指す。
(出典) H17年 情報通信白書 ((社)日本音楽著作権協会(JASRAC)資料により作成)



横軸は時間, 縦軸の単位は万曲

図表 1-16 「着うたフル」のダウンロード数
(出典) KDDI(株)と沖縄セルラー電話(株)発表資料



図表 1-17 情報通信：システムロードマップ

(出典)財団法人 光産業技術振興協会 光テクノロジーロードマップ報告書 - 情報通信分野 -
2004年3月

図表 1-19 今後必要とされる情報通信技術（総務省 H17 年度 情報通信白書）

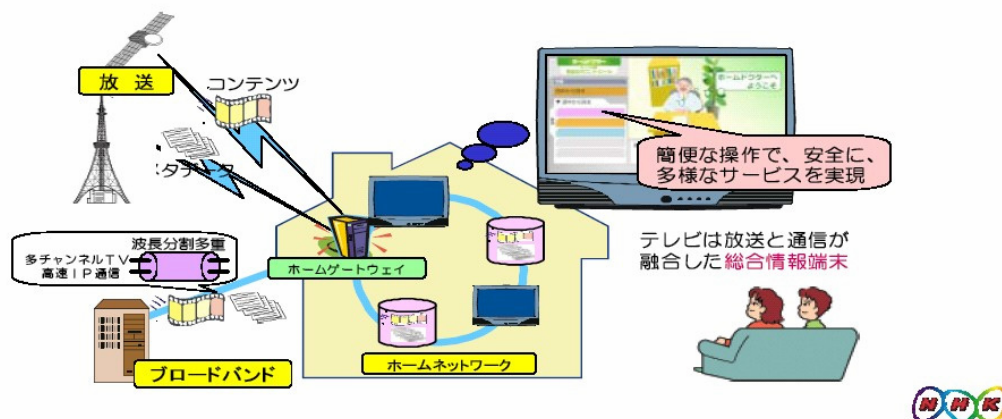
技術名	概要
次世代携帯電話	最大100Mbps程度の通信速度を持つ第3世代(3G)以降の携帯電話技術
FTTH	Fiber To The Home。光ファイバ網において、光信号を分岐するPON(Passive Optical Network)などを用いた一般家庭向け光アクセス技術
光スイッチ/ルーター技術	光素子と電子的素子を使用して、ルーティングなどの制御処理とパケットのスイッチング/ルーティングを行うノード技術
XoIP技術	X over IP。マルチメディアのIP化技術。音声をはじめとして映像等、マルチメディアの通信をIP化する、IP電話(VoIP:Voice over IP)に代表される技術
固定移動共通コア網技術	固定アクセスと無線アクセス間のトラフィックの変動を吸収する固定移動共通のコアネットワークを構築する技術
次世代無線IPネットワーク	ひとつの基地局のサービス範囲が10Km、最大通信速度が300Mbps、高速ハンドオーバー機能を持つ無線ネットワーク技術
超高速(1Gbps)無線LAN/PAN技術	500MbpsクラスのUWB(超広帯域無線方式)やミリ波帯で1Gbps程度の通信速度を持つ無線LAN(Local Area Network)やPAN(Personal Area Network)技術
次世代高次ルーティング技術	利用者の目的・意図を汲み取った上で、ネットワークが自律的に対象物や対象情報への経路を制御するルーティング技術
量子暗号技術・通信技術	電気や光などを用いた通信技術に替わり、量子もつれ合い等の量子力学の基本的性質に基づく暗号・通信技術
実在型ネットワークロボット	家事支援ロボットなどが、ネットワーク化されることにより、互いに協調して家庭やオフィスなどの仕事を支援する技術
ホームネットワーク	家電機器(AV機器、冷蔵庫・エアコン等)をネットワーク化する技術
高精細映像技術	現行の高精細テレビ(HDTV:High Definition Television、200万画素)に比べ、画素数が10倍以上の精細な映像を放送するための高画像圧縮技術や高効率変復調技術
携帯機器技術	定期券やコンビニでの支払いなどの機能、多様なコンテンツが利用できるスケラブル機能、ひとつの機器で複数のネットワークを利用できるシームレス機能などを実現する携帯機器の技術
高精細映像 CDN技術	現行の高精細テレビの4倍程度の高精細な映像を、一般家庭を含む全国の数万から数百万地点に配信・流通させる技術
音声認識・理解技術	自然にしゃべった声を認識し、内容を理解することにより、家電機器などを制御する
電子タグ情報管理システム	電子タグを活用している分野や業界などの中で、シームレスに情報を管理するシステムを構築する技術
コンテンツ作成技術	一般の利用者が映像によるコンテンツを作成し、また、情報発信できる環境を構築する技術
コンテンツネットワーク流通基盤技術	コンテンツの種類やネットワークを介しての流通・利用の形態に対応して、利用者にとって利便性の高いコンテンツの権利保護プラットフォームを構築する技術
生体認証の共通基盤構築	個人認証が可能な、生体認証と認証機関が連携した共通基盤を構築する技術
センサー情報管理技術	テレビカメラなどの分散配置されたセンサーから時系列情報を収集し、マイニングを行う技術と多様なシステム間の共通プラットフォームを構築する技術
ネットワーク構成・運用管理の自動化	ネットワークの利用者や運用者に複雑な操作を強いることなく、自律的にネットワークを構築・運用するための技術
アドホックセンサーネットワーク	アプリケーションの要求を基に、多様な通信環境、ノード配置(例えばセンサー配置)に適応して、ネットワークを自律的に形成する技術
発信源追跡技術	サイバーテロなどに対し、その発信源(攻撃者)を追跡、特定し、ネットワークから排除する機能を持つインフラを構築する技術

1.4 デジタル映像サービスの高度化とストレージの関わり

日本の放送は2011年に完全デジタル化のスケジュールで進んでいる。また米国でも2008年12月31日にアナログ放送を中止する法案を下院委員会が採択している。2010年代はデジタル放送とブロードバンドの普及により、放送と通信とが融合した時代となる。この時代の新しい放送サービスとして、「サーバー型放送」の展開が検討されている。これは図表1-20に示すように、コンテンツとメタデータを放送し、家庭内の大容量蓄積装置（ホームサーバー）に蓄積することを前提としたサービスで、ホームサーバーを使うことによって、見たい番組や情報をいつでもすぐに取り出して視聴することができるようになることと、デジタル放送番組だけでなくインターネットに接続することにより、放送番組と連動した様々なコンテンツをシームレスに視聴できる。

ブロードバンド時代のサーバー型放送サービス

- 放送コンテンツの蓄積受信や、ブロードバンドとの連携による新しいサービス
 - 電波で送る映像・音声・データ放送に加え、ブロードバンド上の番組関連映像を利用
 - メタデータを活用して、放送、通信、ホームサーバー、それぞれのコンテンツをシームレスに組み合わせた、放送・通信連携サービス
 - コンテンツの著作権保護が課題
- テレビは放送と通信が融合した家庭内総合情報端末に



図表 1-20 サーバー型放送サービスのイメージ

(出典) 総務省 ユビキタスネットワーク時代に向けた次世代研究開発ネットワークの在り方に関する調査研究会資料(H15年4月14日)

図表 1-21 は超高精細画像の画素数と生の情報量について纏めたものである。2005 年 10 月に開催された FPD2005(Flat Panel Display)展では、出展各社とも大画面でフル HD 対応の FPD を中心に据えていた。また、現在日本国内の FPD の販売台数は CRT とほぼ同じ台数で、今後 2010 年にかけて家庭内においても FPD が CRT に置き換わり、ハイビジョンクラスの映像がメインとなると予想できる。これに対応してホームサーバの記録容量もテラバイト超級のものが高コモディティとして普及していくことになる。また放送コンテンツの作成過程においては、超高精細カメラやテーブルスキャンでノンリニア編集機用記録媒体として大容量の光メモリやハードディスクが用いられる。

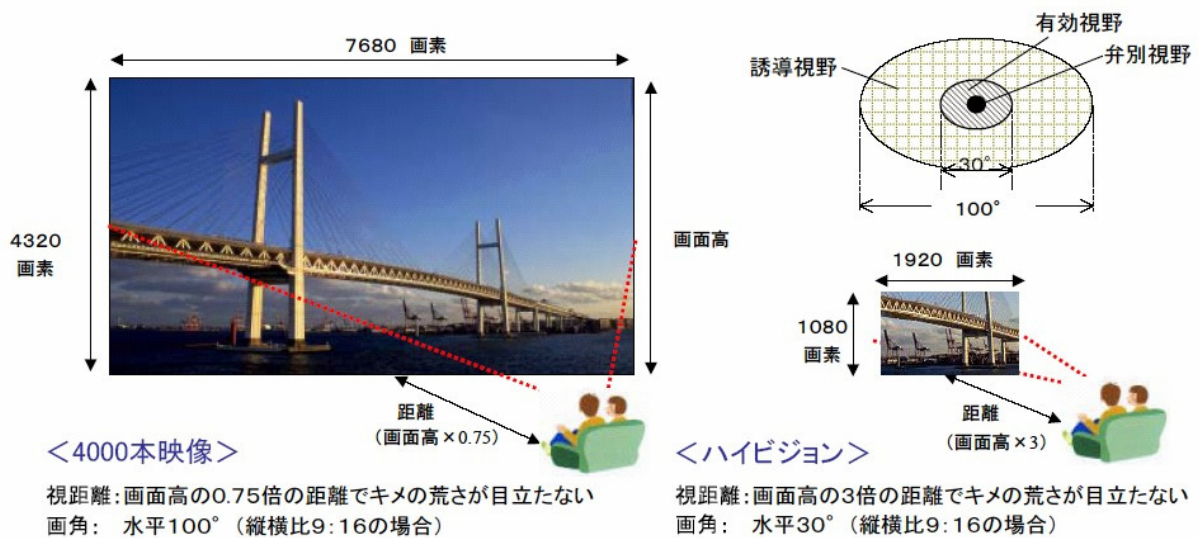
さらにその先には、4000 本級超高精細映像システム～スーパーハイビジョン～の開発が NHK で進められている。図表 1-22 に概要を示すように、ハイビジョンでは有効視野を含むことで臨場感を得、スーパーハイビジョンでは誘導視野まで含むことで没入感が得られるとの事である。このシステムは 2005 年の愛知万博で展示され感動を与えたが、このシステムには記録再生装置として 3.5 テラバイト/18 分のハードディスクが用いられていた。

図表 1-21 超高精細映像の情報量 (出典)レーザー学会学術講演会 (2005.1.21)

方式	画素数	コマ / 秒	映像レート (Gbps)	記録容量 (TB / 時間)
ハイビジョン (1K)	1920 × 1080	60 (飛び越し走査)	1	0.5
デジタル・シネマ (2K)	4096 × 2048	24 (順次走査)	5	2.3
スーパー ハイビジョン (4K)	7680 × 4320	60 (順次走査)	20 (G画素ずらし)	9
			40 (Gフル)	18

4000本級超高精細映像システム

- ハイビジョンは有効視野を含むことで臨場感を得ているが、4000本級システムは誘導視野まで含むことで**没入感**を得る。



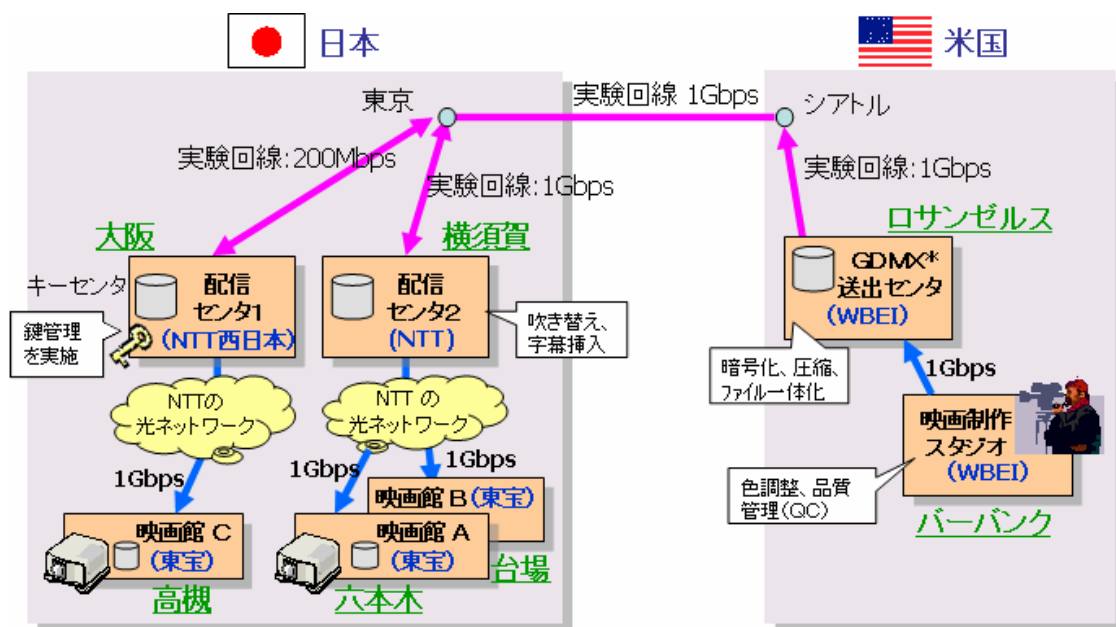
図表 1-22 4000本級超高精細映像システムのイメージ

(出典) 総務省 ユビキタスネットワーク時代に向けた次世代研究開発ネットワークの在り方に関する調査研究会資料(H15年4月14日)

一方映画業界では、従来のアナログフィルムを用いない「デジタルシネマ」と呼ぶ上映方式への移行が進展している。デジタルシネマの映像スペックは図表 1-21 にあるように、ハイビジョンとスーパーハイビジョンのちょうど中間に位置している。2010 年代には DCI 仕様準拠の配給・興行システムによるデジタルシネマが本格的に普及すると予想され、日本では総務省のデジタルシネマプロジェクトにおいて研究開発を進めている。

このような背景の下、Warner Bros. Entertainment Inc.、ワーナー エンターテイメント ジャパン(株)、日本電信電話(株)、西日本電信電話(株)、東宝(株)は、2005 年 10 月にデジタルシネマ共同トライアル「4K Pure Cinema」の実施を開始した。システムの概要は、図表 1-23 にあるように、DCI (Digital Cinema Initiatives) 仕様最高水準の 4 K 規格 (4,096 × 2,160 画素、800 万画素クラス) と、その 4 分の 1 の 2 K 規格 (2,048 × 1,080 画素、200 万画素クラス) の両方の映像を、日米間を 1Gbps 高速光ファイバー実験回線をつなぎ、米国ワーナーブラザーズと NTT 横須賀研究開発センターで上映作品を加工した後、NTT 西日本の大阪データセンターへ配信、NTT 横須賀研究開発センターおよび NTT 西日本の大阪データセンター内のサーバーから国内の 3 劇場にコンテンツを配信すると同時に、NTT 西日本の大阪データセンターではコンテンツを利用するための暗号鍵を生成し、上記 3 劇場に配信するものである。

デジタルシネマが普及すると、映画の配給元と各映画館を高速ネットワークで結び、各映画館には数十テラバイトクラスの大容量ストレージが稼働するシステムが展開されることになる。



図表 1-23 デジタルシネマ実験システム

(出典) 報道発表資料 (2005 年 10 月 11 日)

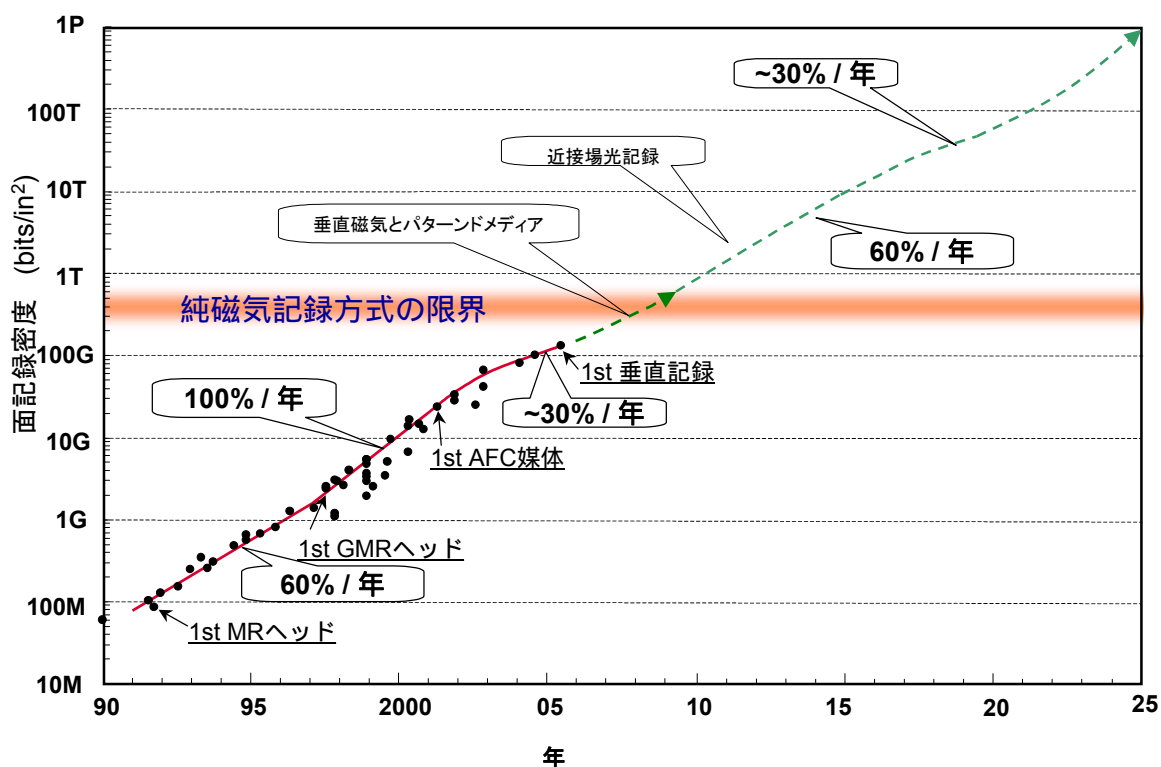
Warner Bros. Entertainment Inc. ワーナー エンターテイメント ジャパン株式会社
 日本電信電話株式会社 西日本電信電話株式会社
 東宝株式会社

1.5 記録密度と記録容量の切り口からみた情報ストレージの姿

(テラからペタバイト時代の情報ストレージの姿)

これまで見てきたように、2010～2015年には、情報通信技術の目覚ましい進展により、ネットワークが隔々にまで行き渡り、時間や場所の制約を受けずに、必要とする情報や知識を、誰もが自由に創造、流通、共有できる時代となる。また、ネット社会の進展で情報量は急激に増加していて、社会インフラ及び個人レベルでも利用シーンに応じた大容量ストレージが必要となる。

図表 1-24 は固定型ストレージ(製品)の面記録密度の実績と今後の予測トレンドである。面記録密度は2005年に130 Gigabit / inch²の垂直磁気ディスクが初めて商品化され、今後しばらく60%近い伸び率で進み、パターンメディアの採用、近接場光記録を用いた光・磁気ハイブリッド固定型ストレージへの技術の進展を経て2015年くらいまで60%の伸び率で進歩する。その後しばらく伸び率が低くなることが予想されるが、2020年代初めには新たな革新技術を実用化し、2025年には1 Petabit / inch²の記録密度に達する。ドライブ製品の記録容量を記録密度の10倍とすると、1テラバイトと1ペタバイトの製品が市場に出てくるのはそれぞれ2005年と2020年ということになる。

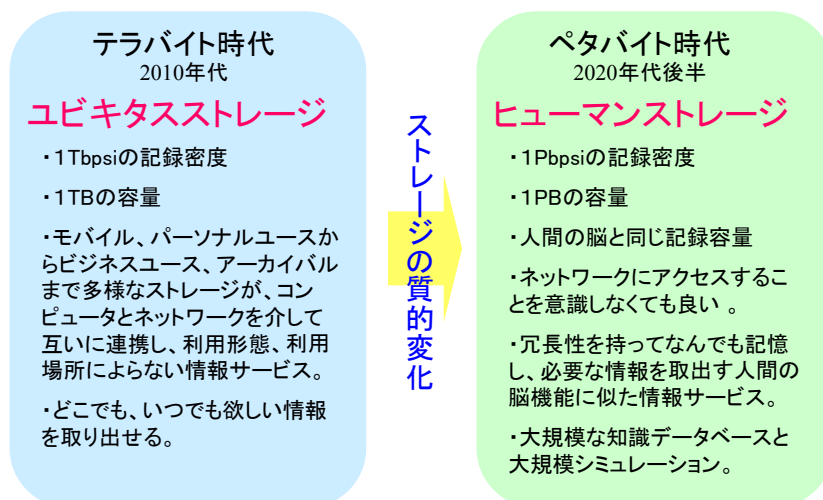


図表 1-24 固定型ストレージ(製品)の面記録密度トレンド

1 Terabit/inch² の記録密度と1テラバイトの記録容量が実用化される時代をテラバイト時代、1 Petabit/inch² の記録密度と1ペタバイトの記録容量が実用化される時代をペタバイト時代と名づけると、2010年代がテラバイト時代、2020年代後半がペタバイト時代となる。図表 1-25 に示すように、1 Terabit/inch² の記録密度と1テラバイトの記録容量が実用化した時、光ストレージが関与する局面は、モバイル、パーソナルユースからビジネスユース、アーカイバルまで多岐にわたり、多様なストレージがコンピュータとネットワークを介して互いに連携しあう、いわゆるユビキタスストレージと呼ぶ情報世界が本格的な展開の時期を迎える。これにより、超高速の光通信、無線通信、移動通信やホームネットワークが融合し、利用場所や利用形態によらず、いつでも、どこでも欲しい情報を取り出す事ができる。

さらに、1 Petabit/inch² の記録密度と1ペタバイトの記録容量が実用化すると、テラの時代とは量的だけでなく質的にも進化したストレージの世界が展開する。それは、人間の脳の記憶容量が10の13乗から15乗ビットといわれているので、ほぼ人間の脳と同じ記録容量を手に入れることになり、いわばヒューマンストレージの情報世界といえる。この時代になるとデジタル配信サービスもさらに大規模かつ多様化しているので、ネットワークにアクセスすることを意識せずに、冗長性を持ってなんでも記憶し、必要な情報を取り出す、人間の脳機能に似た情報サービスが考えられる。

一方 CPU の能力はムーアの法則によると、10年間で100倍になる。現在 Pentium は、3 GHz のクロックで毎秒100Gbyte の処理能力があるので、10年後には毎秒10Tbyte の処理速度となる。ムーアの法則がそのまま伸びないとしても、複数個の CPU をクラスター的に使用する事で毎秒ペタバイトの情報処理が現実的な値となる。ペタオダの記録容量と情報速度により、これまで難しかった大規模な知識データベースや情報処理、分子レベル遺伝子レベルの生命科学、災害予知や気象、環境など地球規模の大規模シミュレーションが出来る時代となる。



図表 1-25 テラからペタのストレージ

図表 1-26 はテラバイト時代を実現するであろうユビキタス・ストレージの世界像である。ユビキタスとは、ラテン語の“ubique = あらゆるところで”を基にした言葉で、その名のとおりにユビキタス・ストレージ世界では、人間の生活環境のいたるところでコンピュータ、ネットワーク、ストレージが相互に連携し、ユーザーはいつでも、どこでも、好きな情報を取り出す事が出来る。

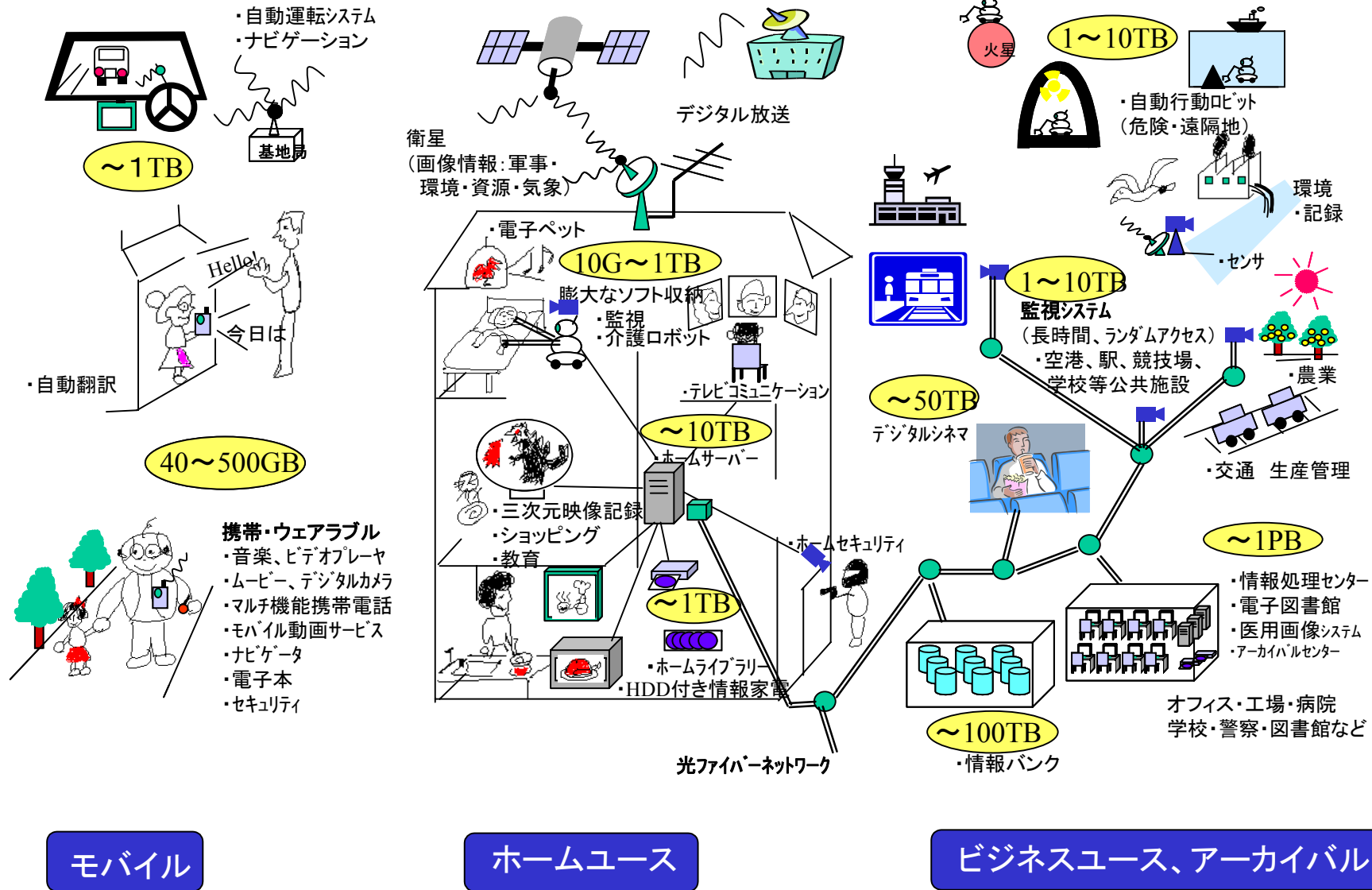
モバイル、ホームユース、ビジネスユース、アーカイバル各シーンで中心となるのは光と磁気が融合した小型・大容量の固定型ストレージで、これを半導体メモリと可換型の光メモリとで補完する形となる。半導体メモリについては、フラッシュメモリの価格が著しく低下し、モバイル用途で 10~20 ギガバイトクラスの容量はフラッシュメモリが用いられる。図表 1-27 に、記録密度 1 Terabit/inch² が実現した時、上記各シーンで使われる多様なストレージ機器とその容量を示す。モバイル用途のストレージでは 0.85 インチクラスで数十ギガバイト、1.8 インチクラスで数百ギガバイト、据え置き型ストレージで 1~10 テラバイトの容量となる。

この時代の新しいサービスに、情報バンクでのメモリ保管サービスがある。パーソナル用途でも数十から数百ギガバイトのデータを扱う時代では、何かの要因でメモリが破損したり紛失した時の物理的、心理的ダメージは大きい。そこで、バックアップ用として長期間情報を預かるビジネスが期待される。これにより、自然災害やセキュリティの観点からも安心で、しかも外出先からも自由にアクセスする事が出来る利便性もある。

また、テロや犯罪等による社会不安も増大していて、ホームセキュリティから空港、駅、競技場、学校等公共施設の監視システムの中にストレージ機器が組み込まれる。

アーカイバル用途では、現在磁気テープが用いられているがアクセス性に難があるので、大容量の固定型ストレージ、あるいは媒体コストの安さから可換型光ディスクメモリへと移行していくことになる。また、100 年以上の媒体の信頼性と、100 年以上変わらないシステムの構築も必要となる。

ビジネスシーンでは、図表 1-28 で示すように、いろいろなデータベースが超高速デジタル通信網でつながっている情報ネットワークの世界が浮かび上がる。

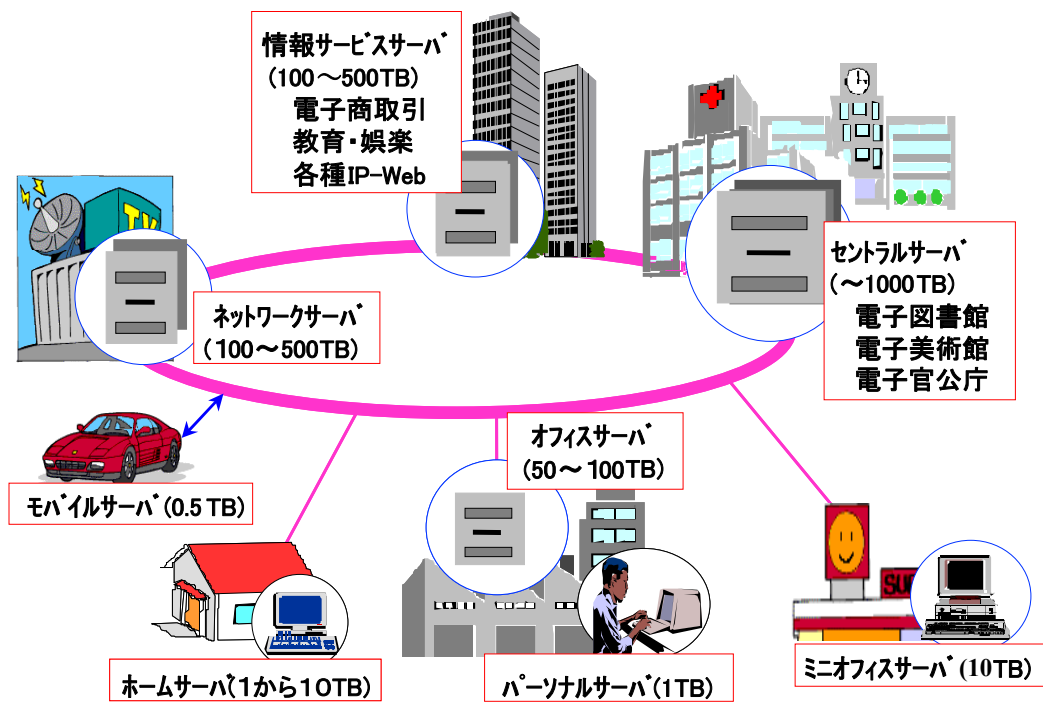


図表 1-26 ユビキタス・ストレージ世界像



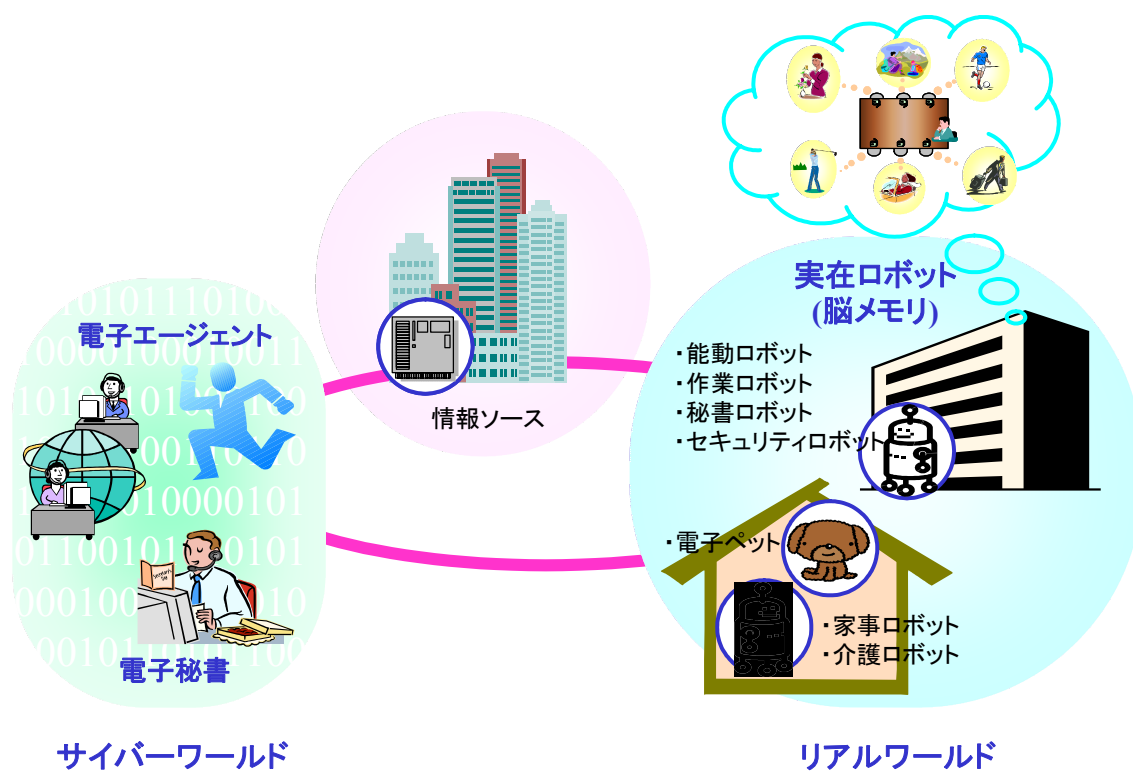
情報バンク、ホームサーバから携帯、ウェアラブルまで超高密度大容量ストレージを提供

図表 1-27 1 Terabit/inch² が広げるストレージの世界



図表 1-28 ビジネスシーンの情報ネットワーク

1Petabit/inch²の記録密度が実現すると、1ペタバイトの容量が25mm角の小さなチップに収まる。ペタの容量は人間の脳の記憶容量と同じで、いろいろなシーンに脳と同様に学習する事でどんどん賢くなる知識データベースが組み込まれる、ヒューマン・ストレージの時代となる。図表 1-29 は、このヒューマン・ストレージチップが組み込まれ、人間工学や知識工学の進展で人間の手助けや、人間に代わっているいろいろな作業をするロボットが開発されているシーンである。電子エージェントや電子秘書がネット(サイバー空間)上を動き回り、欲しい情報を収集し、これを現実世界のロボットが実行する。ロボットのデータベースは、ジョブを重ねるごとに賢くなっていく。ネットワークを介してサイバー空間(虚の世界)と現実世界とがシームレスに繋がった世界である。



図表 1-29 電子空間と実世界がシームレスに繋がった世界像

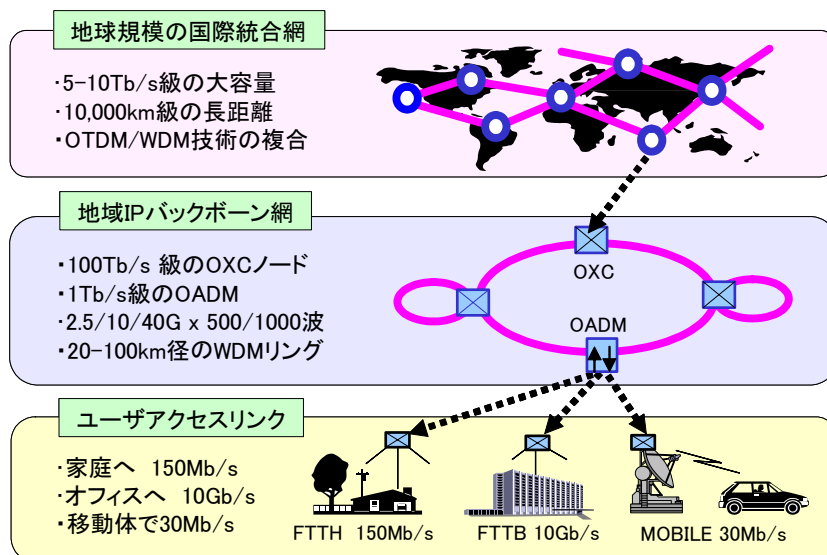
1.6 通信の切り口から見た情報ストレージの姿

従来光産業技術振興協会が進めてきた情報通信テクノロジーロードマップの作成では、2010年代の生活、社会ニーズを想定してロードマップが作成されている。2010年代には家庭生活支援、社会生活支援、オフィス環境整備、知的生産支援などにおいて、音声・文字・データ・図形・映像等を複合した各種のサービスが普及する。その結果、家庭およびオフィスで発生・消費される情報量が大幅に増大するものとして、それらを配信する公衆通信網、国内幹線網、国際幹線網に関する図表 1-30 に示すような通信体系が提案されてきた。すなわち従来の同時接続が必要な音声を中心とした電話網から IP(Internet Protocol)で代表されるパケット転送、デジタルデータ中心の伝送へとトラフィック内容が大きく変化している。これに伴う大幅なトラフィック需要増に対応するためには IP に適した伝送網の整備が重要との認識に基づいて、3階層のネットワークモデルが提案されている。すなわち(1)地球規模での国際統合網、(2)地球インターネット・バックボーン網、(3)ユーザアクセスリンク、である。ここでは、インターネット技術により国際通話が安価となり国際通信と国内通信を区別無く通信できる環境が整いつつあること予測されている。これに伴って、各国の国内幹線網と国際通信網間で機能の境界が無くなり、国内、国際という区別よりも情報量の多い世界の主要都市を網の目状に結ぶ国際統合ネットワークが地球規模で構成されるとの予測である。しかし、その後の推移を見るとネット・IT バブルが弾けた影響は甚大で、従来のロードマップ線表として描いた技術開発目標のマイルストーンが未達、あるいは後退している領域もある。しかし、一方ではネットワークの高速化に伴うトラフィック量の増大が顕著であり、ロードマップに示された技術の流れ・方向性は今なお有用であるとの認識に立ち、今後においても図表 1-30 のモデルで進展すると考える。

このようなネットワークの動向を考えると、今後は人に関する障壁あるいは地域に関する障壁であった距離の壁あるいは年齢・性別・国籍に関する壁がなくなることになる。地域に関しては、人や物、情報が国を問わず飛び交う社会となる。自由貿易の進展は物の移動だけでなく、直接経済活動に関わる人や情報の移動を生む。さらには政策として人や物の移動を促す仕組みも整うことが予想される。一方、急速に進むデータ通信の大容量化とブロードバンドサービスの低価格化、家電などのデジタル化・ネットワーク化により、身の回りのあらゆる製品がネットワークを介して大容量データのやりとりを行なうようになる。こうして 2015 年頃には映像や 3 次元画像・映像の伝送により現在の 1000 倍程度の規模とも言われる情報通信が行なわれ、市民生活や企業活動はどこかでユビキタス・ネットワークにつながっているようになる。ユビキタス社会では、高精細動画のやりとりなどによりネットワーク上を流れる情報が大容量化する。さらにネットワークに繋がるネットワーク家電等の機器が大幅に増大することが予想される。このようにして情報通信量が激増して、2015 年ごろには 2000 年次の 1000 倍以上、2030 年ごろには 100 万倍以上にも達することが容易に予想される。

2030 年代の IT 社会を予想した図が図表 1-31 である。ボーダレス、ユビキタス社会の進

展に伴ってグローバルな情報共有がなされていき、これに伴ってライフスタイルの大変革がなされていくことが予想される。図表 1-31 において場のアーカイブは、高精細高臨場感映像のグローバルな配信が 3D 映像の形で進展することを意味する。また情報のアーカイブでは世界的な経済、政治などの情報がテラビットネットワーク上で共有されていく。さらには世界的な文化遺産、あるいは未来に渡る世界各国の文化が映像の形で共有される文化のアーカイブも進展する。言語についても言葉の障壁がなくなる事が現実のものとなる。さらに各国の異なる書籍類あるいは膨大な文書類が共通のネットワーク上で共有されることになる。このような 2030 年代の IT 世界像を支えるためには、図表 1-32 に示すように、10 年で 100 倍の速度で要求性能が高まっている巨大なストレージ容量を確保できる高性能メモリ技術とドッグイヤー的に増加するフロー情報量を処理できるネットワークの高速化技術が必要となる。具体的な技術開発目標はペタバイトメモリでありテラビット級の世界的な超高速通信環境である。このような環境を実現するためには、さらにニューロ的な情報処理、サーバ、端末の新たな形態も模索されていくものと考えられる。

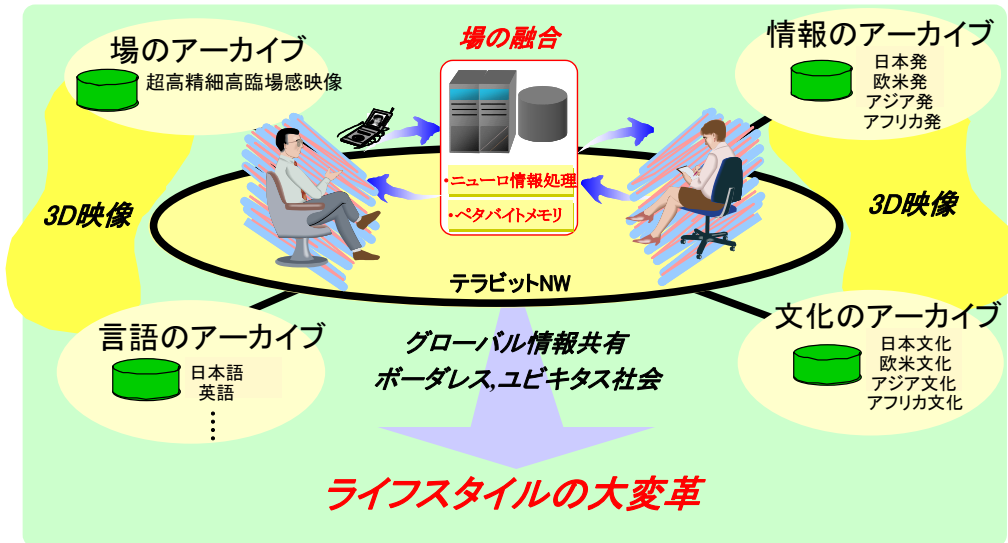


図表 1-30 3つのネットワークモデル

2030年のIT世界像

超高速NW
環境の普及

- ・距離、時間の克服から文化、言語の克服へ
- ・コンテンツを自由に扱える場の融合
- ・グローバル情報共有



図表 1-31 2030 年の IT 世界像

メモリの急進展による社会生活の変革

距離、時間の克服 → コンテンツを自由に扱える場の融合
グローバル情報共有

社会的要求

メモリの高性能化

巨大なストレージ容量の確保
100倍/10年の速度で要求性能が向上

NWの高速化

フロー情報量のドッグイヤー的増加

ペタバイトメモリなどメモリの超大容量化
テラビット級の世界的な超高速通信環境

図表 1-32 2030 年の技術開発目標

第2章

P B級ストレージ実現までのロードマップ

Blu-ray Disk やHD DVD など次世代光ディスクの研究開発が一段落し、記録密度¹⁾100 ギガビット毎平方インチ(100 ギガbps_i)級、そしてテラビット級実現に向けた研究開発が本格化している。遅くとも2010 年代前半には1 テラbps_i の記録密度が実用化され、テラバイトストレージの時代を迎える。さらに第2章で見てきたように、デジタル情報量は飛躍的に増加し続ける。これに対応して2020年代になると1 ペタbps_i 級の記録密度とペタバイト級のストレージが実用化され、2020年代後半はペタバイトストレージの時代となる。

このような状況の中で 1998 年に財団法人・光産業技術振興協会が策定したロードマップでは、2005 年現在までにおけるギガバイトからテラバイトメモリーに至る技術開発の動向を見事に予想している。しかしテラバイトメモリー技術の確立からそれ以降、すなわちペタバイト級メモリー技術開発についてはブレークスルー目標を含む新たな指針が必要であり、今年度、ペタバイト級ストレージ実現に向けて、技術動向調査ならびに有識者アンケートに基づいて光メモリーの新たなロードマップを策定した。

1)記録密度の定義：多層記録、三次元記録では多層倍して二次元の値に換算。

2.1 前回(1998年)ロードマップに関して

前回1998 年(平成10 年)に策定した「光テクノロジーロードマップ報告書～情報記録分野～」は、2010年代に1 テラbps_i の記録密度とテラバイト級ストレージが実用化されることをマイルストーンに各要素技術、システムについて詳述した。ここ10年弱の技術進展を見ると、これとほぼ合致し、今後数年スパンの技術開発についても大きく外れることなく進展する。前回のロードマップでカバーしきれなかった点が二つある。一つは、ハードディスクの記録密度が順調に増え、モバイル、ホームユースからビジネスユースまでストレージ機器のいたるところに普及し始めたこと。二つ目は、音楽や映像等コンテンツ配信のメインがネットワークに移行していることである。これらの社会状況と現在の技術進展状況をフィードバックして前回のロードマップを見直した。

図表2-1は光ディスクとハードディスクの記録密度トレンドである。Blu-ray やHD-DVD等リムーバブル型ストレージである光ディスクの記録密度は10 ギガbps_i オーダ、これに対して固定型(ヘッドとディスクが一体になった)ストレージであるハードディスクの記録密度は垂直磁気方式が実用化され100 ギガbps_i のオーダにある。1 テラbps_iまで、光ディスクで2 桁、ハードディスクで1 桁の技術進展が必要という事になる。一方従来の光記録技術では回折限界の壁、磁気記録技術では媒体ノイズの壁があり、300～600ギガbps_i 付近が限界で、これをどう乗り越えるかが焦点となる。

近接場光は回折限界を超えて光を10～20nm 径まで小さく出来、テラからペタまで切り拓

く技術である。固定型ストレージでは、パターンメディア化した垂直磁気媒体に近接場光で記録する、光・磁気ハイブリッド方式の研究開発が、国家プロジェクトとして日本と米国で進んでいる^{1)、2)}。光と磁気が融合し、光の回折限界と磁気の媒体ノイズを解決した光・磁気ハイブリッド型固定ストレージは、遅くとも2010年代には実用化され、テラバイトストレージの中核をなす。リムーバブル型光ディスクでは、短波長化についてはほぼ限界に来ているが、SIL(Solid Immersion Lens)、多層化、信号処理等これまでの技術の延長で、現在の10倍の記録密度100 ギガbpsi までは達成できる。次の10倍については、近接場光技術、2光子吸収と三次元多層記録技術、ホログラムと融合した技術を用いることになる。2010年代のストレージシステムでは、固定型ストレージを中核として、半導体メモリ 光・磁気ハイブリッド固定型ストレージ リムーバブル型光メモリのストレージヒエラルヒとなる。

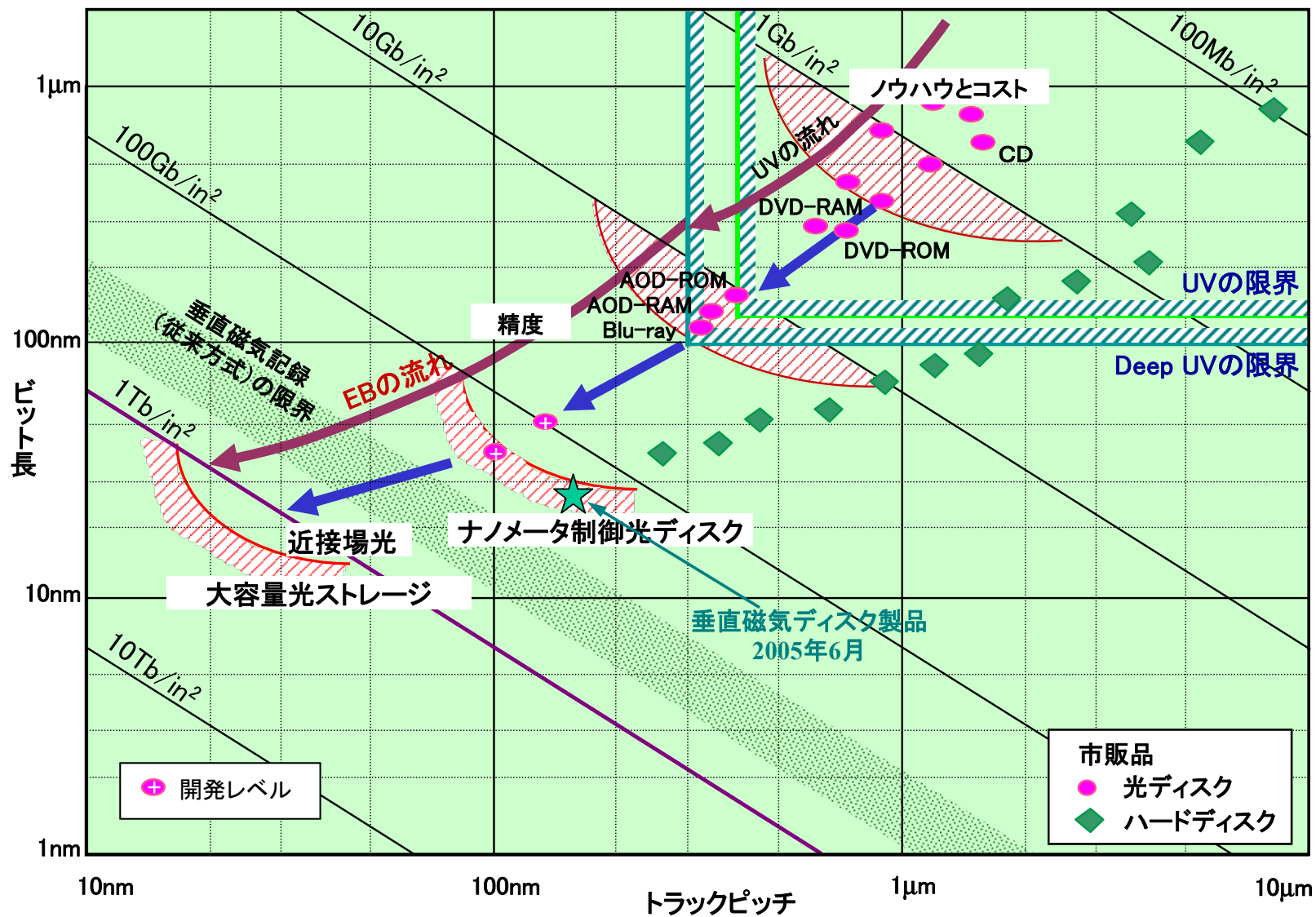
次に、1 テラbpsi 級ストレージの実用化では、固定型、リムーバブル型ストレージ共に、これに対応したマスタリング装置の開発が不可欠となる。図表2-1に示したように、これまでの光ディスクマスタリング装置には紫外光、深紫外光レーザを光源としてきた。しかし、100 ギガbpsi 以上に対しては、電子ビームを使うことになり、2000年代中に実用化される。

図表2-2に、以上述べてきたことを踏まえて見直した前回ロードマップの改訂版を示す。

1)日本では「大容量光ストレージ技術の開発」Pj:

経済産業省の資金を基に、平成14年度に(財)光産業技術振興協会が受託したプロジェクト(平成15年度からNEDOプロジェクト)

2)米国ではHAMR(Heat Assisted Magnetic Recording)Pj



図表 2-1 光ディスクとハードディスクの記録密度トレンド

項目	年度	1997	2000	2005	2010	
市場	パーソナルシステム	ビデオ2時間(ROM) (120mmφ)	ビデオ2時間(RAM) (120mmφ)	HDD-DVD搭載録画機 ビデオディスクカメラ (40分/HQ,80mmφ)	HDTV映像8時間 (120mmφ) ホームサーバ (1TB~10TB)	40GB/0.85インチ 500GB/ 1.8インチ 10TB/ 3.5インチ
	サーバシステム	マルチメディア情報流通 イントラ/インターネット	サイバースペース	音楽配信 電子商取引	動画配信 映像メール	電子医療 電子図書館/電子美術館
記録密度	ROM	4Gb/in ²	12Gb/in ²	>20Gb/in ²	>100Gb/in ²	1Tb/in ²
	RAM	2Gb/in ²	5Gb/in ²			
	HDD		>10Gb/in ²	>100Gb/in ²		
容量	LAN	10GB~1TB	100GB~10TB	400GB~40TB	1TB~100TB	
	サーバ WAN サーバ	100GB~10TB	1TB~100TB	4TB~400TB	10TB~1PB	
デバイス技術 & 要素技術	ROM	短波長再生	ニアフィールド記録再生技術	ニアフィールド記録再生技術	近接場記録	
	RAM	高開口数レンズ方式	新符号化	ディスク基板技術 (高密度ナノ記録・多層基板)	VOHM記録	3次元多層メモリ
	レーザー	650nm	430nm	半導体レーザー/SHGレーザー	短パルス光源	紫外線半導体レーザー 半導体レーザー励起固体光源 高調波光源
	光学系	高開口数レンズ	S/N変動学習方式	SILレンズ		
	検出系	PRML	高感度PD	Extended PRML	2次元相関検出	2次元並列信号処理
	媒体	Co/Pt人工格子膜	クロストークキャンセラー	超解像・ニアフィールド記録メディア	焦点深度薄膜多層化	マルチヘッド技術
	転送速度	20 Mb/s	50~100 Mb/s	100~250 Mb/s	1 Gb/s	
シークタイム	30ms	10~20 ms	5~10ms	1~2 ms		
精密マスタリング	精密マスタリング	紫外線マスタリング	深紫外方式	電子ビームマスタリング	ナノフォトニクス応用	
		超高開口数レンズ	サブテラbpsi対応EBR	1テラbpsi対応EBR	ナノ加工マスタリング	
			高密度カッティングレジスト	ナノインプリント技術		
			高精度インジェクションモールド技術	超平滑基板		

(財)光産業技術振興協会 光テクノロジーロードマップ策定専門委員会情報記録部会資料(1998)を基に作成

図表 2-2 情報記録分野ロードマップ 1998 の改定版

2.2 1 ペタbpsi の記録密度とペタバイト級ストレージ実現までのロードマップ

現在ペタバイトストレージに向けた現実的取り組みは無いが、これまで述べてきたように世界の情報量はすでにエクサ(10 の18 乗)バイトに達し、2020 年代にはそれがパーソナルレベルでも身近なものとなる。そして、これに対応して2020 年代後半には、1 ペタbpsi の記録密度とペタバイト級ストレージが実用化されている。実際、現在(2005 年)すでにHDD とDVD を組み合わせた1 テラバイトの家庭用録画機が登場しているので、20年後のマイルストーンとして現実的な値である。

1 ペタバイトの記録容量は、現在のDVD が4.7GByte で2 時間とすると、一人の人生50 年分を撮り続けることができる容量である。また、単純に2 次元で1 平方インチの記録密度を計算すると、単位記憶サイズは、1 テラbpsi で $25.4 \times 25.4 \text{nm}^2$ であるのに対して、1 ペタbpsi では $0.8 \times 0.8 \text{nm}^2$ となる。原子の大きさを0.1nm 径とすると原子64 個分に相当する大きさである。このサイズに、高速・高精度でアクセスし、高い信頼性で安定に情報を入力する技術が必要となる。また、1 ペタbpsi の記録密度を実用化する上でナノ加工技術が基盤技術の一つとなる。光メモリ分野では現在近接場光技術開発の一環としてナノ加工技術の開発が進んでいて、ナノ加工技術のこの分野における役割は今後一層重要になる。さらに新規なナノ構造から発現する新機能材料の開発も見込める。

本報告書では、記録密度1 ペタbpsi 実現に至る技術の方向として、次の8 つのメモリ方式からのアプローチでテラからペタへのロードマップを策定した。

ナノフォトニクスに基づく情報多重化記録再生(近接場光技術)

ナノ自己組織化スピクラスタ媒体

フェードインメモリ

ホログラムメモリ

超多層記録

自己組織化稠密3次元構造による超多層記録と3次元再構成法

単一分子光メモリー - 光記録方式と記録材料 -

その他のメモリ技術

以下、次節から各々について報告する。

2.2.1 ナノフォトニクスに基づく情報多重化記録再生（近接場光技術）

情報記録は材料、デバイス、メカニクス、システムをすべて含んだ総合技術で、これらすべてを総合的に考慮した上で開発する必要がある。材料のみ、デバイスのための議論では実用に繋がらず、ナノからマクロの系へ如何に信号を取り出すかというシステム上の本質的検討（再生速度も含む）とブレークスルーが必要で、これらをナノフォトニクス*の概念で開発する。

すなわちペタバイト級ストレージの開発では以下の要素技術が必須である。

- Concept technology として、
 - 高感度の情報読み出し・・・電子・電界入力光再生方式
 - 微小領域での状態安定化・・・ナノセル化、マイグレーション防止、保護層
- Functional technology として、
 - 微細加工、転写形成
 - アクセス制御

ギガバイト級からテラバイト級ストレージへは近接場光という新しい基礎概念で実現した。この開発状況と同様に、テラバイトからペタバイト級へも基礎概念としてのブレークスルーが必要である。ペタバイト級へのブレークスルーとして本質的なのは次の4つの基礎概念と考えられる。特に重要なのは近接場光と物質との局所相互作用の階層性に基づく記録再生の多重化を利用して従来の大容量光ストレージにはない「質的変革」を実現することである。同時に記録材料開発によりサブペタ bpsi へ達し、その後改良を通じた量的変革により1ペタ bpsi に達する方向が有望である。

(1) 階層化による記録再生

10 テラ（ピット径 8nm）～数十程度までは1テラの延長技術で可能。その後100 テラ程度（ピット径 2.5nm）に達するには、近接場光と物質との相互作用に依存した「階層性」* という特性を駆使する。ディスクとヘッドとの距離に依存した「階層性」は、ナノフォトニクスでの信号取り出しにおける共通かつ本質的な特性であり、これにより多層記録媒体と同等の情報多重化記録再生が一層の媒体で実現しうる(図表 2-3)。

(*) ナノフォトニクス： 近接場光により媒介されるナノ寸法物質間の局所的相互作用を用いた加工、デバイス、システム技術。

(**) 階層性： 原子～サブナノ寸法物質～ナノ寸法物質～サブ波長寸法物質に至る微小物質の寸法の階層性に対応し、ヘッドと記録媒体との距離に依存した空間的広がりを有する近接場光エネルギーが移動する性質のこと。

M.Naruse, T.Yatsui, W. Nomura, N. Hirose, and M. Ohtsu, "Hierarchy in optical near-fields and its application to memory retrieval", Optics Express, Vol. 13, No. 23. November 2005, pp. 9265-9271

(2) ナノフォトニックデバイスによる半導体メモリ型との融合(スライダなどの可動部の無いメモリ)

記録再生ヘッドを走査させるという概念からの脱却、あるいはヘッド走査の代替技術を開発する必要がある。なぜなら速度と精度とは相容れないからである。テラ級までは何とかしのいできたがペタ級では困難となる可能性が高い。この問題を解決するにはナノフォトニクス概念に基づいたナノフォトニックデバイス及びその集積回路(図表2-4)との組み合わせにより光メモリの固体化(半導体フラッシュメモリによる情報記録再生の例のように)を検討すべきである。それには近接場光エネルギー移動を利用して光デバイスのブレークスルーを実現したナノフォトニックデバイスが必須である。半導体メモリも大容量になれば、発熱などのために限界があるが、半導体メモリを電子ではなく、近接場光で動作させるナノフォトニクス型半導体メモリと融合することでこれを解決することができる。すでに光スイッチ、各種の順序論理ゲート、光バッファメモリ、超短パルス光源などの動作検証が終了し、実用化デバイスとしての開発が進んでいる。また、ナノフォトニックデバイス及び集積回路と外部の巨視的寸法デバイスとの間で光信号を授受するためのナノ光インターコネクション用デバイスも開発されている

(<http://www.nanophotonics.info/>)。

(3) ナノ光加工技術ブレークスルー

情報記録は微細加工と技術的に同意義である。すなわち、今後は媒体への情報記録や(2)のナノフォトニックデバイス及び集積回路の作製のためにナノ光加工のブレークスルーが必要である。これにはナノフォトニクスの原理にもとづく近接場光エネルギー移動を利用して光デバイスのブレークスルーを実現したナノフォトニック加工技術などが必須である。加工のスループットを高く保つためにはプローブなどの使用は不可なので脱プローブ技術も必要である。ナノフォトニック加工では、フォトマスク、またはフォトマスク不要の技術として、たとえば

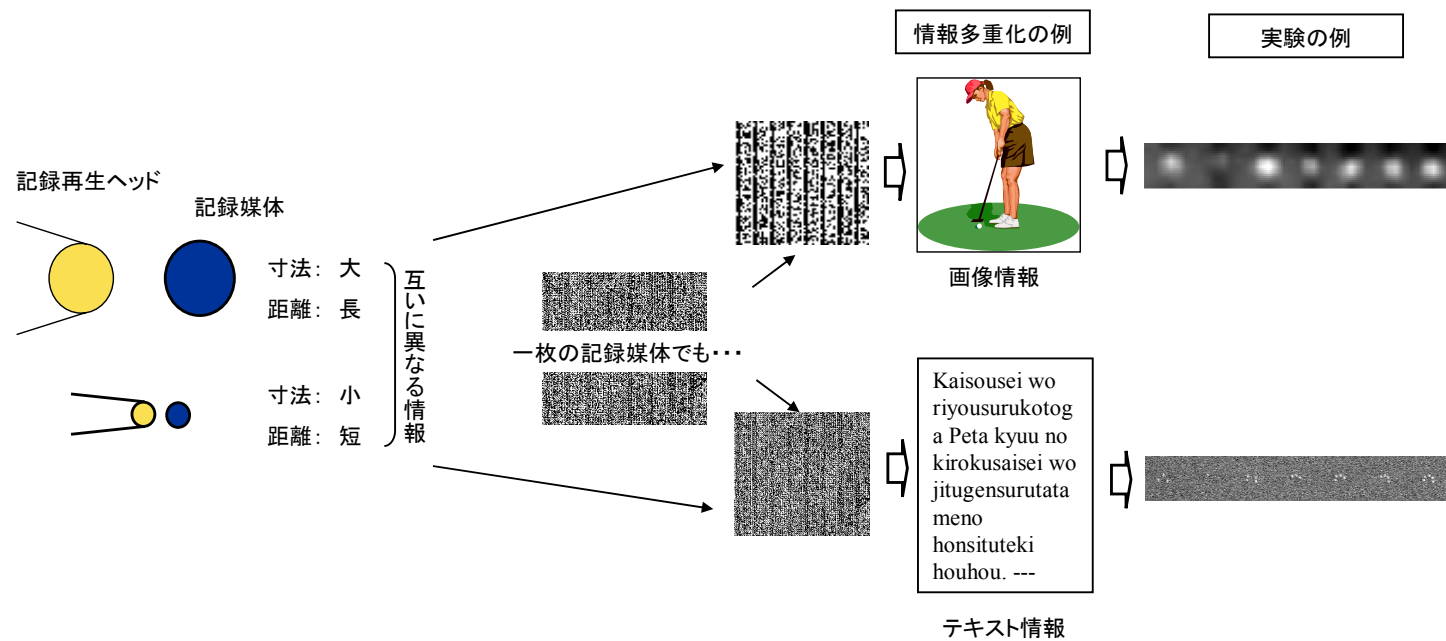
- (a) 近接場光リソグラフィ
- (b) 近接場光化学気相堆積
- (c) 近接場光援用ナノインプリント
- (d) 近接場光援用自己組織的配列

などが開発されている。これらは従来の光化学反応を支配する断熱過程のみでなく、ナノフォトニクスによって初めて可能になる非断熱過程を利用しており、寸法、位置制御性、使用材料多様性など、加工のパラダイムシフトを実現している。特に(a)についてはすでに「文部科学省リーディングプロジェクト(H16-H18:東大とキヤノンの連携)」において実用汎用機が完成段階に入っている(<http://www.nanophotonics.info/>)。

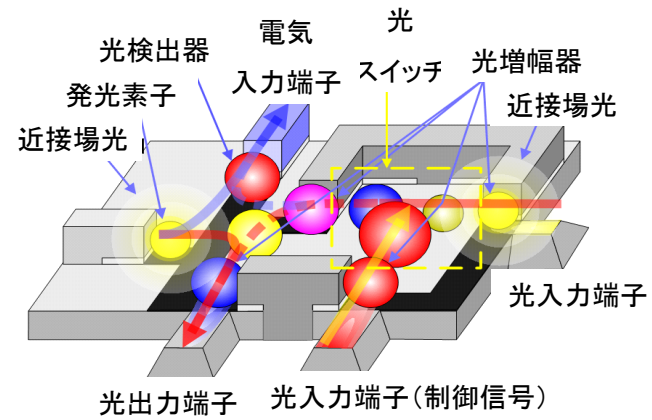
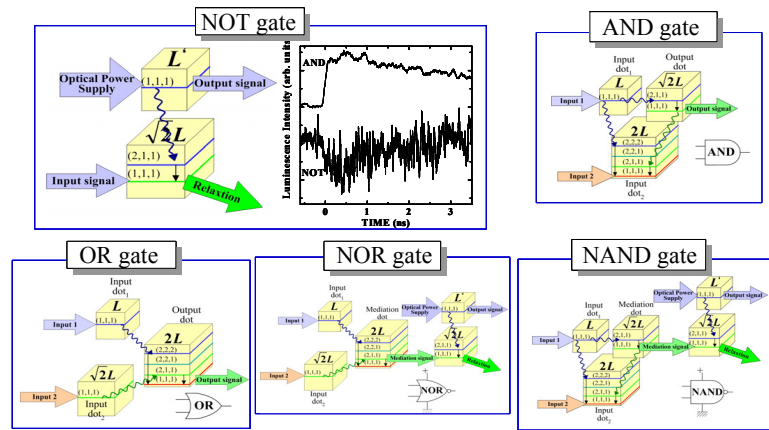
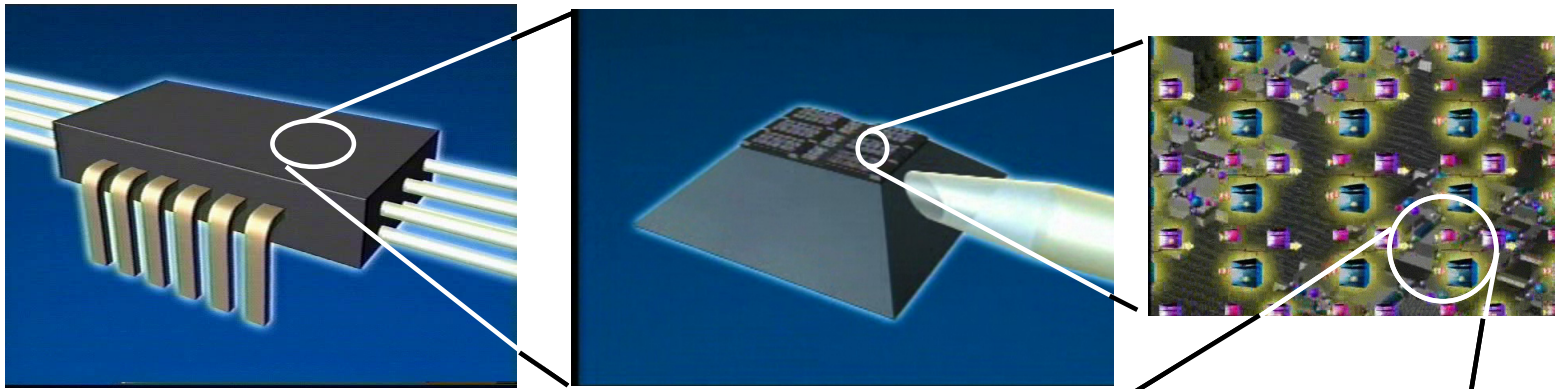
(4) 情報処理システムのブレークスルー

記録再生信号の取り扱い、特に(2)のナノフォトニックデバイス及び集積回路を用いた情報処理システムについてのシステムアーキテクチャの観点からの考察が必要。これについてはすでに総務省戦略的情報通信研究開発推進制度で「ナノフォトニクスによる超高速集積光ノード技術の研究」(H15-H17：東大と情報通信研究機構との連携)が推進されており、情報通信のみでなく情報記録について、上記(1)の「階層性」も含めた新概念にもとづく信号処理法が開発されている(図表2-5)。

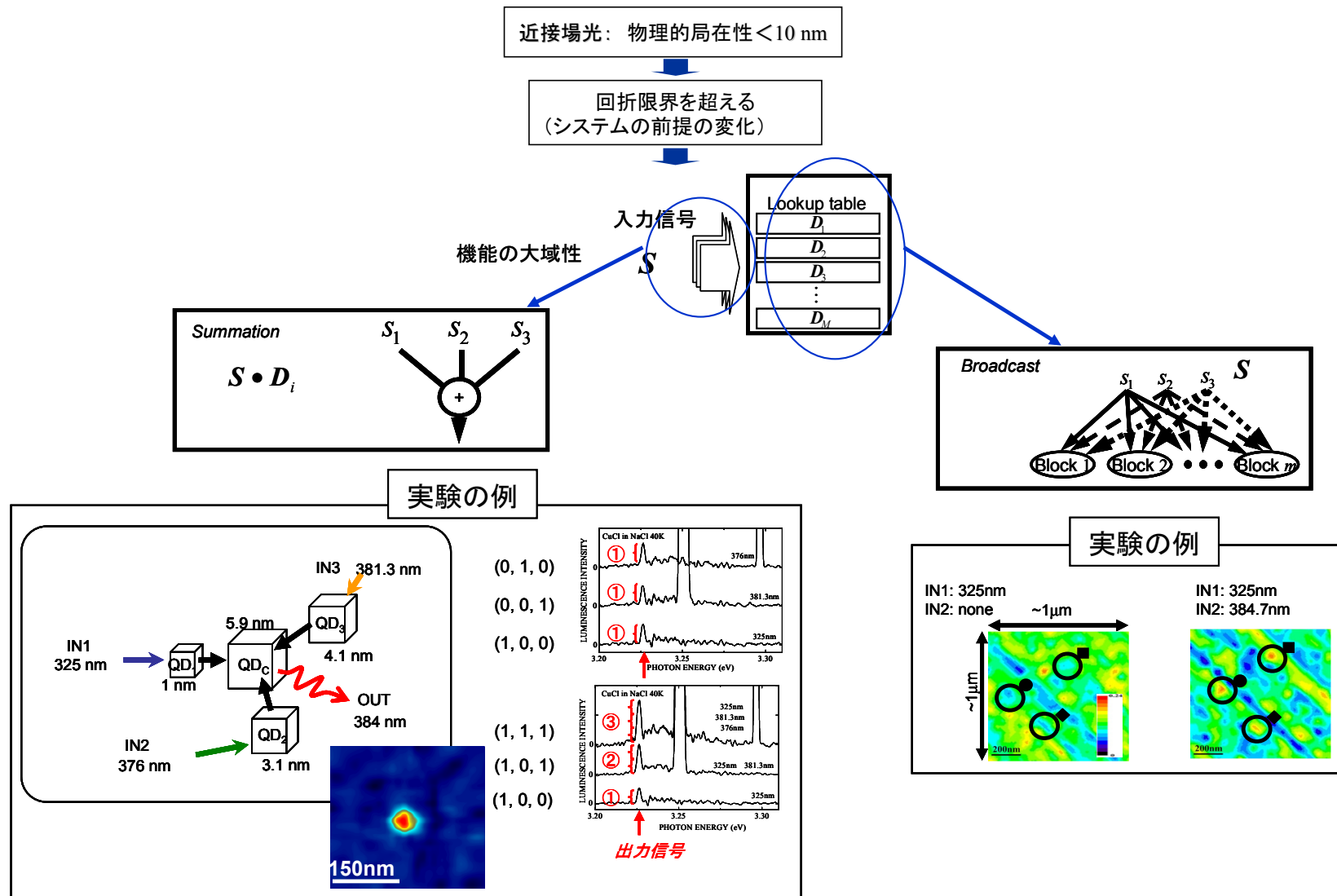
図表2-6に、近接場光技術とナノフォトニクスをベースとしたペタバイト級ストレージ開発のロードマップを示す。



図表 2-3 ナノフォトンクスで本質的な「階層性」を利用した情報多重化光メモリの原理と実験例

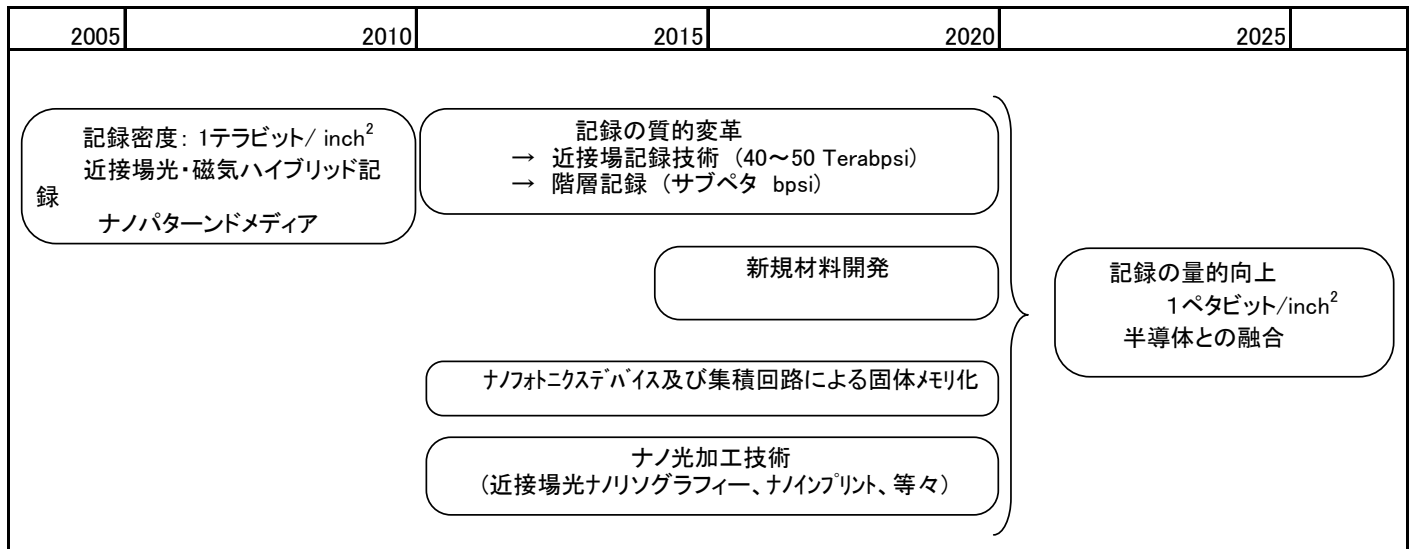


図表 2-4 ナノフォトニックデバイス及びその集積回路の構成



図表 2-5 「階層性」も含めた新概念に基づく信号処理法

図表 2-6 ナノフォトニクスに基づく情報多重化記録再生(近接場光技術)



2.2.2 ナノ自己組織化スピクラスタ媒体

ペタ bpsi 級超高密度磁気記録媒体の実現に向け、ノイズや不安定動作の要因となる磁壁を排除したナノサイズの単磁区磁性結晶粒(スピクラスタ)を整然と並べた超テラ bpsi 級媒体を端緒とし、段階的に粒子サイズを低減するとともに読み出し/書き込み技術の高空間分解能・超高速化への移行を念頭とした新規媒体を構築することでサブペタ bpsi までの高密度化を図る(図表 2-7)。最終的には、光-原子スピン相互作用を利用した新原理に基づく一原子スピンの制御によりさらなる大容量化を目指す。

超テラ bpsi 級超高密度磁気記録の実現のためには、垂直磁気記録媒体に近接場光を用いた熱で記録する光磁気ハイブリッド方式に対応する媒体を、磁氣的孤立性の不完全なグラニュラ型から 1 ビットを 1 粒子とする超均一粒径磁性ナノ粒子型へと発展させる必要がある。このような媒体の実現に際し、以下の要素技術、

- ・ 高磁気異方性 10^7 後半 ~ 10^8 erg/cc 以上をもつ複合材料の探査
- ・ 粒径 25 nm 以下、粒径ばらつき 5% 以下のナノ粒子形成技術
- ・ 同ナノ粒子の 2 次元的自己組織化配列技術

の確立が不可欠である。

記録媒体の粒子サイズのナノメートルオーダーへの低減にともない、熱擾乱耐性と記録容易性とを両立させることが益々重要となる。熱擾乱耐性をより一層高める観点から強磁性材料をベースとして記録媒体材料を探査する場合、現状高異方性材料として検討されている CoPt 合金薄膜の 10^7 erg/cc を凌駕する 10^8 erg/cc の巨大磁気異方性 (K_u) を具備する材料の検討が求められる。理論計算による Fe-貴金属合金の $10^8 \sim 10^9$ erg/cc の K_u の予測、ならびにナノ粒子単体、および格子整合成長をさせたコアシェル型複合ナノ粒子に現れる表面・界面磁気異方性の利用が材料開発の端緒となる。また、熱による記録容易性を向上させる観点からフェリ磁性材料をベースとして記録媒体材料を探査する場合、室温近傍の補償温度かつ 200 程度のキュリー温度を有し、その温度範囲で異方性が大きく変化する材料の検討が求められる。遷移金属-希土類合金アモルファス粒子における温度敏感な異方性の精密制御が材料開発の端緒となる。

もっとも重要かつ本質的要素はボトムアップ型ナノテクノロジーを応用した超均一粒径磁性ナノ粒子の形成、及びナノ粒子自己組織化配列技術であり、1) 湿式化学合成法での均一反応場(濃度・温度)実現による反応速度精密制御技術、界面活性剤を用いたナノ粒子表面の完全被覆による均一ミセル分散技術、ならびに 2) スパッタリング等のドライ成膜プロセスでの、薄膜表面の自己組織化修飾による周期的ナノメタルドットアレイの形成技術が最有力技術である。

次世代超テラ bpsi 級~サブペタ bpsi 級大容量の情報ストレージ実現のためには、高空間分解能・超高速化を具現化するため、従来技術の展開からさらに新技術への移行を考慮した媒体の開発が不可欠である。書き込み技術としてはハイブリッド磁気記録方式(近接場光熱磁気書き込み)から、スピン再配列/交換結合型高速磁化反転技術への移行、読み

出し技術としてはいわゆる MAMMOS 技術から、スピン偏極 STM (Sp-STM) 技術への移行が考えられる (図表 2-8)。

また、超高速書き込みを実現するためには、熱磁気書き込みを含めた従来型の外部磁界印加のみによる磁化反転方式の媒体設計からの一大転換が必要である。このような新たな超高速書き込み媒体を実現するためには、以下の要素技術、

- ・ 100 ~ 150 程度で磁気異方性の符号変化が生じる一軸異方的反強磁性材料の探査
- ・ 同反強磁性材料との間の強い交換磁気異方性を上記温度域で維持する強磁性 / 反強磁性交換結合型複合積層材料の探査
- ・ 同複合積層材料のナノ粒子化技術

の確立が不可欠である。

そして、ペタ bpsi 級次々世代のメモリ媒体としては、新原理に基づく革新的な技術開発による大容量化の可能性を見出す必要がある。すなわち

- ・ 円偏光照射によるスピン注入
- ・ 光誘起スピン
- ・ 光照射スピン反転

などの活用が考えられる (図表 2-9)。

記録媒体の単位粒子サイズがオングストロームオーダーとなるペタ bpsi 級メモリ媒体では、数原子からなる構造体の作製技術、ならびに、高速磁化反転、低消費電力技術を突き詰めた書き込み / 読み出し技術の導入が鍵となる。原子レベルの寸法の構造体としては、メタル内包フラーレンのように籠型クラスタ構造の内部に原子を内包させたスーパーアトム構造が、孤立 1 原子を記録担体となせるため極めて有望な構造体である。

高速磁化反転、低消費電力化を実現するためには、従来までのように光を熱源として用いるのではなく、原子スピンとの相互作用をもたらず制御源として用いる必要がある。左・右円偏光によるアップ / ダウンスピンの選択的励起がもたらすスピントラントによるスピン注入や、サイズ効果がもたらす円偏光励起によるスピンのアンバランスの増強現象等の萌芽的研究を進展させ、原子レベルの寸法の構造体に対して上記効果を確認することが急務である。

以上述べてきたようにペタ bpsi 級メモリ媒体では、ナノ粒子に代表されるバルク構造体、すなわち、原子の凝集体としての固体物性の域を脱却し、一原子の電子状態を光学遷移を利用して直接制御するメモリ形態により究極の高密度化が図られる。

本技術は既存技術としての光・磁気ハイブリッド記録方式と垂直磁気記録技術の融合技術としての延長上に位置づけられる、ナノ自己組織化スピントラスタ技術からスピン再配列 / 交換結合型高速磁化反転技術へと続く技術開発の流れと、ナノ技術を基盤とする新形式記録技術としてナノ分散構造体 (コアシェル構造体メモリ、メタル内包フラーレンおよび光誘起スピン記録) への記録技術開発の両方向性を示すものである。以下、開発目標数値とともに要素技術開発ロードマップとしてまとめて示す (図表 2-10)。

図表 2-7

- Pb級ストレージを実現する技術シナリオ -

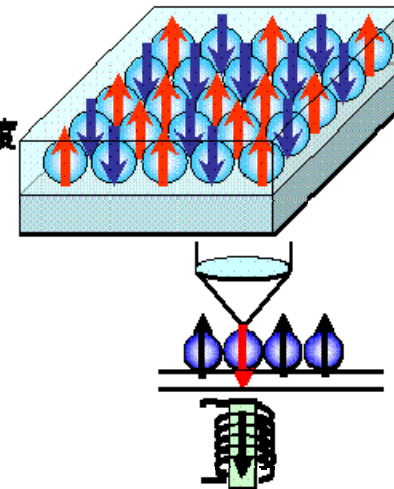
Tb級超高密度磁気記録媒体

- ・単磁区構造、磁氣的孤立化 (現状20%)
- ・高磁気異方性 10^8 erg/cc
- ・粒径25 nm、粒径ばらつき5%以下
- ・2次元的自己組織化配列技術
- ・近接場光熱磁気書き込み (ハイブリッド磁気記録)

1ビット/1粒子媒体
(ビット長=トラックピッチ)

超均一粒径磁性ナノ粒子

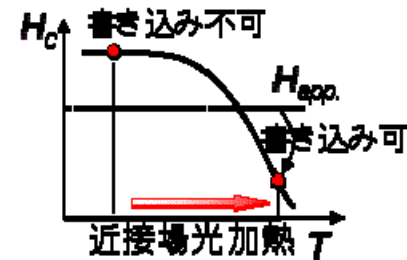
- ・幾何学的要求
- ・Read head感度との兼ね合い



巨大磁気異方性 (K_u) 材料の探査・開発 $K_u / k_B T > 80$ (R.T.)

- 高々 10^7 erg/cc (CoPt合金)、RE-TM
- $10^8 \sim 10^9 \text{ erg/cc}$ の巨大 K_u 材料 (理論計算)
- 表面磁気異方性 (K_s) の付与

$K_u = \sim 10^8 \text{ erg/cc}$ 以上 (室温) の強磁性・フェリ磁性ナノ粒子の開発



粒子形成技術

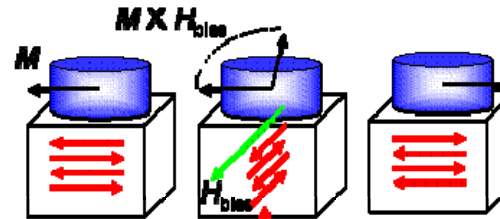
- 自己組織化ナノメタルドット形成プロセス
ナノ領域表面修飾技術、ナノ光加工
- ウェットプロセス
ナノ粒子自己組織化配列

磁性ナノ粒子アレイの実現

図表 2-8

超Tb級～0.1Pb級超高密度磁気記録媒体 高空間分解能・超高速

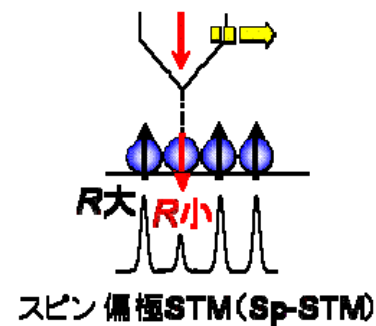
- ・粒径1.8 nm、粒径ばらつき5%以下(0.1Pb級)
- ・スピン再配列／交換結合型高速磁化反転



スピン再配列反強磁性材料の探査・開発

- ← TmFeO₃で原理確認(100K)
- ← 100~150°C程度で磁気異方性の符号変化が生じる
一軸異方的反強磁性材料の探査
- ← 同反強磁性材料との間の強い交換磁気異方性を
上記温度域で維持する強磁性／反強磁性交換結合
複合積層材料の探査
- ← 同複合積層材料のナノ粒子化技術

強磁性／反強磁性複合ナノ粒子の開発



図表 2-9

Pb級超高密度磁気記録媒体 新原理に基づく革新的な技術

- ・一原子～数原子からなる構造体
- ・高速磁化反転、低消費電力化

スーパーアトム構造

メタル内包フラーレン

円偏光照射によるスピン注入

左・右円偏光によるアップ/ダウンスピンの選択的励起

スピントレントによるスピン注入

磁性ナノ粒子の量子サイズ効果

サイズ効果→ $E > E_F$ にサブバンド形成



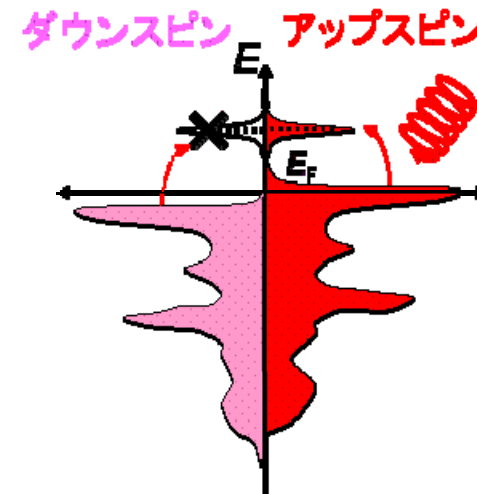
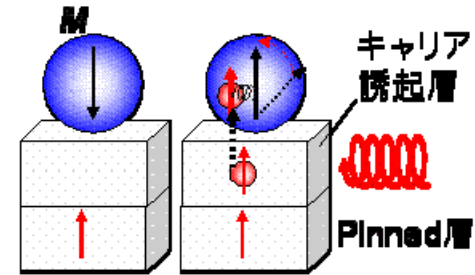
円偏光励起によるスピンのアンバランスの増強



磁化の増減、磁気異方性の変化

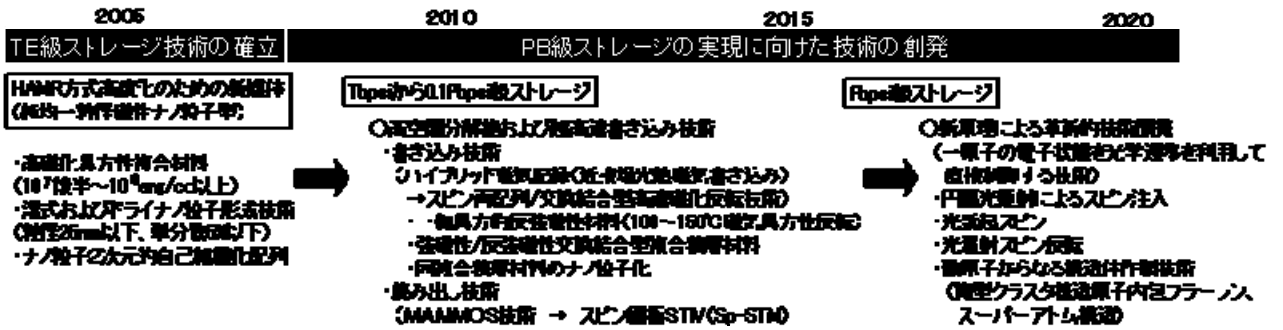
光誘起スピン

光照射スピン反転



図表 2-10

ナノ自己組織化スピクラスタ媒体



2.2.3 フェードインメモリ

前項までに述べてきたようにペタバイト級ストレージは、ナノ・サブナノ粒子の自己組織化現象を用いた記録媒体に対し、ナノフォトニクス概念に基づいて記録・再生を行うことにより実現される可能性が有望である。一方このように膨大な情報記録を行う場合、高速アクセス性を具備することもメモリ応用を目指す上では重要な技術課題である。従来、記録信号の再生は基本的にドライブシステム側の問題として情報処理側のアルゴリズムの工夫によりメモリ設計がなされてきたが、ペタバイト級ストレージではメモリ容量の飛躍的な増大に伴いアクセス速度の点でも技術的なブレイクスルーが求められる。

ギガバイト級からテラバイト級ストレージへのブレイクスルー技術としては「光」と「磁気」の融合技術が既に開発の途上にあるが、ペタバイト級ストレージの実現にはこれらに加えて新たな先進技術の融合が必須であり、本視点において「近接場光技術」、「スピクラスタ媒体技術」、「半導体インテグレーション技術」の融合が極めて重要になると思われる。またPB級の情報量を高速に処理するためには、記録を担うハードウェアと記録情報を読み出し制御するソフトウェアが相互に補完して初めて有効な情報処理が実現される。

このような技術思想をもとに、ハードウェア側にも冗長度可変なアクセス機能を具備させて情報の認識をより人間に近づけたメモリ概念として「フェードインメモリ：だんだん詳しく思い出すメモリ」を新たに提案する。また、図表 2-11、2-12 に「近接場光技術」、「スピクラスタ媒体技術」、「半導体インテグレーション技術」を融合した「フェードインメモリ」実現構想図を示す。

「フェードインメモリ」は、スピンナノクラスタをナノスケールに加工された半導体チップ上に自己組織化させた配列体が記録担体となる、浮上型ヘッドを必要としない固体メモリである。記録には、ハーフメタル材料による電界放射陰極アレイにより電流磁化反転を用いる。また再生は、ナノ加工された近接場変換素子を通して発生させた近接場光の伝搬により記録担体のスピン配列情報を読み出す原理に基づく。このように本メモリでは、半導体の微細加工技術を駆使して作製した複数の電界放射型記録ヘッド、近接場光の導入源、検出器を配置させることにより、複数ビットの情報を一括して記録・読み出しすることが可能である。情報再生の際に近接場光の導入数を変化させることで読み出し時間に応じて精密性を変えうることは、フェードイン読み出し機能として特筆される。

(1) 近接場光の導入源、検出器

半導体のインテグレーション技術を利用してレーザダイオード、フォトダイオードを集積しナノメートルオーダーで配列化する。導入源については、偏光を制御したレーザ光を導入源の先端部に入射させることにより、近接場光を発生させる。一方検出器については、現在開発が進んでいる表面プラズモンを利用した近接場光増幅器を介して、フォトダイオードで受光する。

(2) 自己組織化スピンナノクラスタ

0.8 nm 寸法のスピナノクラスタを自己組織化配列させる。個々の微粒子のスピンの記録情報を有する記録担体である一方、自己組織化微粒子の配列が近接場光の導波路となる。

(3) スピン情報の書き込み

ハーフメタル材料（上向きスピンは金属的、下向きスピンは絶縁体的な電子構造を有する強磁性体）を用いた電界放射陰極をアレイ状に配列させた書き込み用ヘッドを用いる。個々の電界放射陰極により発生される 1 nm 以下に絞り込まれたスピン偏極電子ビーム（スピントレント）をナノスピナノクラスタに照射することによりスピンの向きを反転させる（電流磁化反転）。本ヘッドは、印加磁界勾配や媒体熱伝導特性が律速となる従来型の記録ヘッドと異なりスピントレントを 1 nm 以下に絞り込むことができるため、PB 級のサブナノメートル記録担体への超高分解能記録を具現化しうる。

(4) スピン情報の読み出し

スピナノクラスタの配列体を伝搬する近接場光は、表面プラズモンの受け渡しによって伝搬する。さらに個々のクラスタがスピンを有しているため、伝搬中の近接場光が磁気光学効果により変調される。近接場光は個々のクラスタを伝搬する毎に減衰しながら一定の変調を受けるため、検出器直前のクラスタに誘導された近接場光の変調状態により、導波路を担ったクラスタアレイのスピンの情報が同時に検出できることとなる。

(5) 高速アクセス法

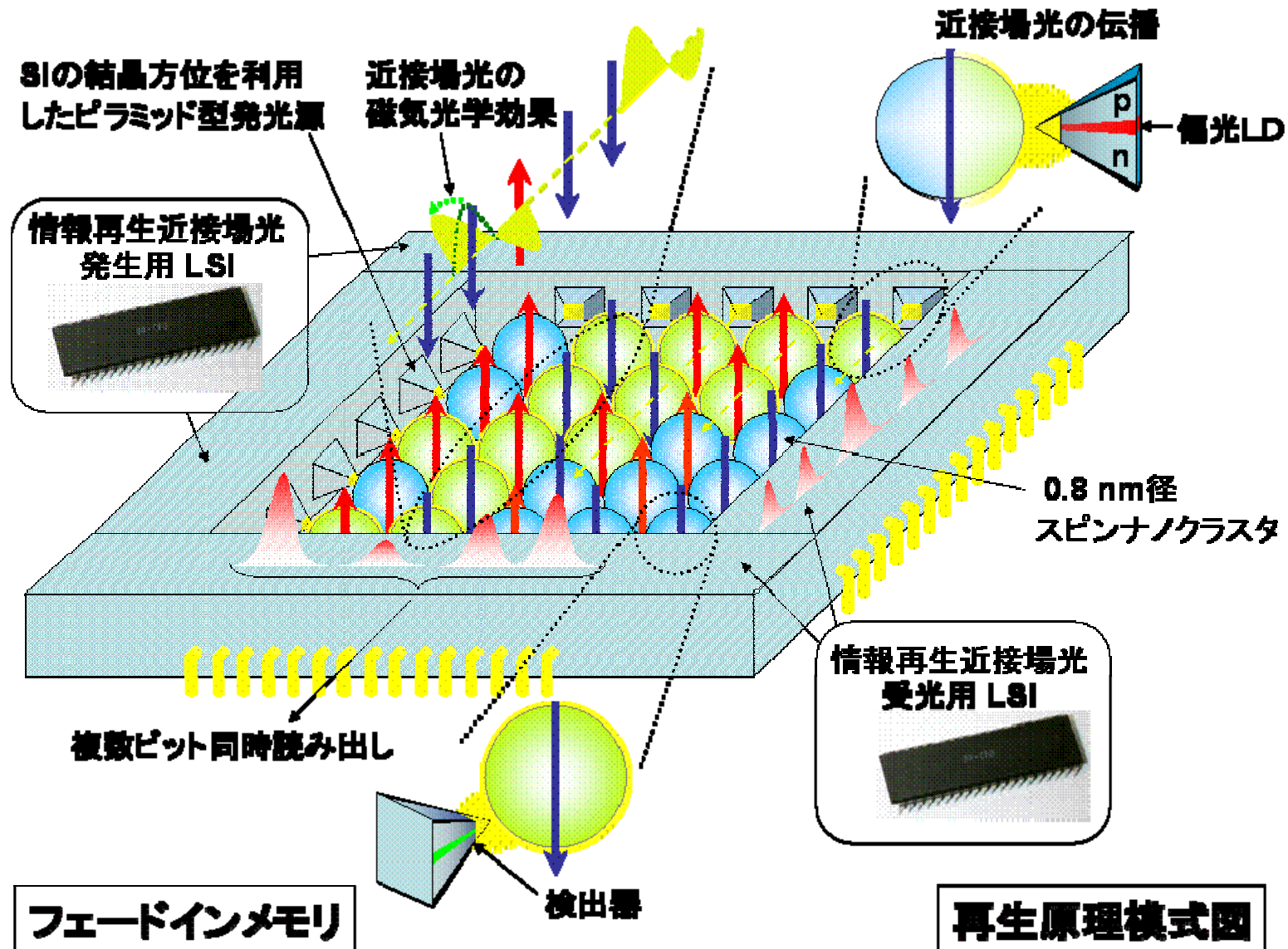
スピナノクラスタは 2 次元配列体であるため、複数の近接場光導入源から近接場光を導入することにより、複数のクラスタアレイのスピンの情報を同時に得ることができる。また、1 つの導入源から導入された近接場光は検出器までの直線的なクラスタアレイを伝搬するだけでなく、隣接アレイにもわたって伝搬する。したがって、読み出しの際に使用する近接場光の導入源数を疎にしても自己組織化ナノクラスタ全体のスピンの配列を大掴みに検出することができる。つまり、近接場光の導入源数を疎から密に変化させることにより、まず高速アクセスにより外郭情報の再生を行い、徐々に時間がかかる詳細情報の再生を行うことができる「フェードインメモリ」としての機能を備えることができる。

(6) 信号処理部

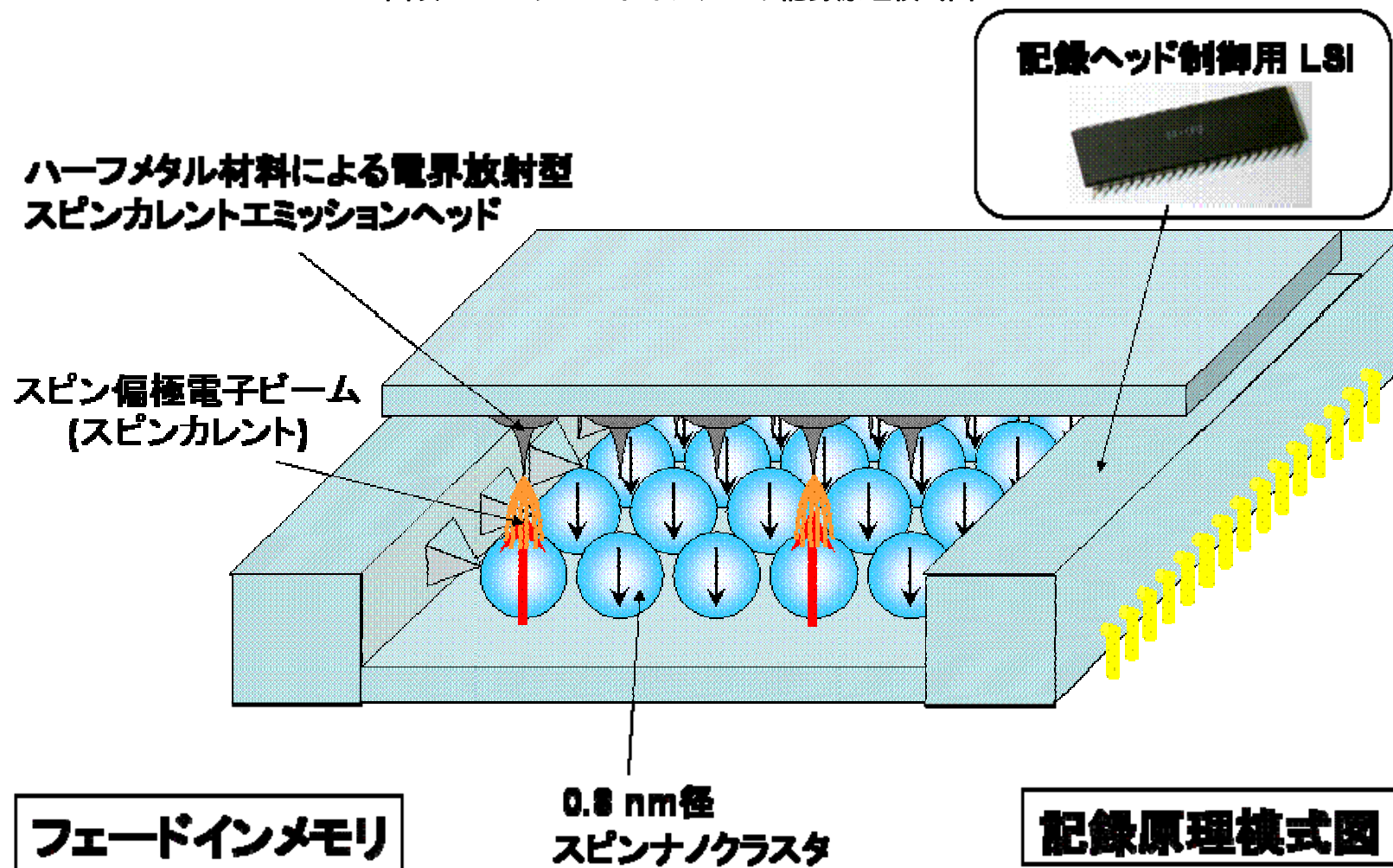
「電気信号・近接場光・スピン・近接場光・電気信号」の信号再生系全般を制御する半導体集積回路。最適アルゴリズムに基づきハードウェアを「フェードインメモリ」として機能させるための演算を行う。

以上述べてきたように PB 級ストレージでは、大容量性と高速アクセス性とのトレードオフ関係を打破する新たな技術が必要である。「フェードインメモリ」は、「近接場光技術」、「スピナノクラスタ技術」、「半導体インテグレーション技術」を結集・融合し、このデッドロックを乗り越えることが可能な究極のメモリである。以下に各要素技術の開発ロードマップを示す（図表 2-13）。

図表 2-11 フェードインメモリ再生原理模式図



図表 2-12 フェードインメモリ記録原理模式図



図表 2-13

フェードインメモリ		
	2005	2010
媒体技術	TB級ストレージ技術の確立 高磁気異方性ナノ粒子の開発 (10 ⁷ 後半~10 ⁸ erg/cc以上) ナノ粒子の2次元自己組織化配列	PB級ストレージの実現に向けた技術の創発 ナノ粒子の超狭粒径・粒径分散化 (平均粒径 0.8nm 単分散化) 近接場光援用熱磁気書き込み ナノ加工近接場光ヘッド技術 ナノフォトニックデバイス開発 (導入源, 増幅器, 検出器)
記録ヘッド技術	ハーフメタル材料の探索 スピнкаレント注入による磁性細線の磁化反転の原理検証	スピン偏極電子ビームによる微粒子の磁化反転の原理検証
集積化技術	インテグレーション技術のダウンスケーリング (加工寸法65nm)	インテグレーション技術のダウンスケーリング (加工寸法45nm)
情報処理技術	2次元配列自己組織化ナノドットアレイの近接場光伝搬解析	同左 スピクラスタナノドットアレイの磁気光学効果解析

2015	2020
—	
同左	
同左	
同左	
スピнкаレント電界放射型記録ヘッドの開発	
インテグレーション技術のダウンスケーリング (加工寸法32nm)	
フェードイン機能最適化アルゴリズムの開発	

2.2.4 ホログラムメモリ

微細配向型ホログラムメモリ

1. ペタバイトメモリへの課題

ホログラムメモリは、現在テラバイト級の記録容量をディスクで実現するための研究開発が進められている。ここで進められている従来型の体積多重型ホログラムメモリの記憶密度は6テラビット/inch²が限界であるとの報告がなされており、ペタバイトメモリの実現のためには、さらなる新規な技術の注入が求められる。現在記録媒体として開発されているフォトポリマーなどの高分子媒体に関しては、収縮の抑制、厚膜化、ダイナミックレンジの拡大、散乱・吸収の低減、記録感度の向上、寿命の確保などに大きな課題が残っている。テラバイトメモリシステムは、2010年の実用化を目標として開発が進められており、1.5mm以上の厚膜化、ダイナミックレンジ評価指数であるM#を30以上とするなどの記録媒体材料開発が中心のテーマになっている。

このようなテラバイトメモリの開発において、現状の記録密度はフォトポリマーなどの高分子媒体の性能で制限されている。たとえば媒体の収縮、光化学反応の不要な伝播、モノマーの拡散などによる再生信号の信号対雑音比の劣化などの問題点を抱えており、これらが実用的媒体としての高分子媒体の実現を阻む要因となっている。今後多くの研究機関の努力によって、これらの問題点が克服されてテラバイトメモリの実現が可能となるにしても、ペタバイトメモリに向けたさらなる記録密度の向上は極めて困難である。

2. 新材料の開発の必要性と要求条件

このような背景の中で、ペタバイトメモリの実現のためには従来高分子媒体の問題点を克服できる新たな材料開発と、それを活かす周辺装置の開発が求められる。従来のフォトポリマー材料では、微細な干渉模様を記録できないことが高密度化の妨げとなった。そのため、新材料に求められる条件としては、微細構造でホログラムを忠実に実現できることである。数十ナノメートル以下の微細領域で光感応をコントロールでき、さらに実用化のためには、熱、光、空気に対して安定的に存在できることが必要である。図表2-14に示すように媒体の微細化によって、従来の媒体では実現不可能であった非常に高い信号対雑音比を実現できる。また、更なる記録密度の向上の要求に対しては、光学的あるいは化学的に様々な特性を与えることが可能でなければならない。たとえば微細化した媒体を配向させ、偏光に対して選択的に反応できるよう高機能化させる手法などが非常に有望である。

3. ペタバイトメモリ用材料の候補

上記新材料に求められる要求条件を満足できる材料としては、これまでのフォトポリマー媒体に見られる高分子材料のポリマ長鎖を微細化したり、鎖状から円状に終端させることである。これらによって媒体の反応単位の微細化が可能となる。今後このような材料開発がペタバイトメモリ実現のポイントとなる。

高機能化として、偏光に対する選択的応答機能を付加することが挙げられる。上記微細配向型材料では、電子ビーム描画技術によるナノスケール加工技術を利用することにより、微細構造の局在化をコントロールすることによる配列や配向制御が可能となる（図表 2-15）。これによって、例えば図表 2-16 に示すように光の偏光方向に対する選択的な応答機能、記録におけるダイナミックレンジの拡大等の機能を付加できる。

4. 記録再生方式

従来も情報の多値化による記録密度の向上の試みはなされている。しかし、現状の高分子記録媒体では信号対雑音比が低く、システムの余裕度が不足するため多値記録方式の適用は困難であった。

しかし、微細配向型材料によって信号対雑音比の向上が図れ実現可能となる。材料の微細化により反応単位の寸法が従来の $1 / 10$ となるため、同一記録体積では $10 \times 10 \times 10 = 1000$ 倍の信号対雑音比や記録密度になる。

また配列制御されたナノ微細構造の光学異方性を利用して偏光多重記録を行なうことができ、これによってさらに 2~4 倍の記録密度の向上が見込める。さらに、図表 2-17 に示すように従来白黒 2 値の画像を用いて情報の記録再生を行ってきたが、ナノ微細構造の制御による信号対雑音比の向上によって中間調も用いて情報量が 3~4 倍に増やせると予想される。

5. 結論

ホログラムメモリの従来の試算に基づく記録密度の限界である 6 テラビット/ inch^2 を超えてペタバイトメモリを実現するためには、記録媒体材料を中心に新規なテクノロジーの注入を図る必要がある。

従来の媒体性能による限界を打破するためには、ホログラムを忠実に実現でき高い信号対雑音比を実現することが求められる。そのために微細配向型材料の開発が必要である。さらに微細加工技術を駆使した配列/配向制御による高機能化、あるいは偏光多重記録、多値化信号処理技術の適用によってペタバイトメモリの実現が可能となる。

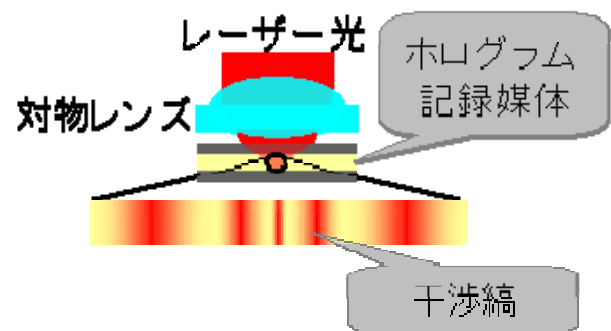
さらに、ホログラムが持つ高速データ転送性能を極限まで追求するために、ホログラムからの微弱な再生回折光を、超高感度、超高速受光可能な多画素の光受光器アレイの開発をはじめとして、波長が安定な高精度波長制御レーザー光源、高速空間変調器、高精度サーボ技術の開発も必須である。

結論をまとめて図表 2-18 に示した。

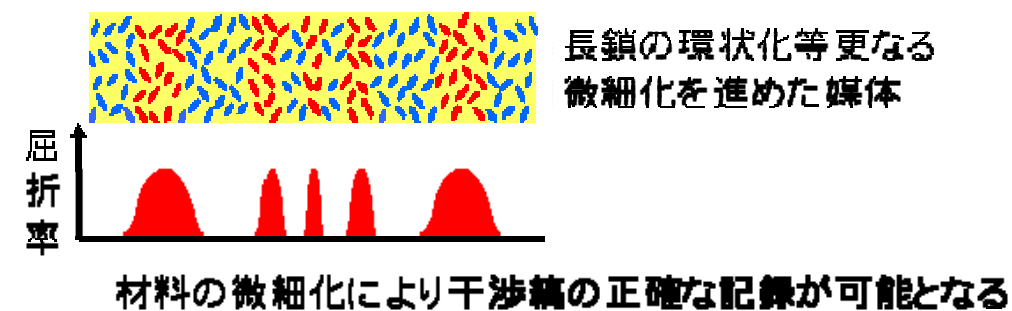
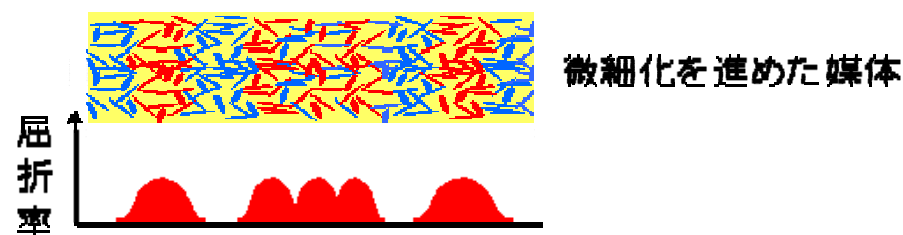
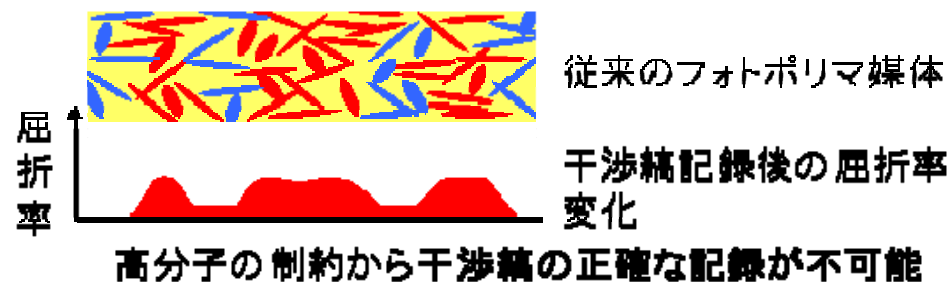
上記技術開発要素のロードマップを図表 2-19 に示す。

図表 2-14

媒体材料の微細化



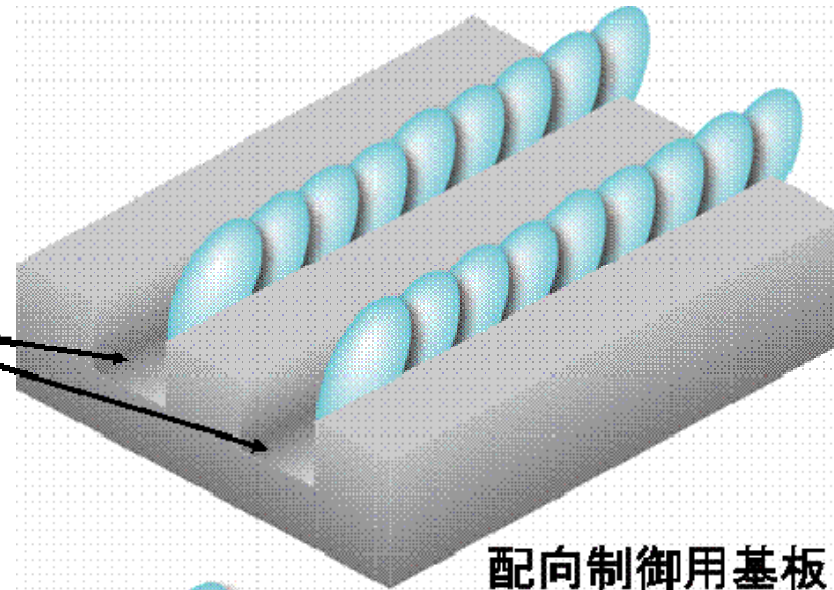
材料の微細化により記録密度
1ペタビット/inch²を目指す。



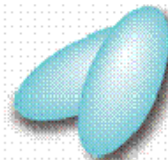
図表 2-15

電子ビーム描画技術による配向制御

電子ビーム描画による
配向制御用の精密な溝



配向制御用基板

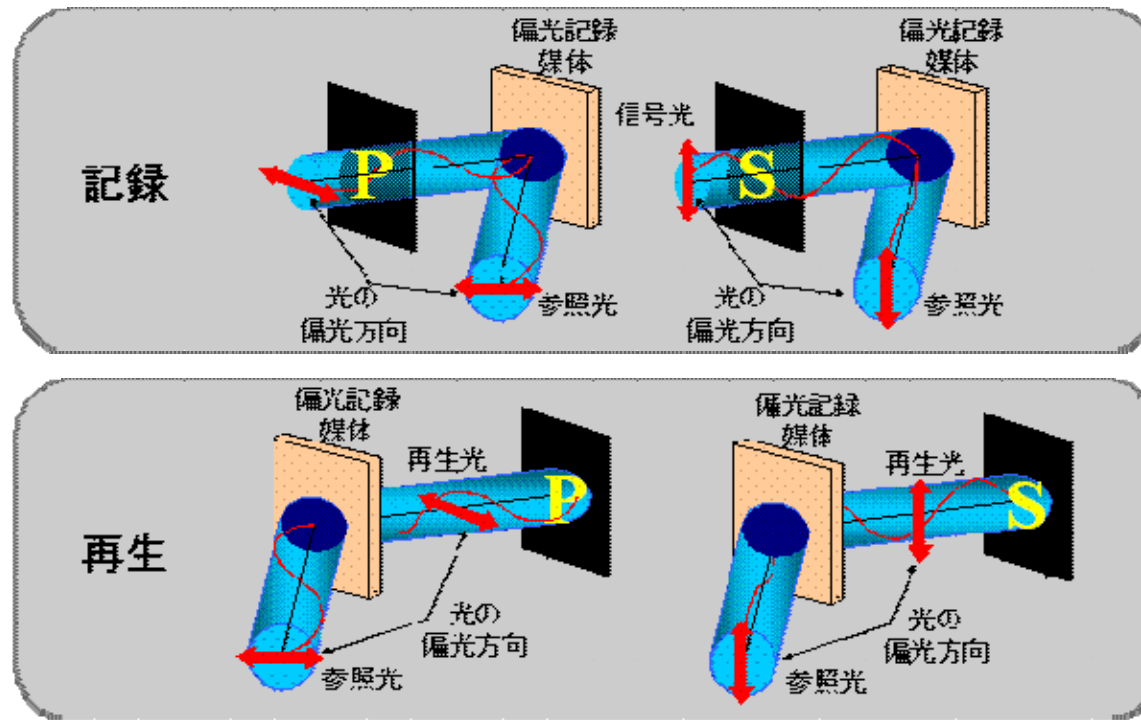


光学異方性を持つ微細媒体

図表 2-16

偏光制御型記録

●信号光と参照光の偏光方向を制御することで、記録媒体の同じ場所に複数の情報を多重記録する。

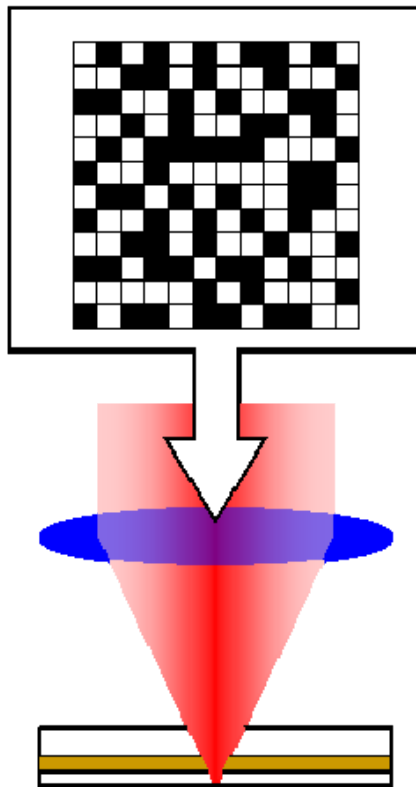


図表 2-17

多値記録

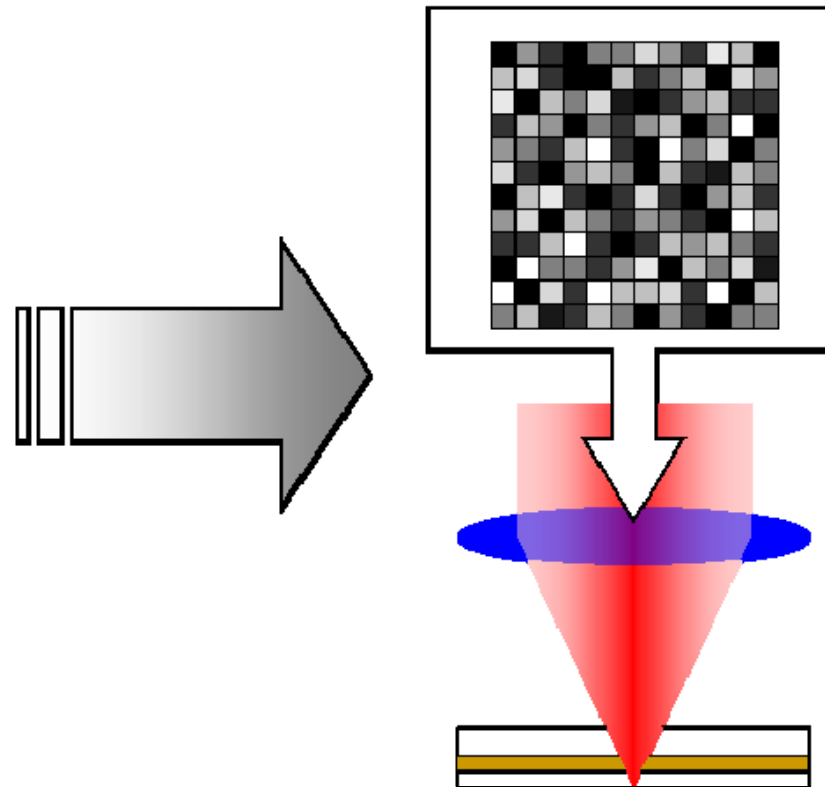
2値変調画像による記録

画素が白または黒で構成された画像により記録を行う。



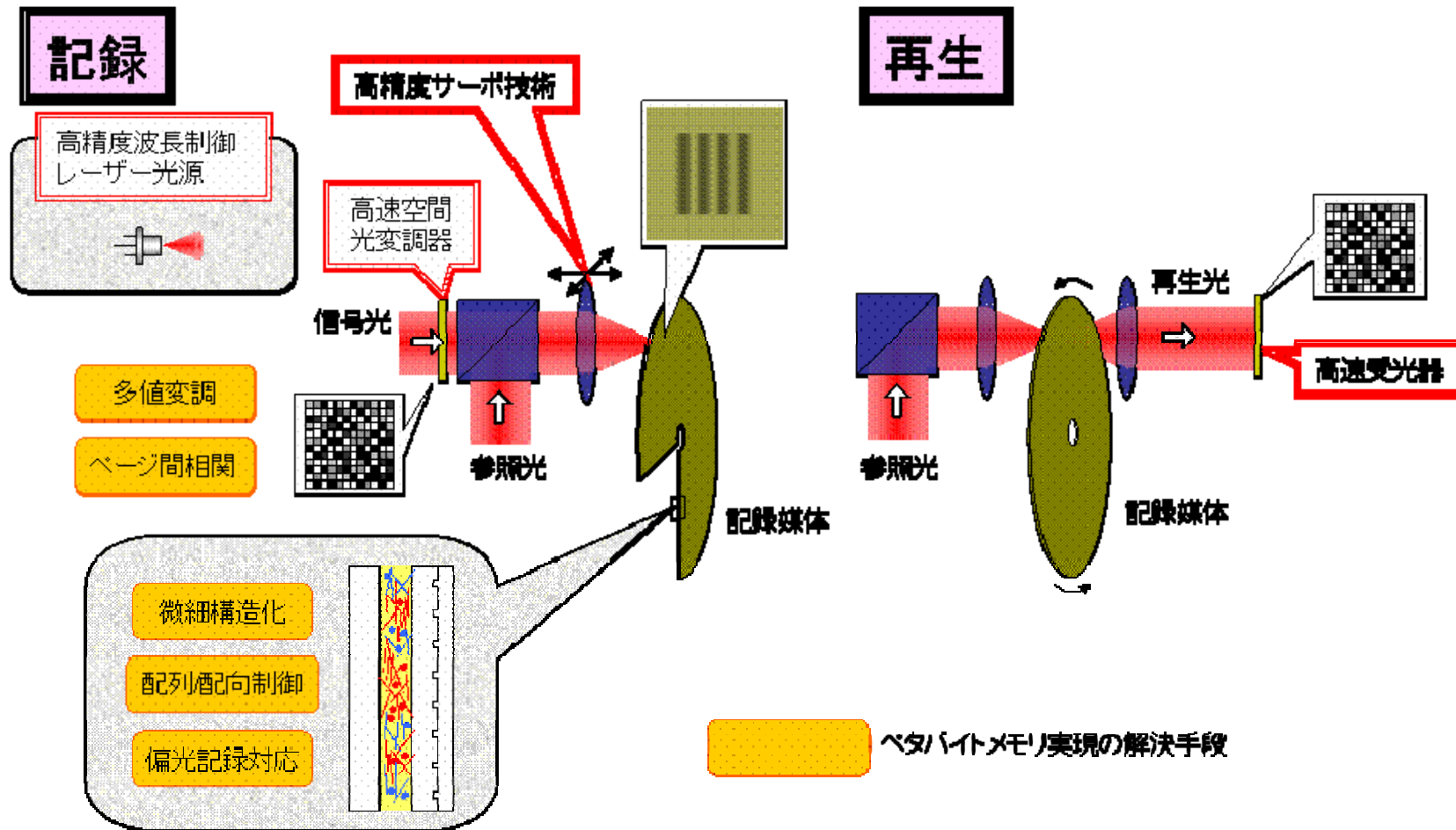
多値変調画像による記録

多階調の画素で構成された画像により記録を行う。



図表 2-18

まとめ



図表 2-19

ホログラフィック・データストレージ・ロードマップ

		2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	～2015	～2020
従来の光協会 ロードマップ	記録容量/Disc	→	135GB		→		1.4TB			
	記録密度/inch ²	→	100		→		1000			
	転送速度Mbps	100～250			→		1000			
新ロードマップ							1.4TB		100TB	～1PB
記録容量(/Disc)							1.4TB		100TB	～1PB
転送速度 (bps)							1G		10G	100G
課 題										
媒体	微細構造化 高機能化	微細構造化(ナノ制御)								
		→							配列・配向制御, 多色化,	
記録方式	高機能化	→					多値変調, ページ間相関			
		→							偏光記録対応	

2.2.5 超多層記録

ペタ(10^{15})ビット容量をもつ光メモリを実現するためのキーワードの一つは、多次元記録を実現することであると考えられる。これまでの光メモリは、平板ディスクにデータを並べて記録、再生する2次元記録であった。これを3次元、4次元に拡張することにより、飛躍的に記録容量を向上できるものと考えられる。

例えば、図表2-20に示すように、は、1cm角の立方体に100nm間隔でデータを記録すれば、実現できる。平面内に100nm間隔でデータを記録し、再生することは、既に市販されているブルーレイディスクの最短マーク長が149nmであることを考えると、それほど困難ではなく、近い将来に十分実現可能な値であろう。光軸方向(厚み方向)へのアクセスは多くの技術開発が必要であり、これらの成否がペタビットメモリの開発のキーになる。

多層に記録する光メモリは、次のような利点を持つ[1-4]。

(a) 非線形過程を利用しやすい

多層光メモリではビットデータの記録や再生は、記録媒体にレーザー光を集光して行なう。したがって、レーザーの集光点では、非常に大きな強度が形成され、容易に多光子過程などの非線形過程を誘起することが可能である。

(b) 記録材料のダイナミックレンジが不要

ビットデータを多層に記録する方式では、0または1の2値データを記録すればよい。つまり、グレーレベルを記録する必要がないので、記録材料の強度に対する特性として、ダイナミックレンジを必要としない。例えば、記録材料が光強度に対して、しきい値特性を示す場合、ビット記録方式には、非常に適した特性ということが出来る。このような特徴は、非常に大きなダイナミックレンジが必要とされるホログラムメモリと比較して、大きな利点となる。

(c) 可搬性を失わない

多層光メモリは媒体内のデータをレーザー光を利用して非接触に再生する方式であるので、現行の光メモリと同様に、可搬性を確保することが可能である。また、表面に付着したごみ、傷などにも強くモバイル機器に応用可能である。

(d) コヒーレントノイズ(スペckルノイズ)の影響がない

多層記録メモリでは、ビットデータを集光したビームで1ビットずつ時系列でデータを記録・再生するため、インコヒーレントな光学系となる。したがって、レーザーのコヒーレンスに由来するスペckルなどは発生しない。

(e) 現在の光メモリの技術を利用可能

多層光メモリにおけるデータ記録・再生に必要なシステムの構成は、現在実用化されている光メモリに近い構成となる。したがって、現在の光メモリで使用されているピックアップ光学系、フォーカスサーボシステム、トラッキング技術などを、多少拡張することによって、利用することが可能である。

多層記録を実現する場合の問題は光軸方向（厚み方向）におけるデータへのアクセスである。例えば、厚い記録媒体の内部にレーザー光を集光しようとするとき球面収差のためうまく集光できないし、多層にデータが記録されていると、上の層における光吸収、散乱、などのために、光が届きにくくなるなどの問題が生じる。これまでの市販のシステムでは、2層のDVDなどは開発されてきたが、光軸方向への拡張はあまり検討されてこなかった。今後は、光軸方向へのデータのアクセスを効率よく行なうための原理および技術開発が重要になると考える。

そのための一つの方法が多光子過程などを利用した光記録および再生である。この方法では、光強度に対する材料の非線形性を利用する。レーザー光を媒体内に集光すると、フォーカス点近傍では非常に大きな光強度が形成されるので、容易に2光子吸収などの非線形現象を誘起することが可能である。非線形現象の発生効率は、光強度に大きく依存するので、光強度の大きなフォーカス点近傍でのみ発生する。したがって、2光子吸収によって屈折率や吸収率が変化する材料を用いれば、フォーカス点近傍でのみ、屈折率変化または吸収率変化を形成することが可能である。媒体内でレーザー光を集光する位置を3次元的に走査することにより、屈折率変化または吸収率の変化として、多層のデータを記録することができる。このような非線形性を用いることにより、他の層からの影響を大きく低減し、多層記録および再生を実現することが可能となる。

光軸方向におけるデータアクセスを緩和する一つの方法は、面内の記録密度を向上させ、一層当りの記録密度を大きくすることである。例えば、データの記録に400nmの2倍高調波を用いれば、面内の記録密度は4倍向上するため、光軸方向へのアクセス1/4倍に低減できることになる。波長を半分にした事により、光軸方向の分解能も2倍向上しているので、等価的には1/8倍に制限を緩和したことに対応する[5]。さらに400nmの2倍高調波の光で2光子吸収を実現すれば、面内で16倍に記録密度が向上するため、光軸方向には等価的に1/64倍に低減できることになる。

ここで示したように面内の記録密度を向上させることで、光軸方向へのデータアクセスを軽減することにより、ペタビット容量をもつ光メモリの実現の可能性が高くなるものと考えられる。面内の記録密度を向上させる手法は、光源の短波長化、近接場光学の利用など、現在様々な技術開発が進められている。これらの手法を応用することによって、より光軸方向への応用を軽減できる。

一方、データの記録および再生に波長軸を導入することによって、さらに面内および光軸方向のデータアクセスにおける制限を緩和することが可能である。図表2-21に波長を多重化することによって、記録密度を向上させる多層光メモリの原理を示す[6-12]。記録層ごとに吸収の異なる材料を用い、記録光の波長によって、データを記録・再生する層を選択する手法である。

近年、熱安定性、繰り返し耐久性に優れたフォトクロミック材料が開発され、様々な波長域に感度を持つ材料が開発されていることから、波長多重化によるデータ記録が今後重

要な研究課題になるものとする。フォトクロミック材料は、従来の熱によってデータを記録するヒートモードとは異なり、光子（フォトン）のもつエネルギーによって、化学反応を誘起するフォトンモードの材料であるため、多光子過程などの非線形過程とも整合性が良く、今後の光メモリの大きなキー技術の一つになるものとする。

この他のフォトンモードの記録材料としては、光を吸収して光重合反応を生じるフォトポリマー、電子の局在化によって屈折率変化を生じるフォトリフラクティブ結晶、光照射によってトランスからシスへの異性体に変化して屈折率が変化する異性化材料、蛍光色素、等を用いることができる。

さらにデータを記録・再生する層を電圧制御で選択することにより、光軸方向へのアクセスを実現することも可能である。3次元光メモリーにおいては、記録媒体の深い位置に存在する記録層にデータを記録しようすると、光がその記録層に到達するまでに通過する他の層によって、光が吸収されてしまうという問題があり、実現できる層数には限界があった。また、クロストークを小さくするために焦点深度内にデータを記録・再生層が1枚になるように層間隔をとる必要がある。これが光軸方向のアクセスを制限する要因となっている。

電圧選択式の高層光メモリーはこれらの問題点を解決可能な方法として開発が進められている。この方法では、電気クロミック材料を用いた電圧による層選択方式多層光ディスクの構造を示す。電気クロミック材料を透明電極で挟んだものを積層し、多層構造を作製する。

まず電圧を印加してすべての層を透明状態にする。次にデータを記録したい層に着色に必要な電圧制御を行ない、1層のみ記録波長に対する吸収を増加させる。記録レーザー光を照射すると、着色層の吸収による熱によって色が失われ、透明になる。これが記録されたビットデータとなる。熱によって色が失われた部分は、着色に必要な電圧を印加しても透明状態を維持する。

データの再生には、再生層を着色させ、透明部分を検出する。データを再生する層だけを着色させ、それ以外の層は透明であるため、原理的には、他の層からのクロストークは小さい。この方法では、電圧のアシストによって、アクセスする層を決定することにより、データの層間隔を非常に小さくすることが可能である。レーザー光の焦点深度内に複数の記録層が存在しても良く、全体のディスク構造を薄くすることができる。1層当たり 300nm以下の厚みで実現できる。また、全体の厚みを他の手法に比べて、小さくできるため、球面収差、ディスクチルトなどに対するマージンに対する制限を大きく緩和可能である。さらに、電圧によって記録・再生層を選択するため、すべての層に光のロスなくアクセスすることが可能である。

非線形過程を光メモリへ応用する上で、一つのキーデバイスになるのが、コンパクトなフェムト秒レーザーの開発である。2光子励起過程を効率よく発生させるためには、ピー

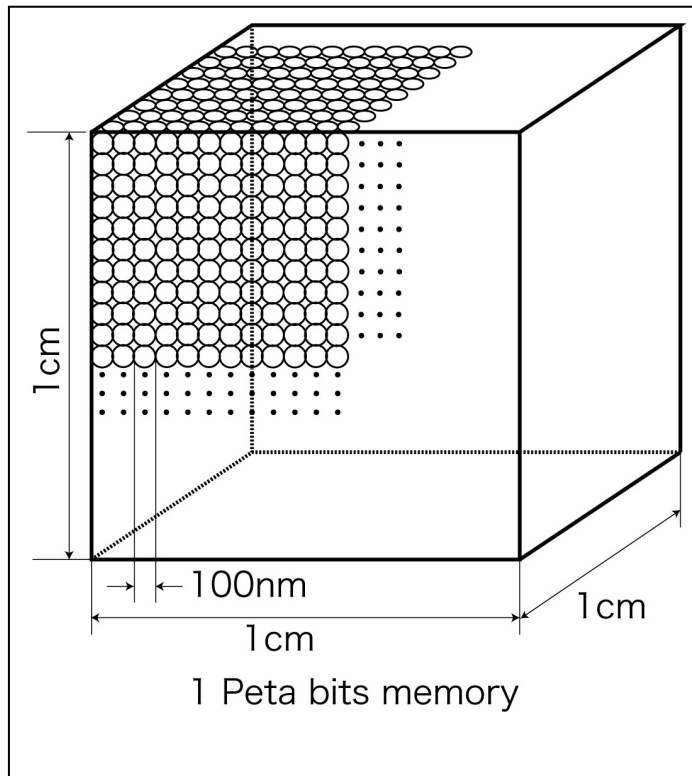
ク値の大きなパルスレーザー光を用いて高密度の光子(フォトン)を利用する必要があるからである。フェムト秒パルスを発生可能なレーザーとしては、チタンサファイアレーザーが知られている。しかし、これは大型のレーザーであり、光メモリの光源としては不適である。

コンパクトなフェムト秒レーザーとして、ファイバーレーザーの開発が進められている[13]。このレーザーの特徴は、レーザーの共振器として、光ファイバーを用いていることである。光ファイバーを共振器として利用しているため、ファイバーを巻くことによって、レーザー全体の大きさを十分小さくすることができる。既に、手のひらサイズのコンパクトレーザーが実用化されている。ファイバーを光メモリの再生ドライブ本体の中に組み込めば、現状でも十分小さな光源を実現することができ、多層光メモリの光源として十分実用化可能であると考えられる。

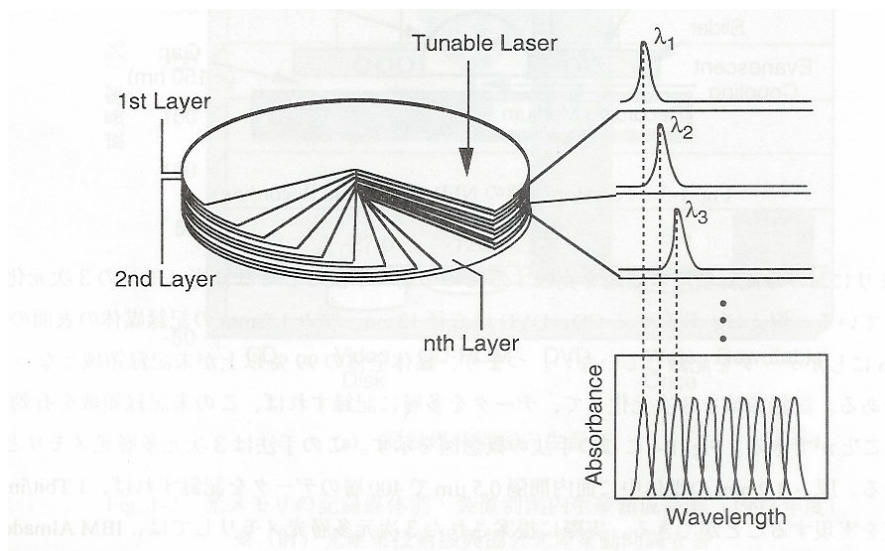
またファイバー中での非線形過程を利用すれば、出力光を白色化できる技術が開発されている。このような技術を用いれば、フォトリソ材料において、一つの光源でデータの記録・消去に必要な光を発生することも可能である。光源の出力も大きくできるなど、ファイバーレーザーは非常に柔軟性が高く、次世代の光メモリの光源として有望である。

以上のことをまとめると、ペタビット光メモリは、現在実用的に用いられている DVD に比較すると、25,000 倍程度の記録容量を持つ光メモリであるので、このような技術を実現するには、多くのブレークスルーが必要である。様々な分野、目的で開発されてきた技術を融合し、お互いに協調・補完することが重要になるものと考えられる。光源開発、材料開発[14]、システム開発などそれぞれの技術における極限を目指すとともに、それらを有機的に融合する統合能力が必要不可欠である。特に、それらの中でペタビット光メモリを実現するには、多次元記録が大きなキーワードの一つになるものと確信する。

以上、超多層記録技術達成のブレークスルーには、光源の高速変調化を含むシステム技術、記録材料開発によるメディア技術、ならびに多層構造化技術を含む広範な分野の同時技術開発が必要である。現状のテラバイト光メモリの開発課題とともに、ペタバイト級メモリア実現までのロードマップとして以下に示す(図表 2-22)。

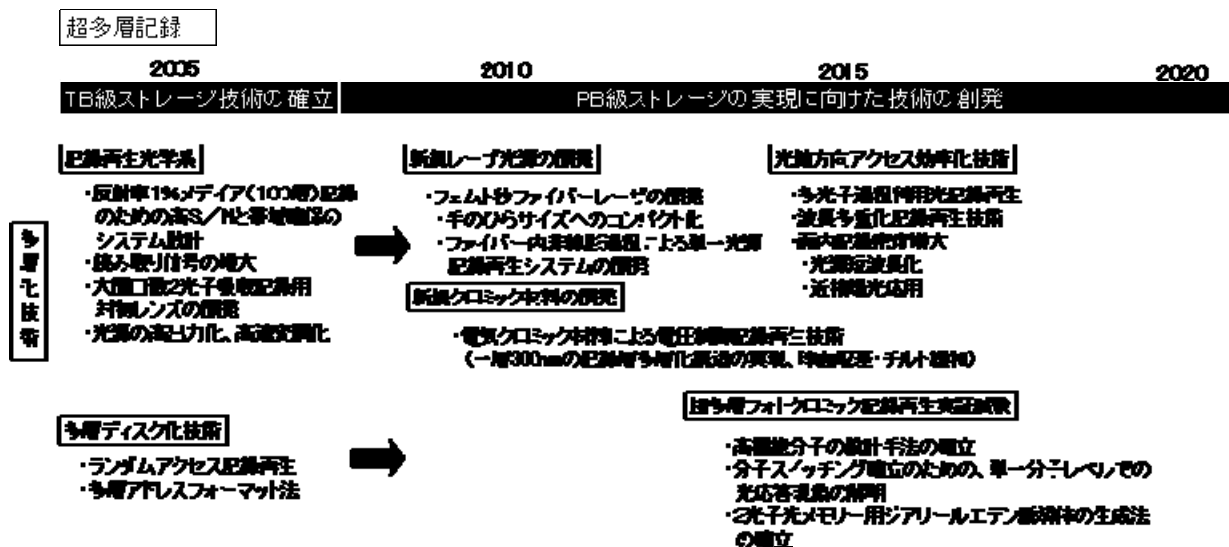


図表 2-20 1 ペタビットの記録容量をもつ光メモリ概念図



図表 2-21 波長を多重化することによって、記録密度を向上させる多層光メモリの原理図

図表 2-22



参考文献

- [1] S. Kawata and Y. Kawata, "Three-dimensional optical data storage using photochromic materials," *Chem. Rev.* Vol. 100, pp. 1777-1788(2000).
- [2] Y. Kawata, "Three-dimensional memory (invited paper)," *Proc. SPIE* Vol. 4081, pp. 76-85 (2000).
- [3] Y. Kawata, M. Nakano, and S.-C. Lee, "Three-dimensional optical data storage using three-dimensional optics," *Opt. Eng.* Vol. 40, 2247-2254 (2001).
- [4] M. Ishikawa, Y. Kawata, C. Egami, O. Sugihara, N. Okamoto, M. Tsuchimori, and O. Watanabe, "Reflection confocal readout for multilayered optical memory," *Opt. Lett.* Vol. 23, pp. 1781-1783(1998).
- [5] 川田 善正, "講座「分光学における極限を探る 第3回空間分解能」," *分光研究* Vol. 52, pp. 178-189 (2003).
- [6] M. Irie and M. Mohri, "Thermally irreversible photochromic systems. Reversible photocyclization of diarylethene derivatives," *J. Org. Chem.* Vol. 53, pp. 803-808 (1988).
- [7] M. Irie, "Advances in photochromic materials for optical data storage media," *Jpn. J. Appl. Phys.* Vol. 28, 215-219 (1989).
- [8] M. Irie, K. Sakemura, M. Okinaka, and K. Uchida, "Photochromic of dithienyl ethens with electron-donating substituents," *J. Org. Chem.* Vol. 60, pp. 8305-8309 (1995).
- [9] M. Irie, T. Fukaminato, T. Sasaki, N. Tamai, and T. Kawai, "A digital fluorescent molecular photoswitch," *Nature*, Vol. 420, p. 759 (2002).
- [10] A. Hamano and M. Irie, "Rewritable near-field optical recording on photochromic thin films," *Jpn. J. Appl. Phys.* Vol. 35, pp. 1764-1767 (1996).

[11] E. Ando, M. Miyazaki, K. Morimoto, H. Nakahara, and K. Fukuda, "J-aggregation of photochromic spiropyran in Langmuir-Blodgett films," *Thin Solid Films*, Vol. 133, pp. 21-28 (1985).

[12] J. Hibino, T. Hashida, M. Suzuki, Y. Kishimoto, K. Kanai, "Spiropyran aggregates for multiple optical memory," *Mol. Cryst. Liq. Cryst. Vol.* 255, pp. 243-251 (1994).

[13] A. Hideur, T. Chartier, M. Brunel, S. Louis, and C. Ozkul, "Generation of high energy femtosecond pulses from a side-pumped Yb-doped double-clad fiber laser," *Appl. Phys. Lett.* Vol. 79, pp. 3389-3391 (2001).

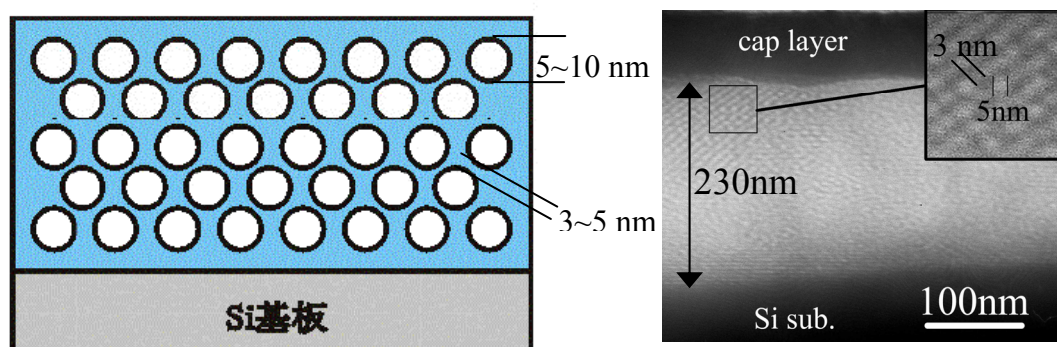
[14] M. Albota, D. Beljonne, J.-L. Bredas, J. E. Ehrlich, J.-Y. Fu, A. A. Heikal, S. E. Hess, T. Kogej, M. D. Levin, S. R. Marder, D. McCord-Maughon, J. W. Perry, H. Rockel, M. Rumi, G. Subramaniam, W. W. Webb, X.-L. Wu, and C. Xu, "Design of organic molecules with large two-photon absorption cross sections," *Science* Vol. 281, pp. 1653-1656 (1998).

2.2.6 自己組織化稠密3次元構造による超多層記録と3次元再構成法

1) 自己組織化稠密3次元構造を用いた超多層記録

ペタビット容量をもつ光メモリを実現するには、「2.2.5 超多層記録」に述べられているように超多層化が重要である。2.2.5で述べられている厚さ方向に100 nm 間隔で記録する方法は大変有望であると考えられる。これに加えここで例として述べる自己組織化による稠密3次元構造を利用する方法も、もう一つの有力な方法と考えられる。2次元での自己組織化を利用した高密度記録媒体についていくつか提案されているように、自己組織化法は超高密度媒体作成法として有望である。これを3次元化することは下記の例のように比較的容易であり、その超多層記録への応用は重要であると考えられる。

自己組織化稠密3次元構造として、2.2.5の図表2-20に比べ厚さ方向の積層単位がおよそ一桁小さい~10 nm 近辺のものを想定している。その一例として、図表2-23に示すような化学的合成法によるナノメートルサイズの空孔を有するSiO₂が挙げられる。



(a) (b)
図表 2-23 (a) 3次元稠密自己配列ナノ空孔を含むSiO₂概念図,
(b) 化学的合成法により実際に作製した例,
透過電子顕微鏡断面図

文献[1]

これらの空孔内に、2.2.2で述べられているスピクラスタ媒体や他の機能性分子あるいは原子(群)を挿入することは比較的容易であると考えられる。これらに光、磁気あるいは光と磁気の併用により可逆あるいは非可逆変化を起こし情報を記録することになる。超大容量となることから非可逆変化によるwrite onceの追記型でもその用途は十分広いと考えられる。

図表 2-24 Pb/inch²を実現するための3次元稠密自己配列利用の例

1 記録層当たり面記録密度	必要記録層数	記録単位の面内領域	図1で直径5nm、間隔3nmの六方稠密構造を仮定したとき必要とする面内での空孔の数	備考
1 Tb/in ²	1000	25 x 25 nm ²	7	「1 記録層」に必要な厚さは厚さ方向の空間分解能により異なる。理想的には3次元稠密構造の各層であるが現実的には何層かが必要となる。厚さ方向分解能を100nmと仮定している
10 Tb/in ²	100	18 x 18 nm ²	3	
100 Tb/in ²	10	8 x 8 nm ²	1	
図 28 の例	10 ⁵	100x100nm ²	-	

3次元稠密自己配列により、1Pb/in²を実現する場合の例を図表2-24に例として挙げた。すなわち面内の空間分解能が大きく、例えば8x8nmサイズで記録再生可能であれば面内密度は100Tb/in²となるから、厚さ方向には10層の記録単位が出来ればよいということになる。このとき図表2-23の場合を想定すると、面内で1ビットのために用いられる「機能性を付加した空孔の数」は1個程度となる。

記録に関しては、光強度に対して閾値特性を示す記録材料による2値データを記録する方式を採用すれば、光軸方向への光走査を加えた3次元光走査による記録が可能であると考えられる。2.2.5では再生に関しても多光子吸収などの非線形過程により光軸方向の分解能の向上が提案されているが、稠密構造の厚さ方向の周期が一桁小さい場合には、特に再生に関しては、光軸方向の分解能が十分でない場合についての再生方法を検討しておくことが重要となる。

2) 超多層記録における3次元再構成法

X線CT画像は3次元物体の断面である2次元画像をその投影画像である1次元画像の組み合わせから復元する方法である。X線CT画像では、ある断面の2次元画像の1次元投影を周囲から360度に渡り撮像することにより、2次元断層像のフーリエ変換像が等価的に得られることから、2次元断層画面を再構築する。これを繰り返すことにより3次元のデータを得ることが出来る。

超多層記録でも、もし周囲360度から観測が可能であれば同様のことが可能になるが、これは殆ど不可能と思われる。しかし、超多層記録の場合は、光軸方向への走査を行うことが出来るので、これにより3次元データの再構築が可能となる。もちろん2.2.5で提案されているように、十分な空間分解能があれば、光軸方向の記録層毎に分離したデータが得られることは当然であるが、課題はそのような十分な分解能が達成できないときの問題を解決するところにある。

面内方向のある場所(x、y)で光軸(z)方向に走査した場合を先ず考える。単純にはz軸に関する再生信号のインパルス応答をh(z)とすれば、その逆フィルタH⁻¹(f)により元の再生信号が得られる。しかしながらz軸方向への走査がニヤフィールド光学系で行われるで

あろうことなどを考慮すると、媒体と光源間距離の変動等による境界条件が異なることから、必ずしも再生系の線形性が成立するとは限らない。

そこでこのような場合、パターン認識における「類似パターンの認識技術」の応用を考える。すなわち3次元稠密構造中に記録された情報のz軸方向走査中に得られる信号を2次元画像の系列と考え類似文字認識等に用いられる技術に応用し分離する。

各記録層から得られる画像として扱う観点からは、ホログラフィックメモリに類似しているようであるが、ここでは先にも述べたように元の記録情報は1、0の2値画像を前提としており、それが「再生系により“ぼけ”を付加されて検出される」状態を考えることになる。それらを大略次のような方法で再構成し記録情報を取り出す

- 1) 対象となる2次元未知情報 X を n 個の特徴で観測し、 n 次元特徴空間上で表現する。
- 2) これに最も近い距離にある原パターン群 $Y(Y_{s,k}^j: k=1 \sim p)$ を選択する。
- 3) X の z 軸に沿った走査に伴う変化 (n 次元特徴空間上での軌跡) を求める。
- 4) それらが、あらかじめ用意された Y の z 軸に沿った走査に伴う変化の軌跡と一致するならば X は Y に属するとする。
- 5) $Y(Y_{s,k}^j: k=1 \sim p)$ は、 $Y_{s,k}^j(y_{k,l}^j: l=1 \sim m)$ に近い物から出来ているサブ集合の集合であるとする(類似パターン集合の集合)。 Y 内のある $Y_{s,k}^j(y_{k,l}^j: l=1 \sim m)$ を選択しこの中で、 X に最も近い $y_{k,u}^j: u=1 \sim m$ を選択しこれを再生信号とする。
- 6) このとき各 $y_{k,u}^j: u=1 \sim m$ は互いによく似た類似パターンであるから、それらと X との比較に例えば「混合マハラノビス関数による高精度な類似文字識別手法」[2]に見られるような技術を用いる。すなわち X を各 $y_{k,u}^j: u=1 \sim m$ の固有値で張られた部分空間中で互いの差が顕著になる軸(成分)により比較するなどの手段を用いる。
- 7) 場合によっては、選択する Y あるいは $Y_{s,k}^j$ を 1) ~ 6) の結果より変更し、さらに 3) ~ 6) を繰り返す。
- 8) 各記録層ごとに X が求められたとし、これを初期値とし各隣接記録層からの漏れ信号(クロストーク)を考慮し、再度上記 1) から 6) を繰り返すことで z 軸方向に符号間干渉を除去し3次元情報の再構築を行う。

このとき、通常の文字パターンや、自然画像における類似パターンを認識することと決定的に異なるのは、再生系の伝達関数(およびその変化を)をあらかじめ知ることが別の実験やシミュレーションから可能であること、また再生系を通過する前の原パターンについても、記録する符号の種類をあらかじめ知ることが出来ることである。すなわち上記の $Y(Y_{s,k}^j: k=1 \sim p)$ 、 $Y_{s,k}^j(y_{k,l}^j: l=1 \sim m)$ およびその特徴空間上での分布を決定するとき、類似パターンの分離がしやすいように決定することが出来ることにある。すなわち、上記のような「再帰型繰り返し逐次近似法による3次元再構成」に都合の良い、冗長な符号構成法を構築することが可能ではないかと考えられる。

これらは、再生光学系の分解能が高ければ高いほど、用いる2次元符号の冗長性を下げ

ることが出来るから、例えば検出器中に設けた簡単な論理回路により実現する、インテリジェントヘッド実現の可能性もあるであろう。また、分解能の向上により逐次近似の回数も減少することが出来る。すなわち基本的には、出来るだけ bit by bit 検出の精度を上げることが高密度化に直結することは当然のことである。しかしながら、ここに述べた方法を用いればその状況下に置いてさらに密度を上げることが出来ることになる。

一方、2.2.5 にも述べられているように記録層毎の波長依存性が利用できるようであれば波長の異なる複数の光源により、文献[3]で光磁気記録において実証されているように z 軸方向への分解能が上げられる。また、もし層構成あるいは層材料の選択により厚さ方向に波長依存性のみでなく偏波面依存性が生じるように出来れば同一波長でも直交する二つの波面で異なる信号を取り扱うことが出来る[4]。これらの光学的技術を駆使すること並びに類似パターンの分離というパターン認識上の技術を組み合わせることも超高密度記録再生にとっては重要であると考えられる。

[1] A. Itoh, A. Tsukamoto, K. Morisaki, K. Nanba, H. Sato, Y. Itoh, J. Ohtsuki, C. Ahn, :SiO₂ SUBSTRATE HAVING SELF ORGANIZED NANO SCALE PORES AND Co DOT ARRAY ON IT AND COERCIVITY ENHANCEMENT IN RE-TM FILM, INTERMAG2005 Conference, Nagoya Japan, ED-08. (2005).

[2] 鈴木雅人, 大町真一郎, 加藤寧, 阿蘇弘具, 根本義章: 混合マハラノビス関数による高精度な類似文字識別手法, 電子情報通信学会論文誌, D-II, Vol. J80-D-II, No. 10, pp2752-2760 (1997).

[3] K. Nakagawa and A. Itoh: Multi wavelengths read-out for multi-valued MO recording J. Magn. Soc. Jpn. Vol. 20, No. S1, pp. 73-78, (1996).

[4] A. Itoh, K. Nakagawa, K. Shimazaki, M. Yoshihiro, and N. Ohta: High SNR Readout Method for Double Layered MO Disk with Single Wavelength Laser Beam, J. Magn. Soc. Jpn. Vol. 23, No. S1, pp. 221-224, (1999).

2.2.7 単一分子光メモリ - 光記録方式と記録材料 -

2次元平面において1 pb/inch²の光記録密度を達成するには、1記録ピットの大きさは0.79 nm 径以下となることが要求される。このことは、0.79 nm 以下の領域をその周りとは区別して確保し、その極微小領域の物性を光照射により変化させ、なおかつ、その極微小領域の物性変化を高速、高感度で検出することが要求される。光変化した物性は、室温(少なくとも100度)において、半永久的に保存されることも必須要件である。読み出し破壊がないことは言うまでもない。これらのペタビットの光記録に要求をまとめると、次のようになる。

- (1) 0.79 nm 以下の領域を周りとは区別して確保する
- (2) この極微小領域の物性が、光照射により高速(ピコ秒程度)、高感度(10^2 - 10^3 フォトン程度)で変化する
- (3) この光誘起物性変化が、室温において十分の C/N で検出可能である
- (4) 物性変化は、温度100度、湿度90%程度の環境でも半永久的に保存される
- (5) 多数回読み出ししても破壊されることはない
- (6) 書き換え可能が望ましい

これらをすべて満足する光記録方式、記録材料を開発することが、ペタビット光記録を達成するためには要求される。少なくとも原理的にこれらすべてを達成することが可能であるかどうかを、注意深く吟味する必要がある。

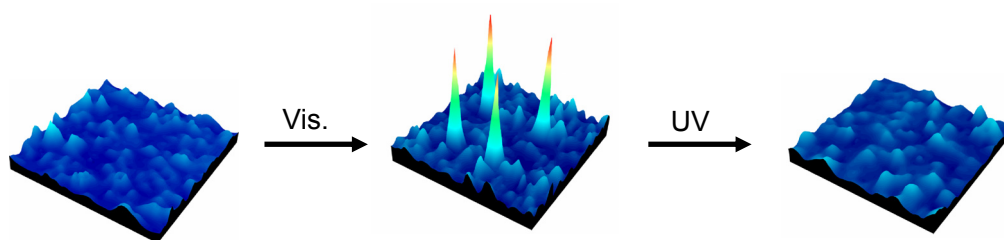
ここでは、これらすべてを原理的に達成可能な、光記録方式、光記録材料を提案する。現状の光記録方式は、いずれも光を一旦記録媒体上で熱に変換して熱記録する「ヒートモード」記録方式を採用している。この「ヒートモード」記録方式は、熱拡散、物質拡散を必ず付随することから、1 nm 以下の極微小領域に限定して光物性変化を誘起させる方式としては、原理的に採用不可能である。また、ヒートモード方式を用いて限定された 10^2 - 10^3 個程度の少数フォトンにより高感度に物性を変化させることは期待されない。極微小領域において高速、高感度の光記録を達成するには、光反応を利用する「フォトンモード」光記録方式の開発が欠かせない。フォトンモード方式では、原理的に数個のフォトンが吸収されれば物性変化を誘起させることが可能(高感度)であり、なおかつ、ピコ秒の高速性を有している。ペタビット光記録には、「フォトンモード」光記録方式が必須である。

フォトンモード光記録方式に用いることのできる材料の一つが、有機分子である。有機分子は、例え複雑な構造をしていても、そのサイズは1 nm 以下であり、電子は分子一つ一つに局在しているため、周りとは完全に分離した状態で存在している。すなわち、(1)の要求を本質的に満たしている。1記録ピットを0.79 nm 以下に独立させることができ、なおかつ、周りに記録が染み出すことはない。有機分子の光反応を用いれば、量子収率が例え0.1であっても、原理的に10個のフォトンにより1ピットを高感度に光物性変化を誘起させることができる。多くの光反応は高速で、ピコ秒領域で完了する。有機分子の光反応を用いれば、(2)の高速、高感度の要求を満たすことは可能である。

分子一つ一つの光誘起物性変化をどのように読み出すかが、次の課題である。様々の可能性はあるが、最も容易ですでに実現しているのが、蛍光検出である。分子一つ一つからの蛍光を検出することは、まだ検出速度は遅いが、実現している。具体的には、光反応により、蛍光強度が変化する有機分子を記録材料として用いれば、単一分子に1ピットを記録し、読み出すことができる。この場合は、(3)の要求である高い信号レベルも達成している。(4)の記録の安定性であるが、例えば、ジアリールエテン分子を用いた場合には、室温において47万年の記録保持安定性のあることが知られている。有機分子を記録ピットとして用いると、分子が存在する限り記録は保持されることから、微小記録ピットが熱効果により拡散したり染み出して消える心配は全くなく、100度の高温、湿度90%においても、記録破壊は原理的に起こることはない。通常の光記録に要求されるレベルでの安定性は、極微小領域において有機分子を用いることにより達成可能である。

フォトンモード記録方式の場合、非破壊読み出しをいかに達成するかが問題とされているが、蛍光読み出しでは 10^4 回程度の多数回読み出しはすでに報告されており、今後の研究開発によりさらに、読み出し回数は増えることが期待される。(5)の要件を満たすことも可能である。

書き換え機能(6)も、フォトクロミック分子を用いれば可能になる。すでに、フォトクロミック分子であるジアリールエテンと蛍光分子とを結合させた「光メモリ分子」をもちいた単一分子光メモリの原理実験が報告されており、有機分子一つ一つをメモリユニットとすることは、実現可能な段階にある(図表2-25)。



図表 2-25 単一分子光メモリ。分子4つの光記録、再生および消去

単一分子光メモリに関する論文：

(1) M. Irie et al., Nature 420 (2002) 759

(2) T. Fukaminato et al., J. Am. Chem. Soc. 126 (2004) 14843

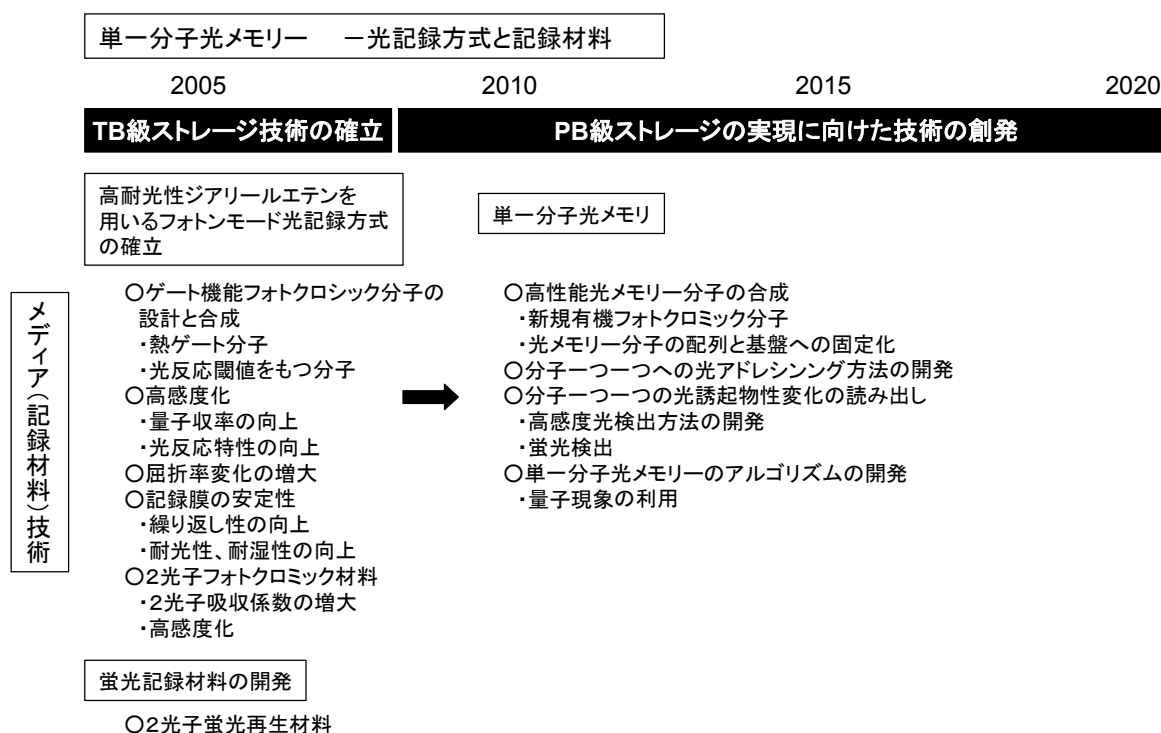
以上のように、フォトンモード方式の有機分子一つ一つに記録する「単一分子光メモリ」は、ペタビット光メモリに要求される要求をすべて原理的に達成することができ、最も有望な光記録方式、記録材料であると言える。

この点を踏まえて、開発すべき重要な課題を列挙すると次のようになる。

- (1) 高性能光メモリ分子の合成
- (2) 光メモリ分子の配列と基盤への固定化
- (3) 分子一つ一つへの光アドレッシング方法の開発
- (4) 高感度光検出方法の開発
- (5) 単一分子光メモリのアルゴリズムの開発

以上、PB級メモリー開発技術要素を、現状のTB級メモリー開発ロードマップに重ね合わせ図表2-26にそのロードマップを示す。

図表2-26



2.2.8 その他のメモリ技術

2.2.8.1 ボトムアップ型ナノテクノロジーの応用可能性

ペタ級ストレージを実用化するには、新規材料開発と平行してナノ加工技術の開発が必要である。ここではナノ加工のより詳細な可能性について述べる。

広く知られているように、ナノテクは、トップダウン型とボトムアップ型に大別される。上記の原子スイッチなどのデバイスを作成する場合、ナノスケールより微細なスケールである、原子、分子を積み上げてデバイスを実現するアプローチが、ボトムアップ型のナノテク、あるいは、ボトムアップ型のナノ加工と呼ばれる。これに対し、従来の半導体微細加工は、マクロサイズのシリコンウェハを加工してナノスケールのデバイスを実現するというアプローチであり、これはトップダウン型のナノテクと呼ばれる。

ペタ級ストレージ技術の実現に向けては、従来の半導体、ストレージの進歩を支えてきたトップダウン型のナノテクだけでなく、ボトムアップ型のナノテクの活用も検討される必要がある。原子、分子を組み立てるという方法で新材料を開発することも、ボトムアップ型のナノテクであり、ボトムアップ型ナノテクによる、究極のテラードマテリアルの実現である。

ボトムアップ型のナノテクによる加工、あるいは製造において注目されるのは、自己組織化機能である。つまり、加工対象である原子や分子がおのずから組織化するという機能の活用である。自己組織化機能の発現は、マクロな世界でもみることができる。例えば雪の結晶は常に六角形であり、これは、水の分子が自己組織化した結果である。もちろん、原理的にはトップダウン的な技術での対応も可能である。雪の場合は、マクロなサイズの氷を削って雪の結晶を作るのに相当するが、そのような方法で、雪の結晶を作成することは容易ではない。しかし、ボトムアップ的な方向では、自然が、まさに自然に雪の六角形を実現してくれるのである。

ペタ級ストレージが要請する微細加工においても、ヘッド、記録層等々を構成する原子、分子が備えている自己組織化機能を活用した製造方法の検討も必要と考えられる。

このような可能性を積極的に追求したのがドレクスラーのナノマシーンである。ナノマシーン自体も未だ構想の段階にあり、ストレージ技術として実現できているものはないが、有力な将来技術の候補として捉えられるべきであると考えられる。

また、現在のストレージ技術には、MEMS と呼べる技術も応用されているが、この延長線上にある、より微細な技術が NEMS (ナノスケールの MEMS) である。このような部品の実現にもボトムアップ型のナノテクの応用は不可欠と考えられる。但し、ボトムアップ型のナノテクによりこのようなレベルの部品が実用化された場合には、マクロな部品では考慮されなかった課題も出現する。例えば、気体分子によるブラウン運動の発生である。

NEMS のような微細な部品は、このブラウン運動という外乱の中で、所定の機能を実現することが必要となる。このような状況で良好な制御を行なう手段についての研究もまた必要である。現在、このような課題については、確率共鳴の活用といったことが研究されて

いるが、ペタ級ストレージの実現のためには、そのような対応も必要とされるのである。

2.2.8.2 原子・量子応用メモリ

量子メモリは、たとえば次世代型量子情報通信ネットワーク技術において開発が進められている技術のひとつである。量子暗号技術、量子通信技術とともにデバイス系技術として単一光子検出器、単一光子発生器、固体量子集積回路技術などとともに2020年ごろの実現を目指している。平成15年に総務省の示したロードマップによれば、量子メモリは2010年までに数ビット、また2020年を目途に大規模化が示されており、現在、量子状態の保持等の基礎技術開発が進行している状況にある。

また、1個～数個の原子の移動を制御する「原子スイッチ」の光メモリへの応用についても研究が始まっている。これまでの半導体デバイスが電子の移動を制御することによって動作しているのに対し、原子の移動を制御して動作させる新しい原理のデバイスである。電子より重い原子の移動を利用するにもかかわらず、ナノ寸法のデバイスを実現させることによって新規メモリーの実現を可能とするものである。

これらの技術は、ペタのその先に来る技術かもしれないが、何らかの意味で限界を突破する可能性を秘めているかもしれない。

第3章 まとめと今後の課題

インターネットとブロードバンド網の整備、そして各種デジタル機器の普及により、ストレージ産業の伸びが続いている。世界の情報量はすでにエクサ(10の18乗)バイトに達し、2020年代にはそれがパーソナルレベルでも身近になることが予想される。テラからペタさらにはエクサ級への情報量増加の流れの中で光情報記録技術の継続的成長が果たす役割はますます重要となる。

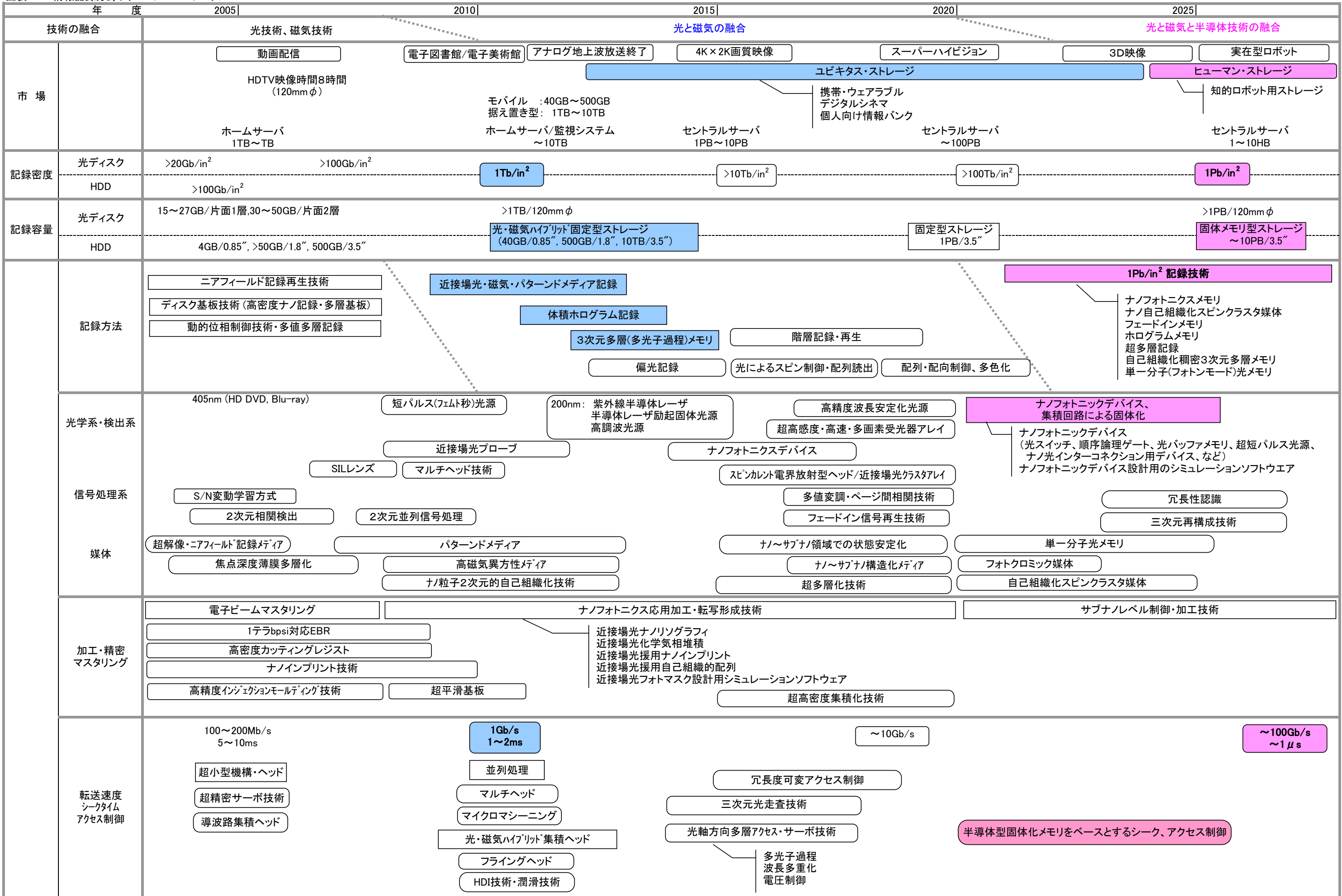
一方、情報通信技術はますます加速度的に進歩し、10年後、20年後のストレージの姿は大きく異なる。高速ブロードバンドの普及で、パッケージメディアは主役を降りるだろうし、ペタの記録密度が実現すると書き換えできる必要性も少なくなる。パーソナルな一時記憶としてのメモリ、情報バンク的なネットワーク上のノードメモリ、そして100 - 1000年レンジのアーカイバルメモリ等の新しいストレージ階層をなし、そこに新しいビジネスモデルが創出される。

そこで、ロードマップ策定に当たって、まず超大容量ストレージ時代の情報環境とIT世界像、必要なシステムについて予測した。今後の20年を見通すと、2010年代にテラバイト時代、2020年代後半にペタバイト時代を迎える。テラバイト時代では、多様なストレージがコンピュータとネットワークを介して互いに連携し、「多様なデジタルサービスがいつでもどこでも簡単に使える」いわゆるユビキタスストレージと呼ぶ情報世界が展開する。さらにペタバイト時代になると、量的だけでなく質的にも進化したストレージの世界が展開する。ペタの容量は人間の脳とほぼ同じであり、ヒューマンストレージの情報世界と言える。

図表3 - 1は、第2章で述べた、テラとペタの記録密度実現に至る過程をテクノロジーロードマップとして纏めたものである。テラの記録密度については、現在研究開発が進んでいる各記録技術の延長上にほぼ目処がついていて、遅くとも2010年代前半に実用化される。有力な方式の一つは、近接場光を用いて、光と磁気の技術が融合した光・磁気ハイブリッド型記録技術である。これに対して、テラからペタに至る技術ギャップは大きい。1 Pbpsの単位記憶サイズはサブナノオーダーであり、基盤技術としてのナノ加工技術と、これに高速・高精度でアクセスし、安定に情報を入出力する技術を確立しなければならない。材料開発では、これまでのトップダウン型に加えて、原子レベル、分子レベルからボトムアップ型にナノ構造の材料を作り上げ新規な機能を発現する新機能材料開発が必要となる。また、ギガからテラ級ストレージへのブレークスルー技術として、「光」と「磁気」の融合技術がある様に、ペタ級実現には「光」と「磁気」と「半導体インテグレーション技術」の融合によるブレークスルーが重要になる。図表3 - 2に、ペタの記録密度実現に向けて必要とされる要素技術と概要をピックアップする。

本報告書では、今後 20 年間にわたる超大容量ストレージ時代の社会像と、ペタバイト級ストレージ実現に向けて、システム目標、デバイス、それを実現するためのテクノロジー、および課題についてロードマップとして策定した。現在テラ級ストレージ実現に向けて、日本国内外各機関で精力的に研究開発が進められている段階で、ペタ級については未だ視野の外にある。光情報記録分野、小型ハードディスク分野では、日本がリードしている状況の中で、いち早くペタ実現に向けて将来の布石を打つ時期に来たと考える。今後、これが引き金となってさまざまな分野で活発な議論が巻き起こることを期待している。

図表3-1 情報記録分野テクノロジーロードマップ



図表3-2 1ペタbpsi実現に向けて必要とされる要素技術

	技術名	概要
ナノフォトニクスメモリ	ナノフォトニクス	近接場光により媒介されるナノ寸法物質間の局所的相互作用を用いた加工、デバイス、システム技術
	階層性による記録再生	ヘッドと記録媒体との距離に依存した空間的広がりを有する近接場光エネルギーが移動する性質を用いて、多層記録媒体と同等の情報多重化記録再生を一層の媒体で実現する技術
	光メモリの固体化	ナノフォトニクスデバイスによる半導体メモリ型と融合したスライダなど可動部の無いメモリ
	ナノフォトニクスデバイス	近接場光エネルギー移動を利用した、光スイッチ、順序論理ゲート、光バッファメモリ、超短パルス光源、光インタコネクション等デバイス
	ナノ光加工技術	近接場光によるリソグラフィ、化学気相堆積、ナノインプリント、自己組織的配列等加工技術
	ナノフォトニクスによる超高速集積光ノード技術	階層性も含めた新概念にもとづく信号処理法
ナノ自己組織化スピクラスタ媒体	ナノ自己組織化スピクラスタ媒体	ノイズや不安定動作の要因となる磁壁を排除したナノサイズの単磁区磁性結晶粒(スピクラスタ)を自己組織化で整然と並べた媒体
	ボトムアップ型ナノテクノロジー	ナノスケールより微細なスケールである、原子、分子を積み上げてデバイスを実現するアプローチ。これに対して、シリコンウェハを加工してナノスケールのデバイスを実現するアプローチをトップダウン型と呼ぶ
	超テラbpsi~サブペタbpsi級ストレージ技術	スピン再配列/交換結合型高速反転技術、スピン偏極STM技術、等。媒体としては一軸異方的反強磁性材料、強磁性/反強磁性交換結合型複合積層材料、これら材料のナノ粒子化技術、等
	ペタbpsiストレージ技術	円偏光照射によるスピン注入、光誘起スピン、光照射スピン反転、ナノ分散構造体(コアシェル構造体、メタルフラーレン)メモリ、等
フェードインメモリ	フェードインメモリ	近接場光技術、スピクラスタ媒体技術、半導体インテグレーション技術を融合した、浮上型ヘッド等を必要としない固体メモリ
	スピン情報の書き込み	ハーフメタル材料による電界放射冷陰極アレイにより電流磁化反転
	スピン情報の読み出し	ナノ加工した近接場光変換素子を通して発生させた近接場光を伝搬し、記録担体のスピン配列情報を読み出す
	フェードイン読み出し	冗長度可変のアクセス機能を具備し、だんだん詳しく思い出す、より人間に近い情報認識技術
ホログラムメモリ	ペタbpsiストレージ技術	微細配向型材料、偏光多重記録、多値化信号処理技術、超高感度・超高速・多画素光受光器アレイ、高精度波長安定化レーザ光源、高速空間変調器、高精サーボ技術、等
超多層記録	多次元記録	多光子過程を利用した光記録・再生技術、フォトクロミック材料+波長選択や電気クロミック+電圧制御など層選択方式多層構造技術、等により記録・再生軸を3次元、4次元に拡張
	超多層記録用光源開発	コンパクトなフェムト秒レーザの開発、例えばファイバーレーザ
	超多層記録用システム技術	光源の高速変調技術、媒体内でレーザ光の3次元走査アクセス技術、等
	自己組織化稠密3次元構造	3次元の自己組織化法で超多層媒体を作成する。例えば化学的合成法でナノメートルサイズの空孔を3次元に規則的に配列し、この中に記録・再生用機能分子あるいは原子を挿入する
	3次元再構成法	光軸方向への走査と、類似パターン認識技術の組み合わせで、記録された3次元データを再構築する技術
単一分子光メモリ	単一分子光メモリ	フォトンモード方式の有機分子一つ一つに記録するメモリ、蛍光検出等でデータを再生する

資料編

- ・ P B 級ストレージ実現に向けた有識者アンケート調査
- ・ 1 9 9 8 年 ~ 2 0 0 5 年までのストレージ分野の開発動向
- ・ 現要素技術における技術トピックス

**・ P B 級ストレージ実現に向けた
有識者アンケート調査**

- 1 . アンケート御協力者（敬称略）

（1）情報記録テクノロジーロードマップ策定専門委員会委員

（委員長）大津	元一	東京大学	
	池澤	直樹	株式会社 野村総合研究所
	伊藤	彰義	日本大学
	入江	正浩	九州大学
	太田	憲雄	日立マクセル株式会社
	川田	善正	静岡大学
	杉浦	聡	パイオニア株式会社
	高橋	明	シャープ株式会社
	高橋	研	東北大学
	土屋	洋一	三洋電機株式会社
	都築	浩一	株式会社 日立製作所
	徳丸	春樹	日本放送協会
	虎沢	研示	名古屋工業大学
	内藤	勝之	株式会社 東芝
	中島	邦雄	セイコーインスツル株式会社
	波多野	洋	コニカミノルタオプト株式会社
	原田	衛	日経BP社
	藤村	格	株式会社 リコー
	前田	修一	株式会社 三菱化学科学技術研究センター
	山本	学	東京理科大学
	渡部	昭憲	エヌ・ティ・ティ・アフティ株式会社

（2）ホログラムメモリ調査研究委員

（委員長）山本	学	東京理科大学	
	安藤	敏男	日本ビクター株式会社
	今津	龍也	日立マクセル株式会社
	折戸	文夫	三菱化学株式会社
	笠井	一郎	コニカミノルタテクノロジーセンター株式会社
	笠済	研一	松下電器産業株式会社
	河野	克典	富士ゼロックス株式会社

小嶋	隆	株式会社 三菱化学科学技術研究センター
桜井	宏巳	旭硝子株式会社
杉浦	聡	パイオニア株式会社
田中	覚	パイオニア株式会社
手塚	耕一	株式会社 富士通研究所
寺崎	均	三洋電機株式会社
中村	滋	三洋電機株式会社
中村	孝	ローム株式会社
波多野	洋	コニカミノルタオプト株式会社
藤森	敬和	ローム株式会社
松井	乃里恵	富士ゼロックス株式会社
山本	和久	松下電器産業株式会社
吉川	浩寧	株式会社 富士通研究所
吉沢	勝美	パイオニアマイクロテクノロジー株式会社
吉成	次郎	T D K 株式会社

(3) 多層テラバイト光メモリ研究会委員

(委員長)	河田	聡	大阪大学
	飯田	哲哉	パイオニア株式会社
	今中	良一	大阪大学
	今村	悟	株式会社 三菱化学科学技術研究センター
	入江	正浩	九州大学
	川田	善正	静岡大学
	小嶋	隆	株式会社 三菱化学科学技術研究センター
	塩野	照弘	松下電器産業株式会社
	田中	伸一	松下電器産業株式会社
	田中	拓男	独立行政法人 理化学研究所
	辻岡	強	大阪教育大学
	樋口	隆信	パイオニア株式会社
	前田	修一	株式会社 三菱化学科学技術研究センター
	松山	剛	パルステック工業株式会社
	三樹	剛	株式会社 リコー
	三澤	成嘉	株式会社 リコー
	山田	昇	松下電器産業株式会社

横森	清	株式会社 リコー
吉田	睦	アイシン精機株式会社

(4) 大容量光ストレージ推進機構研究企画調整会議委員

(委員長)	大津	元一	東京大学
	小澤	靖之	株式会社 富士通研究所
	杉浦	聡	パイオニア株式会社
	高橋	淳一	株式会社 リコー
	内藤	勝之	株式会社 東芝
	中島	邦雄	セイコーインスツル株式会社
	中田	俊彦	株式会社 日立製作所
	西田	哲也	株式会社 日立製作所
	長谷川	信也	株式会社 富士通研究所
	波多野	洋	コニカミノルタオプト株式会社
	矢野	亮	日立マクセル株式会社
	横森	清	株式会社 リコー

(5) 次世代光メモリ関係者

内山	隆	株式会社 富士通研究所
金子	正彦	ソニー株式会社
太田	憲雄	日立マクセル株式会社
助田	裕史	株式会社 日立製作所
鷲見	聡	三洋電機株式会社
高橋	宏雄	横浜国立大学
田畑	文夫	富士通テン株式会社
三輪	靖	三菱化学株式会社
八木	生剛	日本電信電話株式会社
山岸	互	株式会社 富士通研究所
山下	経	株式会社 日立製作所

- 2 . アンケート回収票 (原紙)

有識者から回答いただいた原票を以下添付する。Pb級ストレージ実現にむけました技術開発への取り組みに関するアンケート回答

(1) Pb級ストレージを実現する技術シナリオ

Pb級ストレージを実現する技術は何でしょうか。お考えをお書きください。

Pb級ストレージとして、2次元媒体、3次元媒体両方の技術が考えられます。

2次元媒体として、記録密度1Pbpsiから1bitマークの寸法を見積もると、約0.8nm四方マークとなります。これは、原子10個分程度の大きさです。即ち、原子操作が必要な技術となります。

具体的には、STM原子操作等を用いた原子のビルドアップ技術が要求されるものと考えられます。

この技術を構築するにあたって、原子分子レベルでの現象解明を併行して進める必要があります。

3次元媒体としては、3次元多層媒体、ホログラフィックメモリ媒体の将来技術が考えられます。

3次元多層媒体で、例えば、1000層積層を考えると、1bitマーク寸法は、約20nm四方となります。これを、光で記録しようとする、光の回折限界/NAより、 $\sim 10\text{nm}$ 程度のX線レーザー光源を用いる必要があります。X線レーザーによる2光子吸収記録のできる材料開発が要求されます。

ホログラフィックメモリでは、現在の目標値1TBの1000倍に容量アップする手段として、以下の方策が考えられます。

回折光の品質を上げ、再生に必要な回折効率を1/100にする(回折効率0.1%
0.001%)

媒体の屈折率変調度を10倍上げる(M#30 300)

媒体を10倍厚くする(1mm 1cm)

多重化を1000倍にする(1000多重 100,000多重)

この4つを同時に達成することで、原理上、1PBの容量が得られると考えられます。

ロードマップ的には、

～2020年は、3次元メモリで大容量化の極限を目指し、併行して、原子分子レベルでの現象解明等基礎研究を進めた上で～2030年に、新たな原理等を加えた、原子分子レベルでの記録に基づくPb級大容量メモリが実現されるものと考えます。

2次元記録で 1Pb/in² を実現するためには、1ビットの占有面積は 1nm² 以下となり、これは、原子数個分に相当する。

一方、3次元記録として例えばホログラムメモリを考えても、Pb級とするためには飛躍的に記録密度を向上させる必要があり、そのために短波長化が必要である。

よって、Pb級ストレージを実現するには以下の技術が必要と考える。

- ・分子、原子単位のメモリ
- ・X線、電子線によるホログラムメモリ

光技術の応用の枠組みで Pb級のストレージを現行の光ディスクサイズ(直径 120mm)で実現するためには、1Pbits/inch² 以上の超高記録密度が不可欠である。現時点でこれを実現し得る代表的な方法としては、単一分子光メモリが考えられる。具体的な記録材料としては、九州大学の入江正浩教授を中心とするグループが進めている、フォトクロミック単分子の光異性化に伴う分子構造の変化を利用したメモリ方式などで、光反応によりフォトクロミック材料として代表的なジアリアルエテン分子の開環体 閉環体の構造変化に伴う蛍光性の発現により検出するものである。分子単位でビット情報を記録再生できるとすれば、原理的には 1Pbits/inch² 以上の記録が可能となり、光ディスクサイズであれば数 PB/disc の記録容量が実現し得る。また、さらに高密度化を進める上では、蛍光検出の高感度化を実現することにより多値記録や多層記録の組み合わせも考えられる。

容量

媒体の記録解像度(単位体積における情報量)向上

材料開発?

例: 究極には単原子のスピンを利用した記録など

速度

望ましくは直接高速で Read/Write

Pbストレージが低速な場合にはそれを補うバッファ技術

例: 高速 HDD によるキャッシュシステムなど

- ・究極の容量という観点では基本的に分子, 原子の話になると思います.

単純計算で、1 Tbps では 1 ビットあたり 25.4nm² であるのに対して、
1 Pbps では 0.8nm² となる。

まず、ディスク状の記録方式（光ディスク、HDD）について。

単層記録のこれを実現しようとする、記録媒体やヘッド技術もさることながら、位置決め技術のブレークスルーが必要だと思われます。

ボリューム的な記録だと、この辺りは少し緩和されるかと思えます。

ホログラム記録の記録密度は多重度によるところが大きいと思いますので、どこまでいけるのか私には良くわかりません。

多層記録は単純に 1 Tbps を 1000 層積むと 1 Pbps となりますが、レイヤーを選択できるような仕組みがキーとなるかも知れません。

固体型の記録方式について。

半導体プロセスの進展を考えても、単層では不可能であると思われるので、多層の方が近いように思われます。MRAM、FRAM、PRAM などのセルサイズを縮小できて、かつ多層に作製できるのなら、実現できるかもしれません。ただしコストが現実的でないように思われます。

ヘッドと記録セルとの関係で言うと、前者が 1 : テラ、後者が 1 : 1、ですが、その間の 1 : メガ？、すなわち複数のヘッドがある容量を受け持つものがでてくるのではないのでしょうか。これで可動部分の無いような固体型メモリなら、少しは現実的かも知れません（IBM の Race Track などはこの発想か）。

磁気ディスク。既に Tb は達成されている。高密度化(ハイブリッド記録、垂直磁気記録、パターンメディア)と枚数を増やすことであと 3 桁増やす。ディスクアレイでは既の実現されている。

ホログラム技術。現状で Tb は可能、Pb はさらなる高密度化(ブレークスルー)が必要。量子メモリ(?)。おおざっぱに、青色ディスク(BD, HD-DVD)が 100Gb 程度で 1bit が 100nm くらいなので、(面記録で)記録容量を 4 桁上げるためには 1bit の寸法が 1nm 程度になる。だいたい原子の大きさに 1bit を記録することになる。

ホログラフィックストレージ+何か?と考えます。

ホログラフィックストレージで 10 テラバイトまで実現し、

それに多値記録、2) 偏光記録、などでもう 2 桁容量を増やします。

あるいは、フォトケミカルホールバーニングとの組み合わせで、材料のスペクトルも利用した記録を実現します。

1Pbpsは1 bitあたりが占有する面積に換算すると64.5 となり、H原子1個あたりの断面積4.5 (半径1.2)の14倍程度となります。これは記録面が単層の場合ですが、積層数が増えればそれに応じて1 bitあたりの占有面積を大きくできます。このようにビット記録では物質の構成要素の限界にきており、分子レベルを操作する技術が必要と考えます。そして、転送速度という観点からすると、このような分子レベル操作を一個一個シリアルではなく、数万個、並列処理できるような仕組みを持つことが望まれると思われま

一方、ビット記録でない方法、例えばそれがホログラム記録なのでしょうが、やはり光の回折限界を超えることができないため、分子レベルのビット記録に迫るためには、短波長の電磁波領域の使用を視野にいれた研究が必要と考えます。

現在進められているテラビット級の情報ストレージ技術である近接場記録，多層3次元記録，ホログラフィック多重記録はサブペタビット級のストレージ技術として今後さらに進化していくことが予想される。

それを越えるペタビット級のストレージ技術としては，走査型プローブ技術を用い分子・原子一個に情報を蓄える分子，原子メモリとなることが予想される。

1) ホログラムメモリの大容量化

ホールバーニングなど、さらに多重化の軸を増やすことで、初期のホログラムメモリ(Tb級)の容量を一桁以上向上させる。

2) 新たな記録原理に基づくメモリ

分子メモリ、原子メモリ、DNAメモリ、分極反転メモリなど

3) Pb級メモリにおいては転送レートに加えてアクセスタイムも革新的な進歩が必要であり、アソシアティブメモリを組み合わせるなど、新規なアドレッシング手法の開発が必要。

ロードマップ

2010	Tb		ホログラムメモリ
2020	10Tb	新メモリ(?)	ホログラムメモリ
2030	100Tb	新メモリ(?)	ホログラムメモリ(?)
2040	Pb	新メモリ(?)	ホログラムメモリ(?)

直径 120 mm の DVD-ROM ディスクでは、最短マーク長が $0.4 \mu\text{m}$ 、トラックピッチが $7.4 \mu\text{m}$ で、容量 4.7GB / 面です。大雑把に言えば、 $1 \mu\text{m} \times 1 \mu\text{m}$ の面積に 1 b で面密度 $1 \text{Gb} / \text{inch}^2$ 程度になります。

$1 \text{Gb} / \text{inch}^2$ 級の面密度を達成するために 1 b が占める面積は、 $1 \text{nm} \times 1 \text{nm}$ 程度です。

一方、光スポットの大きさは基本的には波長オーダー (μm 程度) ですから、近接場等の技術を用いても nm 程度への微小化は困難と考えられます。

よって、記録面積または体積に多重化する技術が必須と考えます。

特に、光特有の多重化技術として、波長多重が有効と考えます。

次項に述べますが、

- ・ ビット記録方式では「PHB + ファイバースプロブ型の近接場」
- ・ ホログラム記録方式では「ポリウムホログラム + 波長多重」が有効と考えます。

・ 2次元 (平面) 記録の場合、記録ピットサイズを nm サイズまで小さくする必要である。

そのため、原子・分子単位の操作が必要と思う。例えば、STM を利用して原子の有無による記録、色素分子によるホールバーニング、電子スピンの利用など。ただし、集積した場合、協同現象の解析が重要。

・ また、記録媒体に対して情報の入出力方法の検討が必要。実験室レベルで現象が確認されているものも、集積 (特に 3次元) した場合の入出力方法が課題。

- ・ さらに、オングストローム ~ サブオングストローム級 (記録ピットサイズの 10分の1) の超高精度の位置決め技術が必要となると思う。(特に非接触の場合)
- ・ 容量が大きくなればなるほど、データ記録速度、再生速度 (データアクセス速度、データ転送速度、復号化情報処理速度) の高速化が重要。

1) 現状の延長上: リムーバル媒体としては、3次元媒体 + (多重・多値) 技術の組み合わせで実現

2) 分子メモリ (フォトクロなど、入江先生のご提案など): 材料としては知られており、基本的に変化量から容量は達成すると思われるが、実現するには新規な記録再生技術の開発がキーとなる。

3) 新原理、新メモリ現象の出現・発見

1. 分子メモリ
 - (単一) スピンメモリ
 - (単一) 分極メモリ (強誘電体結晶)
 - バイオメモリ (DNAをメモリとして使う)
 - (単一) 電子メモリ
 - 量子ドットメモリ
2. 量子メモリ
 - 単一磁束量子メモリ
 - 量子重ね合わせ (Entanglement) を用いた量子メモリ - キュービット
3. PHB
 - 波長多重分子メモリ (一ドットあたり 1000 波長多重)

・ 超多層記録 (40 層) × 1000 倍の多値化
多値化に関しては、京大の平尾先生のグループが、サマリウムドープガラスで 100 倍程度の波長多重化 (ホールバーニング) の発表があるので、それに偏光多重などの技術でさらに 10 倍頑張り、トータルで、1TB の光ディスクが、記録密度 1000 倍を達成し、トータルで 1PB を実現する

面記録で実現しようとするれば、例えば $P_b = 10^{15} \text{bits/cm}^2$ なら単純計算でおおよそ 1bit = 1 分子レベルの記録密度になる。このような記録密度を実現する分子材料自体としてはフォトクロミック分子などが存在するが、分子を規則正しく配列した媒体を作る技術やその分子に適切な転送速度でアクセス (記録・再生) する技術は現状ではまったく見通しが無い。

体積記録でならかなり記録密度に関して余裕ができるが、それでもそのような情報にアクセスする技術が既存の記録技術からは見当たらない。

つまり P_b 級のストレージがもし将来存在するとすれば、既存の光技術・磁気記録・半導体記録のどの技術の延長線上にも無く、根本的な技術革新が必要になるであろう。その際の技術のキーワードとしては、記録材料技術に関しては「分子記録」、揺らぎ = ノイズ対策として「量子状態制御」、そしてアクセス技術は「？」となる。「？」の技術見通しを得ることが最大の課題である。

多層メモリなら、ペタバイトに近いところまでは実現できると思います。例えば、400 nm の波長で 2 光子記録を行えば、1 層あたり BD の 4 倍で 100 GB になり、1000 層記録すれば 0.1 ペタになります。層間隔を 2 ミクロンにすれば、全体で 2 mm になります。再生に紫外光が必要になりますので、紫外線を透過するポリマー材料が必要になります。

量子ドットと STM の組合せ？

- (1) 1 テラのメモリの考察当時は近接場光技術の概念について実施側、施策側に理解して貰うのが大変だった。今回の 1 ペタも新概念を使うことになるので、十分な理解を深める事が必要。また、ニーズはあるのか？ 1 ペタの高密度性を利用して、従来のディスクメモリとは違う応用（モバイル機器、通信など）も模索すべき。
- (2) 従来の技術ロードマップ（1メガ 1ギガ、1ギガ 1テラ）と同様の外挿的考え方で「1ペタを目指す」として良いか検討必要。
- (3) 単純に考えると1ペタのピット径は約 0.7nm。これを実現するには新概念が必要。安直には「STM を使えばよい」という回答がでてくる可能性があるが、「読み出し」「速度」などのシステムの観点から考えるとこれは無理。あまり一般ののナノテクノロジーの動向に振り回されず、独自の考え方をすべき。
- (4) 実は 1 ペタは近接場光で可能と考えている。それは次の 2 つの方法による。
まず、10 テラ（ピット径 8nm）～100 テラ程度（ピット径 2.5nm）までなら 1 テラの延長技術で可能。
その後 1 ペタに達するには、
1. 近接場光と物質との相互作用に固有の「階層性」を使う。
すなわち、ディスクとヘッドとの距離に依存した「多層メモリ」が一層のディスクで実現しうる。
（特許申請中、Naruse, Ohtsu, ---, 本年 7 月ハワイ開催の ODS で発表予定。これは現在の大容量光メモリ P j の枠組みの外の仕事です。）
 2. ナノフォトニック・デバイスによる半導体メモリ型のメモリ（すなわちスライダなどの可動部の無いメモリ）と組み合わせる。

新しい物理的原理に基づくブレークスルーが必要。たとえば、スピントロニクスを応用した三次元高密度ストレージ。原子レベルでのマニピュレーションなどの SPM 応用ストレージ。1 分子 = 1 bit あるいは 1 分子 = 2 ビット以上の分子ストレージなど。光を応用して上記のストレージ手段を実現するためには、媒体の開発もさることながら、如何にしてシステムを作るかを考慮する必要があると思われる。特に入出力系や信号処理系など。Pb 級ストレージが実現するとされる 2020 年ごろまでは、まだストレージデバイスへのデータ転送手段は、光リンクではなく、電子データに変換された形をとると思われる。よって、これらのシステムの要求と如何にして整合性を取るかも検討課題となると考えられる。

光学ヘッド集積化や高密度媒体製造のためのプロセス技術全般が重要で、プロセス製造装置事態の開発から始める必要があると思う。

1 Pbps級相当の記録密度であれば、記録サイズは均等とすると、8 nmであり、原子レベルである。現状では、原子レベルのものを見る顕微鏡としては、TEM(透過型電子顕微鏡)、AFM(原子間力顕微鏡)などがあるが、このような原子レベルの観察技術が、1pb級のストレージに応用できるかもしれない。また、このような観察技術で、より簡素で、高感度であり、低価格なものが出てくれば、実現への可能性が出てくるかもしれない。

現状で存在している技術では、たとえば、TEMを、ストレージに応用する例では、ストレージでは、当然ながら、真空チャンバなどは用いることが出来ないのので、FED(Field emission display)で使われるマイクロ電子銃の様に、マイクロマシンを含めた微細加工技術を併用することで実現が可能となるかも知れない。いずれにしても観察技術と作製技術でストレージに適合したものにする必要があるが、可動部はないものになるだろう。

一方、記録密度を、面だけでなく、奥行きを含めた3次元的に向上するのは、各面の読み取りでの分離、アクセスなどで課題は多いと思うが、半導体メモリの技術が使えるかもしれない。

媒体においては、原子レベルで均一な成膜技術など、多くの高精度技術が要求されると思う。

光を用いた記録、読み取りであれば、光と電子の相互作用を利用することになるように思われる。

記録方法は、形状変化、相変化、スピン状態などが考えられるが、原子レベルであれば、スピン状態(上向き、下向き)を記録、読み取りするのが自然なように思われるが、複数の状態を記録、再生できる材料、原理があれば(たとえば、波長に応じて記録するものなど)、多値記録が可能で、これであれば記録サイズも多少緩和でき、実現性も高くなる可能性もあると思われる。

(1) 記録密度の克服技術について光読出しをキーに要素技術を抽出し、原理限界を想定

ビット・バイ・ビット記録

読出しを直接光で行うもの・・・「光源の短波長化」、「染出光プローブ微小化」

波長 紫外 200nm、プローブ縮尺比率 1/10 10nm/ビット

0.01Pbpsi

波長 高次高調波軟 X 線 2nm、低収差 X 線集光系 0.5Pbpsi

読出しを間接的に光で行うもの・・・「磁気作用による光変化(磁気転写・拡大光読出)」

磁気記録の限界密度 1Tbpsi、光プローブ効果 1/5 0.005Pbpsi

・・・「電子、電界作用による光変化?」 電子、電界の作用

サイズ 5nm 0.1Pbpsi

多重記録

位相キャリアを使うもの・・・「ホログラム多位相(含波長)記録」

ドメインサイズ 1 μ m、多重度 10^3 、0.001Pbpsi

色を使うもの・・・「フォトケミカルバーニング」

ドメインサイズ 1 μ m、多重度 10^4 、0.01Pbpsi

(2) 記録と再生機能について

P バイトデータを記録する用途は、コンシューマ領域では少ない?

P バイトデータは再生してもっぱら「使う」事が多いと想定(記録・管理の手間が大変)

(3) 生産技術、装置化技術について

将来の進歩性を考慮すると、「軟 X 線光源・光学系」と「電子、電界作用による光変化プロ ーブ」が有望

「X 線」は線源技術に依存し、生産・装置化の実用化の道程は長い

「電子、電界作用」は現在の半導体・表示素子技術の活用が期待でき、現実的

ハードディスク、光ディスク、半導体等のビット or ピットでデータを記録する方式で、PB級のストレージを実現するためには、

- 1.記録ビット(or 記録ピット)をどこまでも小さくしてゆくこと。
- 2.記録を多重化多層化する(ビットを大きいままで、多重 or 多層記録する)のいずれか(或いは、両方の併用)しか方法がない。

しかし、記録ピットを小さくしてゆくことは早晩、物理限界に突き当たる。実験室レベルで原理検証が出来ても、信頼性が要求される市場製品にはならない。ハードディスクではそろそろ限界が来るだろうし、光ディスクでは、青色レーザーの後継技術が無い。

ペタバイトストレージの最も現実的な解は、現在の大容量ストレージをたくさん並べて、容量を拡大してゆく方法であるが、消費電力、設定スペース、データ管理、信頼性の面で、運営が難しくなる。(しかし、現実には、ペタバイト級のストレージを必要とする業務は限られるので、管理が出来れば、たくさん使う方法でも問題はない)

しかし、国家プロジェクトへの新施術提案ということを考え、限られた空間体積でペタバイト級の容量を実現する技術という意味では、やはり、多層記録、多重記録が最も現実的と考えられる。この意味では、ハードディスクでは、原理的に実現が難しく、光や熱を使う等の記録技術が候補になると思われる。

以前に 2030 年には 1Pb/in² との予測もあったが、そのときの予測と現状とを見比べてみると実現は予測よりかなり遅れているように思える。2010 年に 1Tb/in² が達成されるとして 2005 年には少なくとも 400 ないし 500Gb/in² が実現されているとの予測であるが、現状は 200Gb/in² である。

この傾向は短期の微分係数であるからそれだけからずっと将来を予測するのは難しいが、これをみても 2030 年の 1Pb/in² の実現は少なくとも 10 年は将来へずれる傾向にあると思われる。

Pb/in² を目標とすると考えてみる。

単純には、

A) 1 ビット当たり占有面積 0.8nm x 0.8 nm すなわち原子 数個 x 数個

磁性体では強磁性を示す大きさとはならない。

B) 3 次元化あるいは多値化を考えると 2.5nm x 2.5 nm x 10 層あるいは 10 値

上記のように考えてその方法論を考えると

1) X 線を利用 (波長は 0.1nm オーダー)

シンクロトロン放射を利用すれば、左右の円偏光が発生できるのでこれにより局所的な磁性材料の磁化の向きは検出できる。X 線の透過率は高いので多層化も期待できるとすれば上記 B) が可能かもしれない

2) 一挙に電子線への移行が考えられるが、電子線ではシステムの変更は上記の X 線よりさらに大きい。電子線では真空が必要、透過率は低い = 3 次元化は容易ではない、などの欠点

一方、AFM や STM に見られる原子レベルの大きさでの測定、原子操作 SPM (scanning probe microscopy) の応用が考えられる。SPM 技術の記録への応用は、”スピン偏極走査トンネル顕微鏡”の利用である。強磁性探針と試料の磁化の方向が平行な場合にはトンネル電流が大きく、反平行な場合小さくなる原理を利用する。これだけでは”光”の利用は無い。スピン偏極トンネル現象は光励起および発光現象を伴いこれを用いた再生も考えられる。記録は探針からの電流による加熱が考えられるが、さらに進んで探針からのスピン注入により記録できれば面白い。この方法は原理的には原子 1 個分の分解能を持つが、現実的には記録がより安定になるよう体積を増す必要がある。

(2) 既存技術の延長による大容量化の可能性

光系ストレージ分野では 2010 年ごろに実現が見込まれる技術として、近接場光、3次元多層、ホログラム利用等による 1 Tb 超ストレージがあります。これらのストレージ技術の実現におきましては、ナノ加工技術の一層の発展や新規機能材料の開発等に依存するところ大であります。Pb 級のさらなる大容量化がこれらの既存技術の発展により可能だとしたら、どのような技術課題とその解決法があると御考えでしょうか？記録方式、光学系、精密加工技術、材料等ご関心のある要素技術分野でご回答ください。

3次元多層

記録光の短波長化、具体的には、X線レーザー光の使用と、X線レーザー光で2光子吸収記録の出来る材料開発

ホログラフィックメモリ

再生に必要な回折光量の低減

レーザーの高パワー化、レーザー光の高品質化（ノイズ低減）、高品質光学系設計（ノイズ低減）

ディテクタの高感度化

媒体材料の屈折率変調度アップ

高屈折率変調材料開発技術

記録層の膜厚アップ

高透過率、低散乱性材料、媒体化開発技術

多重度アップ

超高多重に対応した、多重方式の検討（例えば、角度多重、シフト多重、位相コード多重の併用）

新規変調コードの検討

但し、ホログラフィックメモリの記録密度の理論限界は、 $\sim \sqrt{3}$ と見積もられる。1 mm厚のディスクでは、短波長レーザーを使っても 1 P b p s i が限界で、他の現象の組合せを考慮する必要がある。

例えば、多値、偏光、スペクトル等

・分子、原子1個1個をコントロール・検出する技術

・X線、電子線制御技術

など

小型大容量化のためには体積を効率よく利用する必要があり、多層化が必要になってくると考えます。

課題はミクロンオーダの層選択，解決法は2光子吸収など？

単一分子に情報のフォトン記録を行う上で、より高度化された近接場光記録技術を利用できると考えられる。また、材料としてはナノ材料技術、ナノレベルの加工技術が不可欠である。

さらに、単一分子系の記録再生については、光ヘッドと信号処理が非常に重要になることが予想される。これは、ビームスポットを極限まで絞り込み、高精度に光ヘッドを制御して記録エリアに所定の情報を光記録するとともに、非常に微弱な蛍光を検出して高い SNR で信号処理を行い、高速再生することが求められる。

ホログラム方式での更なる高密度化については、シフト多重記録と位相相関多重の組み合わせが考えられる。多重度の向上には材料の高い記録性能と、均質かつ平坦性のきわめて良好な膜質であり、低散乱の厚膜記録層の形成が不可欠である。

1でも述べましたとおり、回転系の媒体では位置決め技術が重要ではないでしょうか。記録方式については、光のみ、磁気のみ、というのではなく、これらやほかのものと組み合わせようやく実現できるようなものである気がいたします。

固体型では作製方法、コストがネックで、同じく1で述べたヘッドと記録セルの関係をどう実現していくかがキーかも知れません。

ホログラムメモリ

(1)メディアの M#を大きくする。(2)SLM, 撮像素子の高画素化。(3)多重方式の複合化(角度多重+シフト多重+波長多重など)。などで現状(1Tb として)の 1000 倍の容量にする。

3次元多層

面密度を 100 倍(1bit を 10nm で記録)にして 100 層記録。または面密度 10 倍で 1000 層記録。面密度を現行以上にどうやって上げるか、多層メディアをどうやって構成するか(100 層以上になると積層は非現実的、バルク材料だと制御方法が問題)、などが課題か？

近接場

面密度だけで Pb まで持って行くには 4桁 up が必要。近接場だけでは難しそう。単一フォトンの偏光状態で記録する(?)などの手段が必要。よく分かりませんが、単一フォトンの発生デバイスや、偏光状態と原子のイオン状態との変換デバイス、記録媒体などをナノ加工技術で作ることになるでしょうか。

フォトケミカルホールバーニングによる高密度化を実現するためには、材料技術です。

近接場光 → 単層記録ではもはや Pb 級記録密度は実現できないため、多層化の方式が必要。ただし、多層化は近接場の概念とは相反する部分があるため、ディスクを薄膜化等して、体積あたりのディスク枚数を増やし、体積あたりの容量を増大させる等のシステム的な工夫が必要になるかもしれません。

3次元多層 → 3次元的な記録ではあるが、1ビットあたりが占有する体積が大きいいため、これを小さくすること必要

ホログラム → 新たな多重記録方式の創出

上記方式では、とにかく記録材料の進展が不可欠だと思います。しかしながら、光技術では回折限界の打破と3次元記録は相容れないものであるため、Pb 級の容量を実現しうる新原理の創出が必要と考えます。

ホログラムメモリによりペタビット級の容量をめざすための技術課題として以下の点が考えられる。

- (1) ホログラムメモリの記録密度は材料性能が十分と仮定すると(波長)⁻³に比例する。従って現在の青色レーザーによって10テラビット級の容量拡大を見込むと、さらに波長を1/2にすることによって一桁の容量アップが図れる可能性がある。
- (2) 記録材料の膜厚にほぼ比例して容量が増大すると仮定すると、現状の1mm厚でテラビット級が実現できることから、さらなる容量拡大には厚膜化が求められる。
- (3) 多重記録方式として現在角度多重方式あるいはスペckル多重、シフト多重方式などが検討されている。これらの記録方式の組み合わせでさらなる容量アップが図れる。基本的には媒体のダイナミックレンジが十分であればペタビット級のメモリを実現する大容量化の方策は存在する。

以上示したように、ホログラムメモリで記録方式、レーザー波長、媒体の技術課題を克服していけばペタビット級のメモリは実現可能と考える。

ホログラム記録に依拠したメモリにて Pb 級を視野に入れるための大容量化のポイントは、波長多重 / ホールバーニング / 偏光多重など、多重化の軸を増やして大容量化を図ることが必須であり、特に材料開発が優先されるでしょう。

他にドライブの要素技術として、

高出力光源

レンズ加工技術

2次元受光、変調デバイス

等が上げられますが、これらは、既存のTB級のホログラムメモリの要素技術開発の延長線上で考えれば良いと思います。

1 Tb を目指す光ストレージ技術を、下表にまとめました。

これらの技術の中で、飛躍的な密度向上が期待できるが実用化開発は未着手の技術として、PHB (photochemical hole burning) があります。

PHB 実用化の主要技術課題は、室温動作媒体、波長可変レーザー、などです。

複数技術の重ね技で高密度化を目指すには、技術課題の分散が重要と思われます。

PHB と、Super-LENS / 磁気超解像 / エレクトロクロミック / 2光子吸収、等の組み合わせは、媒体開発に負担が多すぎると考えられます。

よって、ビット記録方式では、PHB + ファイバーストック型の近接場が、最良と考えられます。

また、ボリュームホログラムは再生波長変化に敏感なので、この性質を使えば、これまでの角度多重や空間多重、等に加えて波長多重も可能と思われます。この場合、波長感度帯域が広いホログラム媒体の開発が必要です。

光メモリの高密度化技術

【これまでの高密度化の流れ】

	容量/面 (120mmdisc)	波長:λ (μm)	開口数 NA	φ=λ/NA (μm)	最短マーク長 Pmin(μm)	Pmin/φ (%)	トラックピッチ TR(μm)	TR/φ (%)
CD-ROM	640MB	0.780	0.47	1.660	0.833	50.2	1.60	96.4
DVD-ROM	4.7GB	0.650	0.60	1.083	0.400	36.9	0.74	68.3
Blue-Ray	25GB	0.405	0.85	0.476	0.149	31.3	0.32	67.2

2003.11.19
2003.07.16
2004.09.02
by Shigeru Nakamura

⇒ 高密度化の基本である短波長/高NAによるスポット微小化も、Blue-Rayで限界である。

【今後の高密度化技術】

分類	名称	原理	高密度化の程度(予想)	制限	課題	備考(発表, 研究機関, 等)
微小 スポット 形成	高NA化 +近接場	SIL	NA=n*sinθにおいて 屈折率をn>1として スポット径をλ/nに微小化	高屈折率限界:1.8~2.0 面密度最大で約3倍化	記録膜露出 多層化は 不可能	・スライダキャップ制御 (0.05~0.15μm) ・記録時のSIL底面汚染 ・ノンレーザ方式が未だ、他
	近接場	ファイバーストック Super-RENS	光スポットの開口を機械的 に制限して近接場光で 記録再生。SNOM応用 媒体構造でスポット開口制限 ・Si膜;吸収飽和透過開口 ・AgOx膜;飽和光散乱開口 交換結合により露出し層の 微小領域へマーク転写	実用分解能50nm程度 120mmdiscで500GB? 面密度を4~8倍化	記録膜露出 多層化は 不可能 媒体開発 に依存	・φ0.06μmマーク記録再生 (Science251,1468(1991)) ・波長依存性が少ない ・λ=635nm/NA=0.6で150~200nm マークを再生。(ISOM2002, TDK等) ・TDK, ハイニテック, シャープ, ITRI
微小 マーク 再生	磁気超解像 (MSR)	露出し層に転写された マークを拡大	面密度を2~3倍化	MO媒体 に限定	・ビーム利用効率が低く 信号小さい	・磁区拡大に移行
	磁区拡大 (MAMMOS) (DWDD)		面密度を~5倍化	MO媒体 に限定	・媒体構成が複雑で高価	・MORIS2000での発表 赤色/NA0.6で25GB(キャン松下) 青色/NA0.95で160GB予想(マセラ)
多重化	面内	多値記録	マーク形状(幅)を変えて 複数スタイル化	面密度を1.5~2倍化		・S/N向上 (2スタイルレベルが現実的)
	厚み方向	PHB	記録膜が光照射によりその 狭い波長で吸収率減少 ・媒体記録層の積層 ・新方式:エレクトロクロミック積層 ・2光子吸収 非線形2光子吸収で記録 共焦点光学系で露出し (層ピッチ約2μm, ボンジョン)	面密度;原理的には1000倍 面密度;2~3倍化程度 面密度;50倍化程度 (層ピッチ約2μm, ボンジョン)	現状 低温動作	・室温化(現状低温で休止) ・波長可変光源 ・球面収差除去 ・層間カスレークの低減 ・エレクトロクロミック積層機構 ・媒体開発(複製, 構造) ・p~fパルスレーザー
光干渉 記録	体積 ホログラム	角度多重 シフト多重 Polytopic	記録光と参照光の干渉縞 を体積記録。参照光照射で もとの記録パターンを再生	200~1000GB/120mmdisc の見込み	当面は 追記型	・光源波長統一制御 ・環境/振動安定性 ・光学メカ, 装置小型化
	薄型 ホログラム	ホログラフィック 光カード	積層型導波路ホログラム, 媒体の干渉縞は計算機 ホログラフ技術で作成	面密度;10~30MB/inch 2 5mm*20mm*100層で170MB テレシネ系+SDサイズで~1GB	当面は ROM型	・層アセス/振動安定性 ・装置小型薄型化

SIL:solid immersion lens
SNOM;scanning near-field optical microscope

Super-RENS;super-resolution near-field structure
MSR;magnetic super-resolution

MAMMOS;magnetically amplified MO system
DWDD;domain wall displacement detection
PHB;photochemical hole burning

⇒ 1000GB(1TB)を狙える単一技術は、ファイバーストック、PHB、体積ホログラム。現実的には体積ホログラムが実用化が一番近い。

最近発表の100層化新方式は、媒体への電圧印加方法が不明、実力も不明、今後の動向を注視。⇒スピンドルのボールベアリングで電圧印加(ISOM'03)

⇒ 上記以外で有力な技術は、Blue-Ray+(Super-RENS, 磁区拡大)の重ね技で、媒体開発に依存している。開発状況を注視。

1の質問に回答したように、3次元多層は、1PBを実現するには、現在の技術では層数が4万層と多すぎるので、1面あたりの記録密度を、1000倍に上げる多重化、多値化技術を開発し、組み合わせると実現できる可能性がでてくる。

記録方式:2光子吸収記録技術+波長多重化技術など

・ホログラムメモリ：

現在の多重方式に加え、波長多重、偏光を併用する。厚さを厚くするか、面積を広くする。

・近接場光、3次元多層：

2光子より高次の過程である多光子吸収を用いて、記録ピットサイズを小さくする。または、閾値を有する材料の開発により、光照射部分より小さい範囲で記録する。

アクセス方法も含めて光メモリ系の既存技術の延長では考えられない。

新しいコンセプトを持った技術が必要である。

このブレークスルー技術が何かは、現時点では明確ではない。今後、調査検討の必要がある

1) 力わざ、組み合わせ：TB級を達成できる3次元媒体（ホログラム材料や2光子材料）にて、多重・多値技術などの組み合わせで可能性を追求する。材料としては、知られているが、必要な要素技術は、「媒体作成プロセス」と「高いS/N値を引き出す記録再生技術」である。特に、要素技術として開発が必要なのは、「記録・再生技術」とであると考える。

2) 分子メモリについては、フォトクロ材料など基本的な相変化材料は知られているが、要素技術として、「記録再生技術」など新規なアクセス方法や「光学系の開発」が必要と思います。分子のゆらぎの影響も考えられ、例えば分子クラスター（分子のかたまり）を読み取るような記録再生技術などの要素技術開発が必要と考える。

フェムト秒光源の短波長化

多層膜作製技術の開発

短波長光源

紫外線等価ポリマーの開発

精密加工技術

既存の方式では無理ではないでしょうか？

近接場は単層で1Tbpsiを実現するのに1ビット当たり20nmのピットを必要としています。1Ppsiとなると0.6nmになりますので、これにトラッキングしようとする、原子一個分の精度が必要で、これを軸受けなどで実現はできないでしょう。

3次元では100層で1TBを目指していますから、100000層になり、これも各層の透過率から無理。方式はまったく異なるものにしなければいけないのでは？

3次元多層とホログラム利用は提案のみに留まり1テラに達する実用技術はいまだ現れていない。従ってこれらの2つの方法では1ペタを目指すのは不可能である。

一方、前欄の(4)で記したように、近接場光ならば1ペタは可能と考えている。また、そのための提案と予備実験が既に行われている。それは次の2つの方法による。

1. 近接場光と物質との相互作用に固有の「階層性」を使う。

すなわち、ディスクとヘッドとの距離に依存した「多層メモリ」が一層のディスクで実現しうる。

(特許申請中、Naruse, Ohtsu, ---, 本年7月ハワイ開催のODSで発表予定)

2. ナノフォトニック・デバイスによる半導体メモリ型のメモリ(すなわちスライダなどの可動部の無いメモリ)と組み合わせる。

である。必要な技術は、ナノフォトニックデバイス、ナノ寸法光加工、そのための材料、である。

近接場光、3次元多層で、1Pbpsiは難しいと思われるが、記録密度ではなく、ストレージの容量が1Pbであれば、可能性はあるかもしれない。

たとえば、近接場光では、並列記録、並列再生などで可能性はあるかもしれない。その際、高密度なため、可動部は使えないかも知れないが、可動部なしのアクセスのための光学系などの開発など、実現の課題は相当多いと思われる。

また、3次元多層であれば、奥行き方向(膜厚方向)で多層化(層にする必要はない)していけばよいが、課題となる各層間のクロストークが解決できる必要がある。これと、今も課題である、材料感度が向上できれば、2光子吸収などの非線形記録で可能性が出てくるかも知れないが、これも実現の課題は相当多いと思う。

Tb級ストレージが装置レベルで実現することが前提であり、光学系の集積化が一つのポイントと思っている。1,でも述べたが、特にこれらを作るための製造技術や製造装置の開発が重要だろう。

記録膜が専門です。情報を磁化情報として記録する方式では、現在知られているどんな超高磁気異方性材料を用いても、記録密度は50Tbpsi程度が限界でしょう。しかし、非常に高いアスペクト比の柱状磁化ドットを形成できれば、Pb級に迫る記録密度の可能性も生まれてくると思います。あるいは低アスペクト比であれば、3次元化など方式をとるしかないと思います。

前節のとおりで

短波長光源 紫外、軟 X 線

安定な PHB・ホログラム材料、

など、「ないもの」ねだりの感があります。

近接場記録、EB 露光技術などの要素技術と、「電子、電界による光作用プローブ」などの新概念で、ナノサイズのプローブと高感度の光読出しを両立させるシナリオが必要と思います。ナノインプリントなど半導体・表示素子の製造技術との融合により、現実的な製造、装置化の道程を立てることが可能と考えます。

記録するビットを小さく or 多重化すれば、必然的に、S N比が小さくなり、それを補う技術がキーになる。デバイスや部品レベルで S N比を向上させる（例えば、加工精度を向上させる）ことも可能だが、ペタバイト級となると、それも限界がある。（ナノメートル以下の加工精度が実現出来たとしても、製品化した時のバラツキや使用時の環境変化により、信頼性のあるデータ記録にはならない可能性がある）

このため、S N比の低い信号でも、確実に読み書き出来る信号処理技術がキーになると思われる。現状では、プロセッサや半導体の速度向上やコストダウンがめざましく、複雑な信号処理でも、比較的安価に実現出来るようになってきた。

新しい信号処理を導入するためには、記録方法まで踏み込まないと効果が出ない可能性もあり、ストレージシステム全体で S N比の向上を実現出来る技術を開発すべきと思われる。

（では、現実にどんな技術が候補になるのかと言われれば、信号処理が専門でないため、よくわかりません。ただ、現実には、ストレージの信号処理は、LSIメーカーに左右されてしまっている面もあり、開発する余地はかなりあると思われます）

1) 1.で述べた X 線利用において、ホログラムの利用が考えられる。磁性体の磁気光学効果を利用するには X 線発生源をシンクロトロンにするか、X 線用の偏光素子が必要となるが、光強度のみの利用としホログラムを利用することを考えれば、現在の可視光におけるホログラム技術の延長として X 線ホログラム技術を捉えることが出来るのではないか。

2) 1.の 3) で述べたスピン偏極 SPM では、短針、そのキャリアーなど多くの光学系、精密加工技術が利用可能である。

1において、Pb級ストレージには、新しい物理スキームに基づくストレージ手段が必要と述べたが、一方で、上記のような直近の光ストレージ技術をマイグレートしたPb級ストレージが実現される可能性も十分にある。これらは、上記の製品レベルで開発中の近接場光、3次元多層、ホログラムの製品化への障害をまず克服することが必要と思う。たとえば、近接場光なら、HDI（ヘッド・ディスク・インターフェイス）起因の信頼性向上技術、安価な光学系、ホログラムなら長期保存が可能な媒体材料の開発である。これらの課題の解決のためには、ドライブメーカ、媒体メーカのみでの努力では不可能であり、広範囲の改良技術が必要になると考えられる。たとえば、近接場光記録なら、同じように5nm以下のヘッド浮上量を現在実現しているHDD（ハードディスク）技術が大いに参考になる。また、光学系については、NAを2.4程度に高めるダイヤモンドSIL（ソリッドイマージョンレンズ）がダイヤモンドメーカから提案されている。これら、従来の光ストレージ産業の枠にとらわれない広範なナレッジを取り込む形で1Tb級ストレージを実用化すれば、HDDの様に、長期にわたって年率50%以上の面記録密度向上のマイグレーションを描くことが可能と考えられる。

(3) 新原理等にもとづく革新的な技術開発による大容量化の可能性

半導体メモリー分野におきましては、すでに単一電子や強誘電体結晶を用いた大容量化技術の開発が行なわれており、駆動系を有しない固体メモリー技術と光技術との融合による新たな記録原理の可能性があるとされます。また結晶相構造変化をさらに微視化させた原子や量子制御による記録方式も実現性があるとされます。光 - 固体相互作用に関する新原理の可能性や融合技術の可能性等につきまして、御考えをお書きください。

光 - 固体相互作用に関しては P H B、光誘起作用が考えられると思います。

P H B (Photochemical Hole-Burning) は、不均一に広がった光吸収体のスペクトル中の特定波長のみには吸光度の減少が永続的に起きる現象です。吸光度の減少した部分はホールと呼ばれ、極低温では、1000 以上出来るとの報告があります。従って、材料の同じ場所に多数のホールを空けることで超高密度が達成されます。

問題は、室温で安定した材料が得られていないことで、材料開発が大きな課題です。

光誘起作用は、現在使われている光ディスクが光による加熱作用で固体相を変化させるのに対して、光によって直接、状態相を変化させる作用をさします。光応答分子素子の設計とリンクして、新原理の記録技術候補の一つと考えられます。具体的には、F e () 光スピン転移材料等が研究されています。

PB 級メモリを実現する上では「スピントロニクス」を活用した新たな光磁気記録などが有望と考えられる。これはフォトンとスピンとの相互作用により、スピン配置の変化を誘起して情報記録を行おうとする方法である。

また、単一分子光メモリをベースとした有機多層メモリ素子と多層光導波路構造の組み合わせによる回転駆動機構を伴わないカードメモリ構成などが考えられる。

固体メモリについても、高密度化には多層化が不可欠で、それを実現できるプロセスが必須です。しかし多層化のプロセスではコストが増大してしまい、現実的ではないものと考えられます。また、固体メモリでは高密度化は達成したとしても、大容量化（大面積化）にそれ以上の課題があるものと思われます。

また、分子メモリ、単一電子メモリ、スピンメモリなどの記録原理がベースとなって将来のメモリが構成されていくような気がします。

いずれにせよ、1つ1つ作り込んでいくのは現実的ではないので、自己組織化などの技術によって作れることが重要かと思われます。

原子を人工的に配列(光アブレーション技術など)させ、ナノ光/磁気ヘッド(?)が何かで偏光状態を操作して記録/再生するようなデバイスになるでしょうか？

固体メモリ技術以外としては、昔のSFにあったような生体、脳のようなバイオ技術を生かした記憶システム？

(容量だけでなく連想記憶など)

一般に容量は表面積で決まる

微細加工技術の応用で凹凸にして面積を増やす

一般にシーケンシャルな単純読出し

ニューロン技術による連想記憶読出しで高速読出し

マクスル方程式に基づいたメモリの分類をしていきますと、記録の形態とその具体例について以下のような分類ができます。

記録の形態	半導体	固体

電界		
電荷のありなし	フラッシュメモリetc	(1)
誘電体の分極	強誘電メモリ	(2)

磁界		
磁極のありなし	X	X
磁性体の磁化	MRAM	HD、MO

単独で磁極は存在しないため、上記表でXの部分は原理的に不可能であると思われます。(1)の部分については具体例を探すことができませんが、(2)については分極を固体メモリにする方式があると思います。磁性体については磁壁が存在し、高記録密度に不利ですが、分極の場合にはこの磁壁に相当するものが存在しないため、高密度化には有利と考えます。また、透磁率は光の周波数に追従できず、光領域では透磁率 $\mu = 0$ となってしまいますが、誘電率はまだ余裕であり、材料自体の応答性について高い能力があると思われます。

走査型プローブ技術を用いた原子メモリの可能性はあると考えています。しかし社会システムの方向性は、メモリに対して多種多様な機能性能を要求する方向となっています。一概に記憶密度のみでメモリの将来性を議論するのは危険と考えています。例えば、ナノテクノロジーを駆使した原子メモリの可能性は今後議論する必要があると考えていますが、多種多様なメモリ適用領域にあった技術のトレンドを模索する必要があると思います。

Pb 級メモリ実現の方式として、分極反転メモリ、分子メモリ、原子メモリ、など、媒体上での記録形態は種々提案されていますが、それらを高速に記録・検出する方式が明確でないものが多いように感じます。既に提案されている媒体上の記録の形態を、如何に記録、検出するかが問われているように思います。

X線、電子線、超微細加工並列プローブなど、既存のメモリにない技術の実用化が必要と考えます。

Pb 級以上の高密度化を達成するには、nm以下の領域への記録/再生原理が必要です。

まず、光-固体相互作用でnm以下の領域に記録ができる材料の開発が必要です。

それとともに、光を使ってnm以下の領域を選択する技術の開発も必要です。

具体的アイデアはまだありません。

ハードディスク分野では、熱揺らぎの壁を越えるために保持力の大きな材料を用い、記録時に加熱によって保持力を低下させ記録を可能にする技術を開発しているようです。

この加熱手段として光が有力候補です。

磁気記録分野との融合技術もありえるかと思えます。

・光アシスト磁気記録の研究が進んでいるが、集光による加熱を利用している。

光が有する特性(波長、偏光、位相、多光子等)を加熱以外に、磁気等その他の技術とともに利用することはできないか。

現行の延長上のリムーバブル媒体ではなく、全く新規な媒体になると思います。具体的なイメージを提言できませんが、有機系材料として、新規な材料提案が出現すると期待している。例：分子メモリ、スピンメモリなど。

新原理に基づくものは、いろいろ考えられており、それぞれ可能性はあると思いますが、まだあまりに初期段階で、よくわかりません。

磁気分野では、スピン注入などによる磁場を用いない磁化反転制御の研究が活発化しています。それらの新技術と光技術との組み合わせを今すぐ提案せよと言われてもまだノーアイデアですが、駆動系を用いない方式は新たな展開を生む可能性があると思います。例えば、目標を大容量化のみに限定せず、超高速で記録再生できる光ストレージなどを目指す道もあるのではないかと考えます。

原子や量子制御という技術が一部流行しているが、これには注意が必要である。

例えば、原子と量子制御両方に関わる話題として、スピンもスピントロニクスがはやりだが、ほんとうにスピンの量子性を使ったものはあまりなく、スピンの協同で生み出される磁性を少し小さい領域で見たときの現象を扱っているのがほとんどである。微小領域の磁氣的性質は、それ自体が面白く磁気メモリなどにはそれなりに有用なので、スピンと言わなくてもいいのだが、スピンと言えば量子性という発想に持ち込みたいというのでわざと使っている。スピンを真っ向から扱っている科学者は、スピンを扱うことの難しさ、それは概念的にすでに難しいのだが、それをよく知っているのであまりあれこれ言わない。

半導体メモリも大容量になれば、発熱などのために限界がある。融合技術という意味では、繰り返しになるが、前欄までで記したように、ナノフォトニック・デバイスによる半導体メモリ型のメモリ（すなわちスライダなどの可動部の無いメモリ）と組み合わせることに他ならない。すなわち、半導体メモリを電子ではなく、近接場光でどうさせるナノフォトニクス型半導体メモリとの融合である。

1とも関連するが、電子ビームや、TEM に代表される金属針による電子を利用するような、「光と電子の相互作用」を利用する記録、再生があるのかもしれない。光を併用して容量を上げるためには、多波長、あるいは、広い波長分布での記録（波長多重記録、再生）と、ある波長での再生により、記録密度を向上させることも考えられる。このような、「光と電子の相互作用」と「多波長、あるいは、広い波長分布での記録」の融合技術も考えられる。また、可動部はないものとなると思われるので、アクセス方式が課題である。

記録材料も原子サイズであるが、1原子での記録、読み取りは心もとない。これに対しては、長い円柱サイズにして、高さ方向で粒子を重ねていけば、熱的にも安定なものとなりうるので、原子レベルでの積層記録材料という可能性はあるかもしれない。

社会貢献という観点から言えば、個体メモリの研究は大容量化より NRAM のような不揮発メモリの実現が求められているように思う。駆動系メモリは、当面は光と磁気の融合を中心に進むと思う。

強誘電体メモリ材料は分極制御で、光相互作用では旋光などがあるかも知れませんが、装置化のイメージは知識不足でわかりません。P バイト光メモリは、ROM を優先して、製造の容易さから、ナノインプリントなど「形状」で情報を記録することが有用かと思っています。RAM 化が必要な場合、電子、電界との相互作用で、状態が遷移する材料の探査が必要と思われるのですが、今はアイデアはありません。

「駆動系を有しない固体メモリー技術」はビットアドレッシングは電气的に行われているものであり、同じように、フォトンを送ってビットを選択するような入出力系を「駆動系を有しないで」考えることが出来れば、光 - 固体相互作用に基づく光ストレージを構成することが出来るのではないかと。ただし、「駆動系を有しないで」フォトンを利用して任意のビットに入出力させるのは、かなり困難であると思われる。最終的な接点でゲート線、ワード線などを光学的に置き換えることは可能と思うが、光源や光電変換(読み出し)とワード線を選択するために、ある程度の駆動系は必要と思われる。光源を増やすことも考えられるが、ビットコストの点で、不利になると思われる。

微子化相構造変化については、相構造変化には数多くのものが存在し興味のない分野で有ると思われるが、これと量子制御については、専門外であるので、明確、漠然の両方の立場からとも現在はアイデアはない。

ただし、これらと大津先生が以前から提案されている固体素子の局所的エバネッセント波制御と組み合わせることが出来ると大変おもしろくなりそうと言う予感はある。

(4) Pb 級ストレージの開発を促進する要素として、社会環境・構造の変化やそれに伴う従前と異なる用途あるいは新規用途開発があると思われます。どのようなシーンにおいて Pb 級ストレージが最もその価値を発揮できるとお考えですか？

新しい用途への展開として
記憶チップ、スーパーコンピュータサーバー、ゲノムバンク、ロボット人工頭脳ストレージ
が考えられます。

光コンピュータ、光通信の発達、普及により、情報の発信、受信、ストレージを全て光で一貫して行われる超高速通信、データ伝達する世の中。

1 PB の記録容量は、人間の一生分の情報(80 歳分の MPEG-2 で記録した映像情報)に相当し、基本的には大容量の映像情報のアーカイブ用途が考えられる。2020 年頃には高品質の立体映像を扱う可能性が非常に高く、情報量は桁違いに増大すると考えられる。また、官公庁保有の情報、企業の商取引に関わる情報が 7 年間ほどの保管が義務付けされる動きも伝えられており、ライトワンスタイプの長期信頼性の高い光ストレージの利用が期待される。

その他、コンパクトで大容量の記録が可能なストレージが実現すれば、防犯などの用途として長期間にわたる連続映像記録が可能で、且つ信頼性の高い記録保持性能が求められる様々な応用が考えられる。

通信トラフィック量が年 3 倍の割合で増加しているとのことなので、1 次記録系の容量増大のニーズも強く、またセキュリティの関連から 2 次記録的なトラフィック全量の保存用途も増大していくものと考えられる。1 次記録系には固体メモリや HDD などが、2 次記録にはリムーバブルメディアが今後も利用されていく(としたい)。

業務用途
製造履歴の保管など、膨大な管理データの記録
コンシューマ用途
ホームサーバでの好みの映像蓄積、読出しはモバイル(著作権などは大丈夫か?)
ペタバイト化ではなく、単位体積のデータ容量密度が大きくなるメリットを生かしたモバイル大容量ストレージ(映像の持ち歩き、通信システムと融合した配信情報の蓄積)

これからですと、企業のデータバックアップなどでしょうか？

個人レベルではほとんど必要性がないと思います。

今後ロボットの普及が進むと考えられるので、人工知能用のメモリとしては必要かも知れませんが。

または、可換性があれば映像データのアーカイブなどとして放送局などで使われる可能性があると思います。

従来のストレージでもそうであるように、産業用(ビジネス用、システム用)とコンシューマ用とに分けて考える必要があるかと思われます。

まず、ビジネス用途では、インターネットのログ保存等の巨大アーカイブ記録、地球シミュレータ等の巨大計算機のシミュレーション結果保存等が考えられると思われます。これらの分野は加速的に情報爆発が起こる領域と予想できるのでマーケット規模は不明ですが必ずニーズはあると思われます。

コンシューマ用としては、プライバシーとの兼ね合いが問題となるかもしれませんが、例えばボイスレコーダのように日常生活の中で常時記録を行っておくというシーンに、映像等も残しておきたいという要求が加わってくれば、その情報量は膨大になるため(人の一生の記録を考えると)、Pb級の記録容量にニーズがでてくると考えられます。さらに、センサが大量に搭載される車からの情報や、ロボット社会が到来した後のロボットからの映像や音声情報を蓄積する必要があるとすれば、さらにPb級のストレージが使用される可能性が出てくるのでは、と期待しております。

今後、情報システム環境が一変しネットワークとコンピュータが一体化して、地球規模でサーバシステムが統合しグローバルな情報システム環境が実現されていくと思われます。グローバルな情報システム環境は、たとえば環境問題などの情報データを莫大な量で蓄えそれを処理する機能が要求されていくと思われます。そのような社会においてペタビットストレージが大きな価値を発揮できると思われます。

主に産業用途のアーカイバル記憶として重要。

電子取引が拡大して商取引のエビデンス保存がさらに重要になるなど、金融、医療、防衛、通信、放送などの分野で、今後ますます、

ビット当たり単価が低く、

ビット当たり体積が小さく、

長期保存の信頼性が高い

記憶メディアの必要性が高まる。

・オフィスや家庭においても、高精細の動画データをあつかう場面が増え、とりあえず保存しておくために低価格の大容量ストレージが必要になる。

・三十年ほど前までは大型計算機中心の集中管理システムであったが、パーソナルコンピュータの発達で、現在では各自のPCにデータを分散して保存している。

しかし近年、情報漏えいの弊害が言われだし、集中管理方式に移行する組織も出始めた。

各自があつかうデータ量は、三十年ほど前とは桁外れに大きくなっているため、集中管理システムには莫大な大容量ストレージが必要になる。

・まずは、業務用途。

・大容量を必要とする各種アーカイブ（例えば、光情報通信におけるサーバ用アーカイブ、放送局用アーカイブ、図書館内文書のアーカイブ等）

・また、セキュリティが必要な公文書等のバックアップ。

・高解像度映像の編集用途（非圧縮で情報を処理、編集する）。

・セキュリティ用ビデオデータ保存（昼夜連続記録）

・個人用としては、ホームサーバ用途。（映像情報の一時保存、またはアーカイブ。ただし、Tbストレージで必要な容量を満足する可能性あり。）

1．ハイビジョン、ウルトラハイビジョン等のストリーム映像記録。

2．データウェアハウス（企業用途のストレージ）

超小型大容量メモリ（10mmで1TB） 個人が見聞きした一ヶ月分のすべての情報（映像、音声など）が記録できる。（ウェアラブルメモリ）

セキュリティー、ロボットの人工頭脳、大容量の映像・情報のアーカイブなど

・超リアル三次元ディスプレイ

・マルチチャンネル（100チャンネル以上）同時記録レコーダ

・交差点の安全モニター（50年分）

・何でも録画＋検索技術で、ほしいときにほしい情報を瞬時に取り出すような用途

常にあらゆるデータを記録することが可能になると思います。テレビのすべてのチャンネルを常に録画しておくとか、人間の健康状態の情報を常にモニターし、データとして残しておくというようなものです。

アーカイブ、バックアップ、一日の出来事を全て携帯電話に記録して（音や画像）全て蓄えておく。

あらゆる分野でのデジタルアーカイブや、社会インフラとしてのモニタ用（たとえば監視システム）ストレージなど。

高精細テレビ用録画機／ホームサーバなど。またこれらの普及により、サーバ等産業用コンピュータにも Pb 級ストレージが必要になってくるように思う。

伝達系は 1Gbps の光ネットワークを先頭に、デジタルの放送系、無線セルラーがインフラ整備

表示系は、100 インチサイズの自発光 FPD が 10 万円級となり、家具・壁紙並みに普及

処理系は、安全・快適環境のための制御、ロボティクスが充足社会のニーズへしたがって

記憶系では、快適環境のためのディスプレイのデータ源や、ロボティクスのための AI データベースなど、専ら「再生」機能が大容量メモリに要求される。中小容量のオンデマンド、ユビキタス系は半導体、HD ディスクが今後も担う、と思われる。

多分、ペタバイト級のストレージの提案をする時に、もっともネックになるのは、用途だと思う。一昔前は、数百 GB の HDD など不要と揶揄されたが、現実には、現在の PC には、殆どこのクラスの HDD が装着されている。現実には、NTT やインターネットプロバイダでは、数万台以上の HDD が運用され、また、天文台や国立の研究所では、一瞬で GB 級のデータ取得が必要な分野もある。しかし、市場は小さい。従って、ペタバイト級のストレージを製品化しても、はたして、採算がとれる製品になりうるのか、逆に、それが具体的に特定できれば、Pb 級ストレージの技術開発も加速されると思われる。（市場が小さいのあれば、現行のストレージを並べて、実現するだけになり、新たな技術開発の必要性がなかなか認めてもらえないのではないか）

超高速現象の解明に超高速画像ストレージがあれば有効

画像のゴミ箱（不必要と思われるかも知れない大量画像の一時保管）

Pb級の記録密度が実現できれば、現在、光ストレージが磁気記録や半導体記憶に比べて高いといわれているビットコストを低減することが可能である。このコスト低減が新たな用途を可搬型光ストレージの用途を広げると考えられる。基本的にいえば、サイズが現在と同じCDサイズで、大容量化した光ディスクはそれほどコンシューマ用途では必要とされていない。まだHD-TV記録は一般的でなく、今後、データ圧縮技術も進展することを考慮するべきだ。よって、コンテンツの大容量化は、面記録密度の上昇ほどは急激ではないと思われる。iPodなどのHDD内蔵MP3プレーヤがなぜヒットしたかといえば、1.8”以下の小径HDDを使っているからである。HDDが来年以降0.85”を量産化することを考えれば、Pb級の面記録密度で「小径化と大容量化を両立させた可搬媒体」が光ストレージのコンシューマアプリケーションのあるべき姿であると考えられる。

業務用途では、放送局用が光ストレージの大きなアプリケーションとして進展すると考えられる。現在、磁気記録が使われている取材系やアーカイブも大容量化した光ストレージに置き換わる可能性がある。

(5) その他、このアンケートに関するご意見がございましたらお書きください。

T b級ストレージでさえ夢の技術と考えているのに、P b級とは、私の思考レベルを遥かに超えています。シーズ探しも必要ですが、ニーズ探しは更に重要かもしれません。

これらを実現していく上で、単に記録方式や記録媒体だけでなく、記録再生システムを構成する短波長の高出力 LD 光源、高速応答性の受光センサー、信号処理など周辺技術の並行した進展が不可欠である。従って、これら半導体素子や光デバイスなどの技術ロードマップとの整合性を見ておく必要がある。

委員会では光を利用したストレージに限定して議論すべきとの意見がありましたが、ユーザーには光を利用しようがしまいが関係なく、光ディスク、磁気ディスク、固体メモリというような分類よりも、リムーバブルか否か、可動部の有無など、用途に応じた特性が重要であると思われます。また光アシスト型 HDD の開発が進められていることもあり、ストレージ技術全体について俯瞰した上で、光の利用用途を見出していくことが重要であるものと思われます。

前回の研究会でも申し上げましたが、ストレージの将来像として大容量が重要ということは理解できるものの、それだけではなく実際の有用性として

- ・ 高速なリード、ライト
- ・ 複製、セキュリティ
- ・ 高密度小型の記憶ユニット

といった観点での将来像についても検討が必要と考えます。

本アンケートでは、Pb という容量に着目されていますが、容量が大きくなると、基本的にはそれに伴って転送速度も速いことが求められると思います。

また、このアンケートの中では設問 5 が最も重要で、アプリケーションが設定されないという開発の目的・方向性が定まりません。もちろん基礎技術は重要ですが、何らかの応用先を想定するべきだと思います。

Pb 級メモリ実現には、メモリ媒体上での記録形態、記録・再生方式、アドレッシング方式など、新規な原理に基づく技術が必要であり、2030～2050 頃の実現時期を謳うのが現実的と考えます。それまでのつなぎの技術と、Pb 級への飛躍の技術とを併せて検討するのが良いと思います。

現時点で Pb 級容量をもつストレージを構想するという行為は、実際のストレージ開発を行なっている私達にとってはあまりにもギャップがあり、どうしても行き詰ってしまいます。まず、シーズという観点から方向性を探る方法としては、DNA 分子メモリ等を含む基礎的なメモリ・ストレージ関連の研究を行っている全世界の大学研究室をリストアップして Pb 級容への可能性という観点でサーベイすることを提案させてもらいたいと思います。

日本だけでなく、北米やEU地域の動向も把握する必要があります。特に、米国のコンテンツ、映画産業の要望は、よく聴取する必要があります。コンテンツ発信という点において、将来も米国映画産業が世界をリードすると考えられるからです。

コンテンツホルダーとユーザーのニーズはよく把握する必要があります。また、ストレージ製品一般について言えることですが、その国の国民性や文化により傾向が異なる場合がよくあります。これらについても考慮に入れるべきと考えます。

・ 1998年～2005年までの
ストレージ分野の開発動向

ストレージ分野における最新の技術開発課題に関して、特許データを始めとする公知情報から、「ハードディスク」、「光ディスク」、「半導体メモリ」の各々の分野の技術課題を抽出し、整理した結果を図表 -1 に示す。

1998 年度に策定された光ストレージロードマップにおいて抽出された技術キーワードの大半が、上表光ディスク分類中において見られることは、前回ロードマップの策定における技術予測精度が極めて高いことを裏付けている。しかしながら技術開発の幅という点から逆に言えば、ここ数年における T B 級ストレージ技術開発に大きな方向性の変革を含む新規技術の芽が乏しかったことを示唆しているとも言え、新たな技術革新の種が必要であることは明らかである。詳しくは後述するが、高精度サーボ技術など機械工作系の技術開発が精力的に進展する一方で、材料系開発の進捗が比較的遅れている状況が見られる。

図表 -1 最終製品別の技術課題の一覧

最終製品	光ディスクに関する技術課題	ハードディスクに関する技術課題	半導体メモリに関する技術課題
技術課題一覧	チルト誤差の極小化 ヘッド浮上面研磨 ディスク、ヘッド間微小ギャップ実現 読取検出の位置決め 高精度非球面レンズによる単レンズ化 ディスク高速回転 微小ごみ除去 光ビームスポットの狭小化 高精度サーボ技術 低出力光源の利用 光源の短波長化 近接場光利用による記録 超解像利用による記録 記録マークの微細化 微細ピットの実現 記録層変化に関して 多値記録 ディスク表面の平滑化 記録層と励起発光利用記録 ホログラムメモリ	ヘッド浮上面研磨 ディスク、ヘッド間微小ギャップ実現 読取検出の位置決め ディスク高速回転 微小ごみ除去 高精度サーボ技術 磁気ヘッド製造の低コスト方法 磁気ヘッドの高感度化 媒体の磁気保持力向上 残留磁化の開放、防止 磁気記録媒体の安定化(熱揺らぎ防止) ディスク表面の平滑化 磁気ディスクの耐久性向上 主磁極幅の微細化 単磁極型垂直記録ヘッド 再生感度の上昇	記録層変化に関して 媒体の磁気保持力向上 残留磁化の開放、防止 磁気記録媒体の安定化(熱揺らぎ防止) 多値記録 書換え回数の増加 磁気記録媒体製造方法 誘電体利用メモリ 誘電キャパシタの劣化防止 分極電荷量向上 MONOS構造による簡素化 トンネル酸化膜電圧の低減 書込み電流の低減 メモリセル構造の簡素化 メモリ動作試験 微細構造を簡易に観察する。

特許 PATOLIS ならびに公知文献情報に基づき K R I 作成

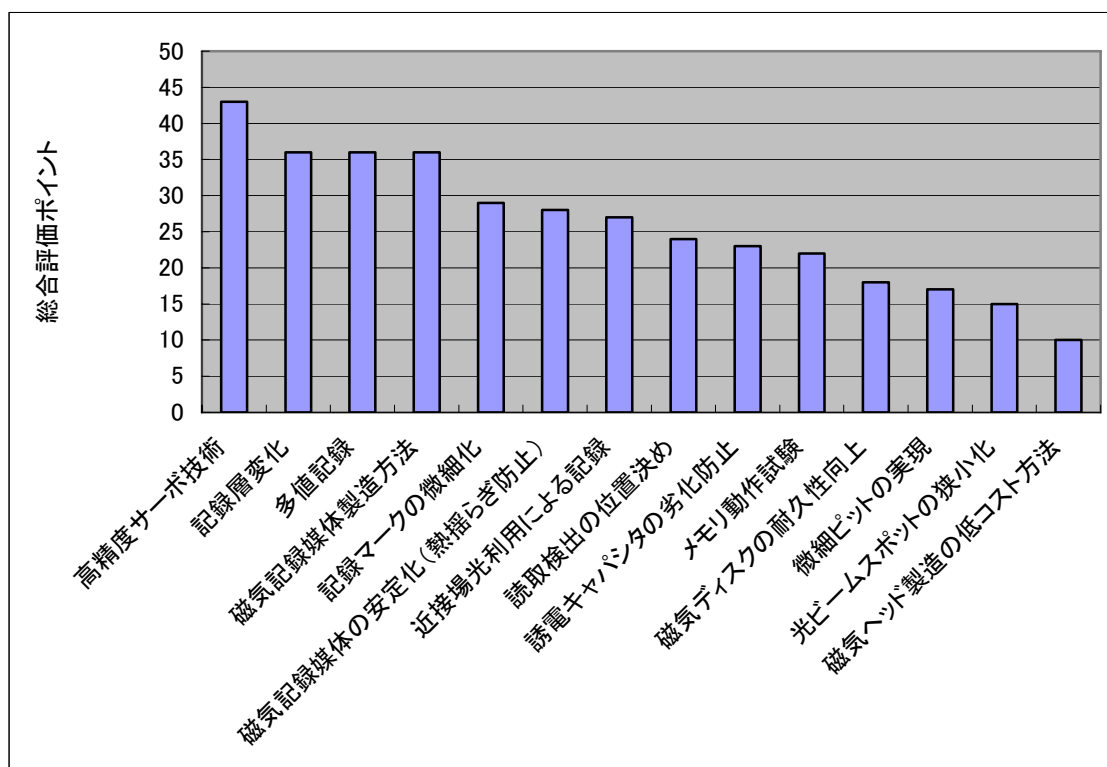
上記検索・集計の結果より、技術課題として重要であり、なおかつ特許出願数や発表論文数が多い上位技術課題として14技術を抽出した。図表-2にその技術課題を示し、図表-3に特許出願数ならびに論文数の伸び率を加味した技術重要度を重み付けした結果を示す。

図表-2 評価対象とした技術課題の各種データ解析数一覧

	読取検出の位置決め	光ビームスポットの狭小化	高精度サーボ技術	磁気ヘッド製造の低コスト方法	近接場光利用による記録	記録マークの微細化	微細ピットの実現	記録層変化	磁気記録媒体の安定化(熱揺らぎ防止)	多値記録	記録媒体の耐久性向上	磁気記録媒体製造方法	誘電キャパシタの劣化防止	メモリ動作試験
特許出願数	85	83	277	78	251	181	79	62	72	126	77	151	73	57
発表論文数	14	24	91	12	116	49	18	29	18	51	20	23	54	61

特許 PATOLIS ならびに公知文献情報に基づき K R I 作成

図表-3 メモリ分野のナノテクノロジー技術課題の相対的な総合評価



特許 PATOLIS ならびに公知文献情報に基づき K R I 作成

． 1 1Tbps 実現に向けて技術の開発状況と課題

本重み付けにより、「メモリ・ストレージ」分野における各技術課題を解析した結果、研究開発において現在最も重点が置かれている技術的な課題は、光ディスク・ハードディスクに用いられる「高精度サーボ技術」であり、次に3技術課題が横並びで、光ディスク・相変化を利用した半導体メモリーに応用される「記録層変化」技術、記録を多値・多層化することで記録密度を向上させる「多値・多層技術」、ハードディスク・磁気を応用した半導体メモリーの要素技術である「磁気記録媒体製造技術」である。次節より、これら重み付けを行なった結果上位に位置づけられた技術を中心に現状の開発状況と今後の解決課題を述べる。また表 1-1 に抽出された技術キーワードは、すべてGBからTB級ストレージ技術の確立にとっての必須技術であり、各技術における一層の展開が必要であることは自明である。

． 1 . 1 高精度サーボ技術開発動向

「高精度サーボ技術」の評価を詳細に見てみると、特許出願数、発表論文数が多く実用化指数のポイントが高く、前述のとおりハードディスク、光ディスクの両最終製品に使われていることから製品適用指数のポイントも高いものと推測される。さらに、当技術の新聞等情報媒体への掲載数から、開発の取組指数評価も高くなっている。

一方、技術開発を行っている開発プレーヤー指数は抽出した技術課題の中で中位にあるが、総合評価として、各評価指数における評価ポイントが安定して高く、これらの分析結果から、今回対象とした技術課題のうち、「高精度サーボ技術」が開発に最も重点を置くべき技術課題であるという評価となる。

ここで、「高精度サーボ技術」とは、ハードディスク、光ディスク等のヘッドを目的のトラックに高速に移動させ、位置を決めること等を可能にする制御技術である。ハードディスク等のストレージの記憶容量が増大するに従い、位置決め精度の向上とシーク時間の短縮が求められており、この要求を実現する主要な技術要素とされている。また、ストレージがコンピュータの外部記憶装置としてだけでなくオーディオビジュアル機器にも応用され、その用途や市場が拡大していくに従い、記録媒体の反り、傷、汚れ、偏心等、悪条件下での利用によって生じる問題が多くなってきていると言われており、この「高精度サーボ技術」は、これら問題を解決し、ナノメートルレベルの精度で構成されるストレージ装置を正確に動作させるためのブリッジ的な技術であると考えられている。第2章において述べたように今後も、HDDストレージは、大容量化と利用用途の拡大が継続と予想されていることから、本技術についても更なる進展が望まれる。

． 1 . 2 高密度記録のための多値・多層技術開発動向

これまでの光メモリは、いずれも光エネルギーを記録媒体上で一旦熱エネルギーに変換して物性の熱変化を利用して記録している。これらは、ヒートモード記録と呼ばれる。

それに対し、光エネルギーをそのまま光反応に用いて物性変化を誘起して記録する方式は、フォトンモード記録と呼ばれる。フォトンモード記録は、高感度、高速記録が可能、熱拡散、物質移動を伴わないため微細スポット形成が可能、光の特性を利用し多重記録が可能などの特徴をもち、次世代光記録方式の一つとして大きな期待が寄せられている。

光を受けることにより、分子がその分子量を変えずに、その結合様式を変え、色の異なる別の構造の異性体へ変換することは、フォトクロミズムと呼ばれ、その機能をもった分子は、フォトクロミック分子と総称される。光生成した異性体が、元の構造へ暗黒中においても戻る分子と、光を受けない限りもどらない分子とがあり、前者は調光材料へ、後者は光メモリ、あるいは光スイッチ素子へ応用されている。現在では、繰り返し耐久性、保存安定性、高速応答性、高感度性を兼ね備えた分子が得られるようになってきている。

多値・多層技術の高度化としては、まず光学材料としてフォトクロミズム、すなわち分子が光により色の異なる2つの状態を可逆的に生成する特性、を発現する有機フォトクロミズム結晶の開発があげられる。

光メモリ媒体としては、安定性に優れた材料が必要であり、この観点からジアリールエテン誘導体の優位性が近年盛んに検討されるようになってきている。ジアリールエテンの光閉環・開環反応は、ヘキサトリエン-シクロヘキサジエン型反応であり、閉・開環による分子ひずみがジアリールエテンの物性に影響を及ぼしていることが明らかになりつつある。すなわちフォトクロミック反応が結晶格子の規制を受けながら進行し、その結果分子構造がひずみ、熱退色速度のみならず色調にまで影響を及ぼすことが、詳細な分子構造分析により明らかとなっている。

また多光子吸収材料としてはフォトリフラクティブ材料がある。現在、日東電工テクニカルなどは、米国大学との共同研究によりポリマー材料設計・合成技術を駆使する事により、高い回折効率・速い応答速度・長時間安定な、新規有機フォトリフラクティブ材料を開発しており、回折効率が50%、応答速度が10数ミリ秒と世界最高レベルのフォトリフラクティブ性能を有していると同時に、優れた組成安定性（加速度試験：60 × 4ヶ月以上、室温で4年相当）を有する材料開発が進行している。

ディスク形状メディア用フォトポリマー材料の改良も進められている。

カチオン重合系を用いた例としては、Aprilis社のCROP(Cationic Ring-Opening Polymerization)が挙げられる。ラジカル重合系の多くで用いられているビニルモノマーの重合では重合時の結合距離の変化が大きく、その結果、硬化収縮といわれる大幅な体積減少を生じる。これに対しAprilis社ではカチオン開環重合するモノマーを使用することにより低減したことが大きな特徴である。ここではホログラム形成時の硬化収縮率をBraggのずれから求めた結果において0.1%以下と報告している。Aprilis社は2002年より50mm形状と120mmディスク形状の200μm及び300μm厚のサンプルの販売

を開始し、2004年3月より従来サンプルに対して2倍以上の高感度と400 μ mの厚膜化を測ったディスク形状メディアをリリースした。正、ダイナミックレンジは1/2以下に低下している。またラジカル重合系を用いた例としては、DuPont社のOmniDex、InPhase社のTapestry等が挙げられるが、データストレージ用としては後者が市販されている。Tapestryは高屈折率の光重合性モノマーと低屈折率のマトリクスから構成される。硬化収縮率は0.1%と低く、M/#（ダイナミックレンジ：多重性能を示す指数）は1.5mm厚の媒体において50といった値が報告されている。高密度記録に向けて、更なる研究が進められており、2005年より量産化が開始されている。

以上、光記録材料としての有機材料開発は目覚しいが、低分子フォトクロミック材料開発研究などにおいてみられる光応答性の向上を目指した研究は緒についたばかりであり、蛍光スイッチングの実用化研究など早期に解決すべき課題も多い。今後、単分子メモリーを利用した大容量多層記録媒体の主力材料としての可能性も大きく、研究の加速が必要である。

1.3 高密度化光記録技術（記録方法、光学系/検出系）

CDからDVD、BD-HD-DVDと進化してきた光ディスクの高密度化技術は、レーザの短波長化と対物レンズのNAを大きくすることにより行われてきた。従って高密度化技術としては非常に単純で、分かり易かった。しかし本手法のBD-HD-DVD以降の高密度化技術は、単純なものではなく、青色レーザ（405nm）を紫外光（例えば300nm）にすることも、対物レンズのNAを0.85以上に大きくすることも、現在の技術ではまだまだ不透明な段階にある。

光ディスクの高密度化技術としては、記録再生ビームスポットを微少化する技術および今までディスクの2次元の表面のみに情報を記録したのを、3次元場の体積に記録する技術があり、以下主要記録技術の現状と課題を概説する。

近接場光技術

記録再生ビームスポットを微少化する近接場光技術は、SuperRENS方式を除き、HDDの高密度化技術であるため、現在のリムーバブル機能を継承した光ディスクとはコンセプトが異なる。HDDの高密度化技術としては、過去から継続して研究されている垂直磁気記録方式との競合となる。近接場光技術を用いた光アシストタイプはレーザビームの発生部分が追加になるため、垂直磁気記録に比較して記録密度を十分大きくすることが、価格的に競合しえるひとつの方策であり、課題のひとつである。

SuperRENS 方式

SuperRENS 方式は、開口部の形成のためにレーザービームによる熱を使用するため、開口部を構成する材料の耐久性に課題を残す。相変化光ディスクにおいても、記録再生消去のサイクルは、10 万回であり、再生時に熱による開口部を形成する必要があるこの方式は、1000 万回以上の耐久性が求められたため、実用化への大きな壁となる。

ホログラフィックメモリー

体積記録のホログラフィックメモリーは、最も開発の歴史が長いメモリーであるが、多重記録に耐えるダイナミックレンジの大きな記録材料の開発がキーとなる。光源についても波長変動に極めて敏感なシステムであるため、記録密度が大きくなった場合、通常の半導体レーザーを用いることは困難であると思われる。現在最も実用化に近いと言われている日本メーカーの試作装置には、レーザーとしては波長変換型の高出力レーザーが用いられており、非常に高価なものとなっている。

またレーザーのスペckルノイズの除去も課題の1つになる（表 -4）。

図表 -4 高密度化光記録技術と技術課題

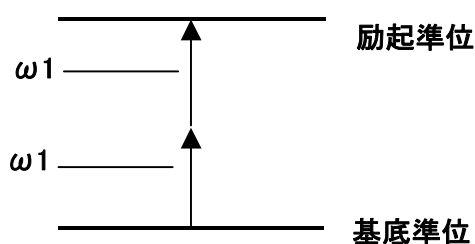
高密度化技術 対象	現行技術	次世代技術	ソリューション
記録再生ビームスポット	NA/λ NA/λ 回折光限界 最短記録マーク以内	等価的に微少化 NA増大 回折光限界以下 記録マーク拡大	Super RENS SIL 近接場 MSR DWDD
記録再生方式	熱記録 面記録 1光子記録	光記録 体積記録 2光子記録	ホログラフィック記録再生 2光子メモリー
多層化	2層	10層以上	3次元2光子メモリー

1.4. 2光子吸収記録技術

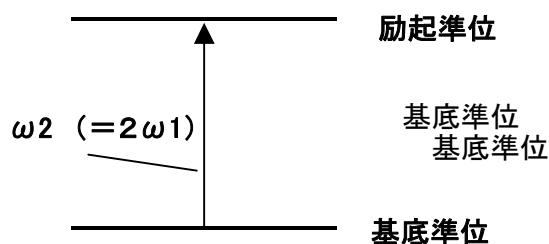
2光子吸収を用いた光メモリー

この方法は他の方法とは異なり、2光子吸収という新規な方法を用いる点にある。2光子吸収を光記録に用いると、800nmのレーザ光により、400nmの波長に相当する記録密度が得られる。

通常は記録材料がレーザ光を吸収する時、1個の光子のエネルギーに対応して、光子のエネルギーに相当するエネルギーの準位に記録材料中の1個の電子が励起される。そしてこの吸収は光強度に比例するので一光子吸収と呼ばれる。光強度が大きい時は、2個の光子が同時に吸収され、そのエネルギーの和に相当する励起準位に1個の電子を励起する二光子吸収が生じる(図表-5,6)。



図表 -5 2光子吸収



図表 -6 1光子吸収

このように2光子吸収は等価的に波長を半分にできる記録方法であり、現在すでに405nmの青色レーザが商品化されているが、これを用いることにより、200nmの紫外レーザ記録が可能であることを意味する。さらに紫外レーザを従来の光学系に用いると、レンズ等、光学素子が特殊なものとなり、非常に扱いにくい高価なものであるが、2光子吸収では、使用するレーザは405nmであり、記録材料中において等価的に波長が半分になるのであり、光学系構築の優位性がある。

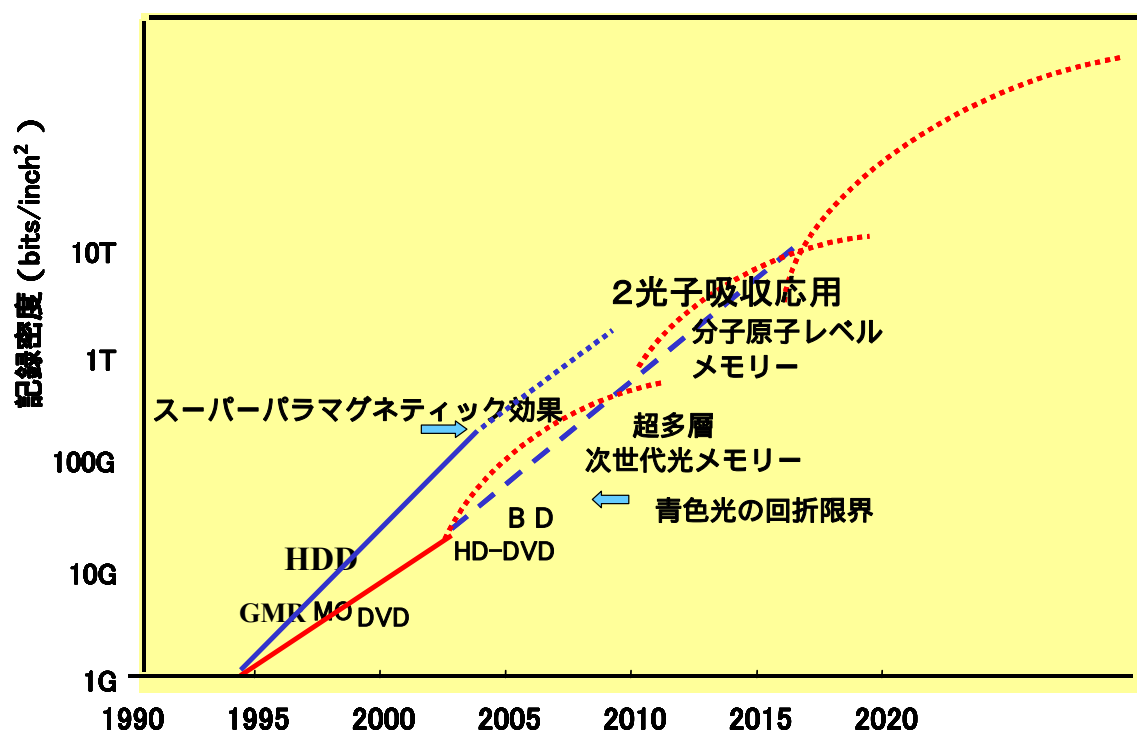
さらに再生時において、SHG再生という技術が開発されており、記録したマークに405nmのレーザ光を照射したとき、その半分の波長の200nmの反射光を得ることが可能である。つまり、再生も半分の波長に変換して再生できる。

2光子吸収の発展性

2光子吸収を用いた光メモリーは、多層型に限定されるわけではなく、どのようなシステムにも応用できるのが最大の特徴である。

例えば、2光子吸収型ホログラフィックメモリー、近接場、さらには結晶構造の書き換え型光メモリーにもその特性を生かすことができる。

2光子吸収は波長が半分になるだけでなく、非線形現象であるので、非常に微細な加工に適している。これは言い換えれば、微細な記録が可能であることであり、とくにフォトニック結晶の内部の任意の場所に記録マークを作成することが可能なわけである。この技術を発展させることにより、微細記録を行い、サブミクロンからナノに記録サイズを微細化していくことを可能にする（図表 2-7）。



図表 2-7 高密度化技術の進展

高密度記録において、HDD が面内記録から垂直磁気記録に向かうのに対して、光メモリーは面内記録から体積記録に移行することは間違いなく、今後この2光子吸収技術がTB級ストレージの確立技術のひとつになると考えられる。

しかしながら2光子吸収メモリーは、半導体レーザーによる記録再生が始まったばかりであり、記録媒体の高感度化、半導体レーザーのハイパワー化、および高周波数応答性等基本技術の検討から実用化技術としてのコスト面における課題など早期に解決が求められる。

以上TB級ストレージ技術確立に向けた現状の取り組みと主要技術の課題を示した。TB級ストレージの確立なくしてさらなる大容量化の実現はありえない。新たな技術における基本原理の確認段階(萌芽的段階)から実用化技術段階にある技術開発までを含め、ここ10年間における既存技術の展開がTB級ストレージの確立と次のPB級ストレ

ージ技術開発の足がかりとして極めて重要であると考えられる。

・ 現要素技術における技術トピックス

． 1 ． 技術トピックス

． 1 ． 1 記録方法

短波長再生

光記録媒体（光ディスク）への情報記録では、焦点のスポット径を小さくできる短波長のレーザほど、高密度の記録が可能になる。従来、DVDなどで実用化されていたレーザは、赤色から赤外域にわたる長波長領域（650～800 ナノメートル）であった。一方、青色レーザの波長は約400 ナノメートルであり、この短波長のレーザを使うことで数十G～数百Gバイトという大容量の光ディスクが可能となっている。今後、高精細DVDでは、再生光源短波長化や新しい信号処理方式（PRMLなど）の導入が必須である。この短波長光源としては、最近、室温で3,000h以上の連続発振を達成したGaN系青紫色LDが有力である。ただし、短波長化に伴いディスクチルトが厳しくなるため、チルトサーボなどの新技術開発が必要である。一方、ディスク片面で15Gバイトの大容量化を実現するには、 $\sim 0.2\mu\text{m}$ 程度の微小ピットを形成する必要がある。DVD用の原盤記録装置は、実用レベルでは最も短波長の紫外光レーザ（波長：351nm）を用いているが、 $\sim 0.2\mu\text{m}$ の微小ピット形成は難しい。このため、EBR（Electron Beam Recorder）、退色性色素あるいはRIE（Reactive Ion Etching）などを用いて、微小ピット形成技術の開発が進められている。

SHG（Second Harmonic Generation）方式の青色レーザは、赤外レーザの波長（820 ナノメートル）の第2高調波を使用し、410 ナノメートルの短波長を作り出す。出力は30ミリワット以上で、従来の青色レーザに比べて高出力が可能であり、GaNレーザなどと比べて低ノイズなうえに波長のばらつきが少ない特徴を有する。

実用化上の最大のハードルはレーザ出力である。現在、高出力型（30ミリワット）のSHGレーザでも、2層目の記録層にレーザを届かせるまでの出力は得られていない（半波長化により、出力は1/3～1/4に低下）。

超解像再生

超解像は波長以下の微細なスリットを通して微小な光像を観測する手法である。磁気誘起超解像（MSR）は、Arataniらによって最初に発表された技術で、記録層と読み出し層を分離し、レーザ照射によるスポットの高温部が焦点における光スポットより小さいことを用いて、記録層から再生層に選択的に磁気転写することによりスポットより小さな記録マークを再生できる。近年開発された集光機能性ナノガラス薄膜は、記録膜の上部に形成され、レーザ光が集光照射されるとその部分の屈折率が可逆的に変化することで「絞り」を形成し、ビームを補足した上で記録膜に照射させることが可能になる。この現象を利用することにより微細な記録スポットの読み書きが可能になる。

熱アシスト方式

現在、シャープでは、熱アシスト方式のハード・ディスク装置（HDD）に向けた記録ヘッドを試作し（ヘッドの寸法が1mm×1mmと小さいことが特徴）、トラック幅が70nmのビットを記録した結果を公表している。またヘッドで再生する代わりに、磁気顕微鏡(MFM)を用いてデータを記録できたことを確認しており、新たな再生技術としての展開が期待できる。熱アシスト方式は、レーザで記録媒体を加熱しながら記録する方式であり、保磁力の高い媒体を利用できるので記録密度を高めるのに有効とされている。しかしながら、この方式で記録密度を高めるには、加熱用のレーザ径を小さくする必要がある。例えば記録密度が1TbpsiのHDDを実現しようとすると1ビット当たりの面積は25nm²となることから、新たに近接場光を利用する方法などを検討する余地がある。

（参照：<http://nikkeibp.jp/wcs/leaf/CID/onair/jp/elec/368819>）

垂直磁気記録

日立製作所の米国法人 Hitachi Global Storage Technologies（Hitachi GST）は、最近面記録密度 230Gbps の垂直磁気記録方式ハード・ディスク装置（HDD）を開発した（記憶容量 20G バイトの 1 インチ型 HDD や、1T バイトの 3.5 インチ型 HDD 相当）。

同社は、今後開発を進め、5～7年後を目途に記録密度を現在の面内記録方式の10倍に上げ、60G バイト 1 インチ型 HDD 実現へ向かうとしている。

このほか海外では、米国 Seagate Technologies などは次世代の垂直磁気記録技術として、垂直磁気記録技術を光技術と組み合わせることにより、ハードディスクの大容量化を実現し、具体的達成目標として「2.5 インチディスクで、1.5 テラバイト」の製品化を視野に入れている。今後製品化のコストダウンに伴い、磁気記録技術の実用化が進み、光技術との融合も加速されるものと考えられる。

（参照；<http://japan.cnet.com/news/tech/story/0,2000047674,20084317,00.htm>）

超多層記録材料

現在の多層光ディスク技術は、原理的に4層が限界だと指摘されている。超多層化実現にはエレクトロクロミック材料等高機能フォトポリマーの開発、記録光源の短波長化や、光ヘッド用レンズの高解像度化があげられる。

ホログラフィック記録材料

ホログラム技術を利用した次世代光ディスクの開発を進めるオプトウエアは、「ホログラフィック・パーサタイル・ディスク」(HVD)と「ホログラフィック・パーサタイル・カード」(HVC)の実用化を目指しており、容量 200G バイトの「記録用 HVD カートリッジ」と 100G バイトの「読み取り専用 HVD」、30G バイトの「HVC」、「読み取り専用 HVD 用ケース」という

4項目について2006年末までに検討を行い、ISO(国際標準化機構)への提案を行う予定である。なお、HVD/HVCには「Phi」(パーマメント・ホログラフィック・インフォメーション)と呼ばれる、データ記録後に媒体を感光させることによって、データの改ざんを防ぐ仕組みが実装されており、大容量化ストレージの保護の面からも技術開発が進められている。同社では情報保全が求められる業務市場を中心に、HVD/HVCを紹介していくとしている。

一方、ホログラフィック記録では、ページデータを用いることで1記録マークあたりの記録容量を大きくし、同時に高速化も図れる点に注目した技術開発も進行中である。

ホログラムは重ね書き(多重記録)が可能である性質により、現行のほかの記録再生方式に比べてケタ違いに高い記録密度にできる可能性があり、多重記録の方法として、参照光の入射角度を少しずつ変えて重ねる「角度多重」や、記録位置を平面方向にズラして重ねる「シフト多重」のほか、波長を変える「波長多重」、位相を変える「位相多重」などが技術開発の焦点になると考えられる。

(参照:<http://www.yamaguchi.net/archives/001132.html>)

相構造変化

相変化メモリは、データを電荷としてではなく、特殊な材料の非晶質から結晶構造への状態変化によって保存する新技術である。本技術は、高速・大容量のデータを保存する潜在性を示し、高性能サーバから民生エレクトロニクスにわたる広範なアプリケーション期待される。現在、DRAM技術を相変化メモリ技術と融合させることにより(PRAM)、次世代超低消費電力メモリ技術開発などが進行している。

(参照:<http://www.elpida.com/ja/news/2005/02-03.html>)

またアンチモンテルルと呼ばれる半導体合金は相変化メモリの特性を示すことから、これを使ったチップは、現行のDRAMやフラッシュメモリ、ハードディスクに取って代わる可能性があると言われている。

一方で、不定形のビットをどのように結晶体に変えるかという技術的課題も残されている。一般に、相変化を起こす物質は、数ナノ秒間で摂氏数百度まで熱しながら(このためには大量の電気エネルギーが必要になる)余ったエネルギーが隣接するメモリー素子を変化させないようにする技術開発が必要である。

(参照:<http://headlines.yahoo.co.jp/hl?a=20050317-00000004-cnet-sci>)

さらにGe₂Sb₂Te₅(GST)を用い、メモリー・セルの加工時に生じるダメージの影響を受けにくくする工夫を施すことにより、メモリー機能の向上を図る技術開発も進展しており、低消費電力メモリーの開発方向を示すものと考えられる。

1.2 光学系/検出系

高NA化

光ディスクの面記録密度を決定している最も大きな要素は、再生時にレーザ光をど

ここまで小さく絞れるかということである。よく知られているように波長 λ の光を開口数 NA のレンズで絞ったときのスポットの直径 d は回折限界で決まり、 $d=0.6\lambda/NA$ で与えられている。 NA は、現在のCD等に用いられるレンズでは0.6程度であるため、 d は波長程度の値である。一方、記録の際には、同じ λ を使って上記 d より小さいピットを記録できる。それは、集光した光スポット内で温度の分布があり、相変化、光磁気ともにレーザ光強度がある閾値を超えた部分にのみ記録される。

光ディスクの面密度は原理的に $1/d^2$ で決まるので、近年開発された $\lambda=405$ nmの青紫色レーザを光源とし $NA=0.85$ の高 NA レンズを用いると $d=0.28$ μm のスポットに絞り込みが可能で、記録密度は約 8 Gb/in²になる。ROMの場合は、ピットの内外からの反射光の干渉でデータを読みとるので、ピット径は d の半分以下にできる。従って、トラックピッチを $d=0.28$ μm としピット長を $d/2=0.14$ μm とすると 16 Gb/in²以上の面密度が得られる。なお、RAMの場合はマークの直径は光スポットと同程度なので、記録密度は 8 Gb/in²程度である。相変化記録の場合、4層程度にまで多層化できるので、記録密度はこの層数倍となる。光磁気記録においても多層化技術が開発されており、少なくとも波長多重2層化については 20 Gb/in²程度の記録密度が実証されている。

(http://www.tuat.ac.jp/~katsuaki/optical_memory_&_magnetic_memory.doc: 農工大 佐藤勝昭氏参照)

一方、ニコンは位相シフト法、シュリンク (SHRINK: 変形照明法) などの解像力向上技術を実用化してきた。しかしながら、これらの技術においても遮断周波数に関する課題を克服することは困難であり、 NA を大きくする手法とは全く別のアプローチで解像限界を超えようとする技術として「超解像技術」を開発している。

(http://www.nikon.co.jp/main/jpn/profile/about/technology/nikon_technology/non_linear/参照)

PRLM (Partial Response Maximum Likelihood)

MRヘッドとの組合せで浮上した、Partial Reponse方式とMaximum Likelihood復号を組み合わせた信号識別方式のデータチャネル技術で、磁気ディスクや光ディスクの高密度化を図る再生信号処理方法の1つである。符合間干渉を意図的に与える方法によって波形を整えるPR方式と、データ間に相関をもたせて記録したデータの列から最も確からしいデータ列を検出するML方式を採用したデータチャネルで、1994年から複数の半導体メーカーがPRML信号処理LSIを出荷している。比較的低コストに面記録密度が高められるため、大手メーカーでの採用が相次ぎ、PRML信号処理を採用したハードディスクも登場している。米国ではQuantum社が1995年2月28日に発表したTrailBlazerやFireBallシリーズはPRML信号処理を採用している

(<http://www.jiten.com/dicmi/docs/p/9705s.htm>参照)。

一方、国内では日本電気(株)が、1つのヘッドで次世代DVD“HD DVD”、DVD、CDの3

種類のディスクに対応したハーフハイトサイズの光ドライブユニットを開発している。試作した3規格対応の光ドライブユニットは、3波長互換ピックアップと3世代互換のシステムLSIを搭載し、5インチハーフハイトサイズ(幅146×高さ41.2mm)に小型化するとともに、互換ドライブでの安定動作を図ったのが特徴である。3波長互換ピックアップは、光源に青色/赤色/赤外の3種類のレーザーダイオード(LD)を1つのピックアップに搭載したもので、ディスクの基板厚や波長の違いによる球面収差を、対物レンズの倍率を変化させることで補正し、また安定動作のために、HD DVD に対しては、PRLM(Partial Response Maximum Likelihood)を前提とした変復調方式(ETM)と、適応型PRML方式を利用することで、分解能低下に伴う振幅マージン劣化を補償し、DVD/CD に対しては、現行のDVD&CDコンボドライブのLSI技術とファームウェア技術を採用している。

二次元 VCSEL

二次元垂直キャビティ面発光レーザー(VCSEL: Vertical Cavity-Surface Emitting Laser)に関する報告は現在のところ、日本大学・後藤教授を中心に開発が進められており、近接場光を利用したヘッドの効率化に関する研究として、二次元アレイを用いた超並列ヘッドのデータ転送速度の超高速化を目指した検討を行っており、研究開発の動向が注目されている(http://goto.fc.u-tokai.ac.jp/data/vol12_05.pdf参照)。

DOE/HOE エラー検出系(NF)

精密光学素子である回折光学素子(DOE: Diffractive Optical Element)を用いたエラー検出系の開発は、ニコンで行われている例が挙げられる。一般のレンズでは屈折現象を利用して光の進行方向を変えるのに対し、「DOE」は、光の回折現象を利用して光の進行方向を変える特徴を有している。「DOE」の中でも最近特に注目を集めているのがブレード型の回折光学素子である。「ブレード型回折光学素子」には、「入射する光の全てを、特定の方向(特定の回折次数)にだけ集中できる」という優れた特徴を有している。DOEは今後、情報通信(IT)分野、とりわけこれからますます普及し発展する光通信分野向けに応用研究が進んでいくことが期待される

(http://www.nikon.co.jp/main/jpn/profile/about/technology/nikon_technology/opt_elements/参照)。

ナノ加工近接場光プローブ (NF)

現状の光メモリ大容量化技術では、光の回折限界以上の高記録密度を達成することは困難であるといわれている。そこで、この回折限界の課題を解決する手段として、「ナノ加工近接場光プローブ (NF)」が検討されている。

これまで、近接場光顕微鏡を用い、微小開口を備えたファイバースコープによる各種光記録媒体への近接場光による記録再生が報告されている。しかしながら、このようなファイバースコープを用いた場合、プローブが媒体上を走査する速度が遅いという問題がある。この問題を克服し、さらなる記録・再生速度の高速化を目指すため、近接場光プローブを平面型のスライダ上に形成し、高速に回転する光記録媒体の表面上を滑らせ記録再生を行うシステムが提案されている。リコー研究開発本部中央研究所は新たに半導体バッチプロセスを利用した干渉露光法による微小開口プローブを備えたスライダ作製方法、及びプローブから照射された近接場光を用いた相変化記録媒体への記録マーク形成の検討を行っており、今後も一層の研究展開が期待される

(http://www.ricoh.co.jp/about/business_overview/report/30/pdf/A3002.pdf 参照)。

焦点深度内薄膜多層化

深度の深さを利用して薄膜多層化技術を利用して大容量データを記録することを焦点深度内薄膜多層化とよぶ。

NTT が現在した 1GB のデータを記録できる切手サイズのプラスチック媒体インフォ・マイカ (Info-MICA : Infomation-Multilayered Imprinted CArd) は、「薄膜ホログラム原理」を用いて、プラスチック樹脂媒体に大容量のデータを記録したものである。最大の特徴は、25×25×2mm (縦×横×厚み) という小型・薄型の媒体に、1GB という大容量のデータを記録できることである。なお、2006 年までには同サイズで 10GB の記録が可能なモデルも実現可能で、研究所レベルでは 25GB モデルの動作も確認している。大容量を実現したのは「薄膜ホログラム」と呼ばれる原理であり、デジタルデータを二次元符号化し、それをもとに計算機ホログラム (CGH) の像を算出する。光を当てると、そのホログラム像が結像するような凹凸パターンを、厚さ 10 ミクロンの層内に成形する。これを重ねて作られる。再生時には媒体の側面から半導体レーザー光を入射する。すると、凹凸で散乱した光が重なり合い、レーザー光入射に対して垂直方向にホログラムの再生像が結像する。その像を CCD の映像素子で撮像し二次元複合、元のデジタル情報を復元するというものである (<http://www.watch.impress.co.jp/av/docs/20040212/ntt.htm> 参照)。

増強波プラズモン・ポラリトン技術

東京大学では、金属光導波路の研究として、誘電体光導波路の曲げ損失特性を改善し、高密度集積可能な光回路、光配線の実現を目指して、ストリップ型線路の金属表面を走

る表面プラズモン・ポラリトン (SPP) 波に焦点を絞り、損失特性、曲げ特性等の基本的な属性を理論実験の両面から検討し、金属光導波路の可能性を検討している。

(http://www.t.u-tokyo.ac.jp/research/2002/genkyo_f.html 参照)。

八井 崇氏らは、ナノ光導波路をより高効率で励起するためにフェーズドアレイ型のプラズモン・ポラリトン集光器を開発し、また、金属ナノドット列カップラーを作製し、金属細線よりも一桁高いプラズモン・ポラリトンの伝達を確認している。

東海大学・後藤教授らは、表面プラズモン・ポラリトンの応用による電磁波増強現象解析と近接場プローブアレイへの適用を検討している。FDTD 法による近接場プローブアレイへの適用により、2桁から3桁の電界増強効果が観察された。さらに、周期的な場においてはこの効果が顕著であることを確認した(波長 400nm 前後で発振する二次元 VCSEL アレイが開発されていないため、実験による実証は単一素子の場合に限られる) (http://www.jsps.go.jp/j-rftf/saishu/h13/k03_j.html 参照)。

． 1 ． 3 加工・精密マスタリング

光ディスク用相変化記録膜のナノパターン加工技術

日立製作所研究開発本部は、テラビット領域の ROM 型光ディスク (DVD や CD など) 実現に向けて、記録用ピットパターンのナノ加工技術の開発を行なった。本技術は、記録膜にレーザや電子線照射によって、結晶から非晶質 (アモルファス) に相変化する相変化記録を利用するもので、相変化領域のみ選択的にエッチングを行う "相変化記録膜の選択エッチング" により実現したものである。テラビット世代における ROM 型光ディスクの記録パターン加工技術として期待される。

本技術は GeSbTe (ゲルマニウム・アンチモン・テルル) を記録膜とする相変化光ディスクに、ビーム径 480nm のレーザ光で微小マーク (アモルファス) を形成した後、その試料をエッチング処理することにより直径約 40nm の凹凸パターンを作製するものであり、本技術が、加工ビーム径に対し十分小さなパターン形成が可能であることを示すものである。今後、電子ビームを用いることによりテラビットの記憶容量を超える直径 10 ナノメートル以下の微小なピットパターンを形成できる可能性があり、高密度化技術への対応策として期待される。

(参照: <http://www.hitachi.co.jp/New/cnews/031031.html>)

ナノインプリント

ナノメートルオーダーのパターンを形成した金型 (モールド) を、樹脂を表面に塗布した基板に押し付けることで、モールドに形成したパターンを基板に転写する技術である。従来の半導体露光技術は、光源をはじめ露光装置価格が高いこと、また転写したいパタ

ーン原盤となるフォトマスクの製造が年々難しくなっている上、製造コストも年々アップしていることなど課題が多い。その点ナノインプリント技術は、光露光における光源やレンズ光学系、あるいは EB における電子銃や電子光学系が不要であるため、低コストのリソグラフィプロセスを実現できる。そのため、将来のリソグラフィ技術の有力候補として注目を集めている。現状では、モールドのプレス後に紫外線（波長 300～400nm）を照射して樹脂を硬化させる手法がとられているが、近接場光を光源とするナノインプリント技術の開発も着手されるなど、ナノ加工技術として進展が期待される。

自己組織化

米 IBM は、分子の自己組織化現象を応用して半導体メモリー素子を製造する手法を開発している。同社は既存の半導体製造装置を使い、自己組織化を利用して、直径 200mm のシリコン製ウエーハ上にフラッシュ・メモリーと同じ働きをするナノ・スケール構造を作り出したもので、ナノ・スケール結晶によるメモリーを作るのが現在の手法では難しいのに比べ、自己組織化を利用すると、フラッシュ・メモリー半導体素子を、はるかに簡単に製造できることから、非駆動型メモリーの新たな製造方法としての可能性があると考えられる。

(参照：<http://itpro.nikkeibp.co.jp/free/ITPro/USNEWS/20031209/3/>)

ナノリソグラフィ

現在、NTT ではナノメートル(nm)レベルで試料の 3 次元加工が行なえる電子ビーム(EB)リソグラフィシステムを開発している。この技術は EB リソグラフィ装置に、試料を回転駆動するシステムを組み込んだもので、共焦点レーザー顕微鏡を利用し、試料で反射したレーザー光の強さから高さを割り出す仕組みで、高さ精度を 1～2 マイクロメートル(μm)に抑えた点に新規性がある。XY 方向の位置決めは、試料の下に透過電子検出器を置き、EB に対する試料の影を計測することで試料の輪郭位置を検出、20～30 ナノメートルの精度で位置決めが可能になったとしている。この技術はナノスケールでの微粒子の配列等への応用が期待でき、デバイス作成上重要な技術になるものと考えられる。

(参照：<http://biz.ascii24.com/biz/news/article/2004/02/02/print/648027.html>)

1.4 駆動系

シークタイム

シークタイムとは、ヘッドが目的のトラックに移動する時間である。よく最大、平均、最小の 3 つがカタログスペックとしてあらわされる。最大シークタイムとは、最外周が

ら最内周に移動する時間、一方の最小シークタイムは、隣のトラックへ移る時間で、平均シークタイムはその平均ということになる。普通は平均シークタイムが代表するが、それ程あちこちにデータが散在しているとも思えないことから、最小シークタイムが重要であるといわれている。

ハードディスクによって異なるが、最小シークタイムは0.7msec～3msec程度である。シークエンシャルリードの場合、7200rpmで1周8.33msecであり、8msecデータを読んで、1msecシークという休みが入ることになる程度であり、シークタイムがそれ程影響することはないと考えられている。しかしランダムリードの場合、非常に頻繁にシークが発生するため、その短さは重要である。さらに回転待ち時間は1シークあたりにかかってくる時間であることから、同様に無視できない数値である。5400rpmの場合、平均回転待ち時間は平均シークタイムに近く、最小シークタイムより長い(<http://nobumasa-web.hp.infoseek.co.jp/hdd/hdd.html> 参照)。

2000年には、米国のSeagate社が、15,000RPM、シークタイム3.9msの世界最速HDD「Cheetah X15」の開発に成功している。Cheetah X15は、回転数が毎分15,000回転であるほか、平均シークタイムも3.9msと高速で、最大データ転送速度は48MB/秒を実現している。同社では「15,000回転/分のHDDは世界初で、世界最速のHDD」としている。4/8MBのキャッシュオプション、Ultra160または、2Gbit Fibre Channel インターフェイスを搭載する。クーリングや消費電力は、10,000回転/分のCheetahと同じ環境で稼動するので、既存のインフラを変更することなく、置き換えが可能という特徴も有している。(<http://www.watch.impress.co.jp/pc/docs/article/20000224/seagate.htm>)

超精密サーボ技術

本編にこれまでの技術開発動向を詳述した。ここでは各学会等における本技術に対する取り組み状況をまとめて示す。マスストレージに必要とされているヘッド位置決め系の高速化かつ高精度化の課題に対応して、電気学会では平成11年6月から平成13年5月にかけての「マスストレージシステムのための新しいサーボ技術調査専門委員会」、また平成13年10月から平成15年9月にかけての「マスストレージシステムのための超精密超高速サーボ技術調査専門委員会」にて、マスストレージシステムにおける制御系の実状やそれらが抱える問題点の洗い出しを行ってきている。

これらの活動において、マルチレート制御、サンプル値制御、2段アクチュエータ制御方式、ヘッド移動時の目標軌道生成、および機構系の振動特性を考慮した統合化設計などに関連した制御手法について調査を行い、最新の制御理論を適用することによって位置決め精度やシーク時間などの性能の向上がはかられ、実用化が進んでいることが明らかになった。一方、マスストレージシステムの記憶容量は今後もさらに増加し、要求される位置決め精度もより厳しくなることが明示された。また、コンピュータの外部記

憶装置が主流であった磁気ディスク装置が、本格的にオーディオビジュアル機器に搭載されるようになってきており、用途や市場の拡大によって生じたさまざまな新たな課題に対応したサーボ手法の確立が必要であることも明らかになった。

以上を背景として、本委員会では、マストレージシステムにおけるサーボ系のさらなる性能向上を目指し、新たな制御理論の応用可能性、センサ、機構系を含めた制御システムとしての最適設計、および各種精密機器を比較調査することによるナノレベルでの超精密位置決めサーボ技術の調査を行うことにより、コンピュータ以外の市場展開も考慮したマストレージの次世代サーボ技術の調査を行っている。

マストレージシステムの代表的な製品である磁気ディスク装置は、2002年に全世界で約2億2000万台出荷された。これらは、情報ネットワークシステムの整備や普及、モバイルやウェアラブルタイプといった携帯型コンピュータの市場拡大、および情報家電市場分野の普及などの需要予測により、今後も年率10%以上の伸び率が予測され、2005年には3億台に到達すると予想されている。一方性能に関しては、磁気ディスク装置では継続的な記録密度の向上が続き、現在のトラックピッチは0.25 μm 程度であり、要求位置決め精度は30nm以下のサブサブミクロン領域に達し、個々の誤差要因では、ナノメートルレベルの振動低減が要求されている。

さらに最近では、2.5インチ磁気ディスク装置では、ノートPCなどモバイル環境での使用頻度の拡大により外部振動や衝撃に対する耐力の向上が求められており、一方3.5インチ磁気ディスク装置では、ネットワークコンピューティングにおける膨大なデータハンドリングに対応してデータ処理速度の向上が求められ、ディスクの回転数やシークタイムの性能向上が要求されてきている。現在の回転数は、最高で15,000rpm、シークタイムは4ms以下であり、外乱抑圧性を高めるための閉ループサーボ帯域は約3-4kHz程度である。実環境下で、しかもモバイルなどの厳しい使用条件のもとで、ナノメートルレベルの振動低減と、ミリ秒の高速アクセスを両立させるための制御技術は、他の分野に比べ、大変特徴のある技術であると言える。なお磁気ディスク装置の制御研究に関しては、国内では企業における研究開発が主体であるが、海外特に米国では、産学協同体制がより進んでおり、たとえばカリフォルニア大学バークレー校コンピュータメカニクスラボ、カーネギーメロン大学のデータストレージシステムセンタなどで磁気ディスク装置関連技術の研究が行われ、ヘッド位置決め制御の研究も盛んに行われている。(http://mizugaki.iis.u-tokyo.ac.jp/mss/prospectus/prospectus.pdf 参照)。

BD/HD 互換

() 2 レンズ方式

コニカ・ミノルタにおいて1レンズ方式に関する報告がある。HD DVD/DVD/CD 互換ピックアップ装置として、1レンズ方式および先述した2レンズ方式が考えられている。

1 レンズ方式については、 で記述する。2 レンズ方式は、1 つのピックアップ装置に 2 つの対物レンズを配置するものであり、対物レンズのチェンジャー機構が必要となる分、ピックアップ装置は大きなものとなり、コストアップする要因となる。アクチュエータがチェンジャーを兼ねる場合には製造が困難であることが予想され、コニカ・ミノルタにおいては、1 レンズ方式を採用する傾向が強い (http://konicaminolta.jp/about/research/technology_report/2005/pdf/treatise_006.pdf 参照)。

() 倍率変換方式

倍率変換方式として 2 レンズ方式、1 レンズ方式などが考えられている以外には目立った方式は、現在までのところ見当たらないのが現状である。

() NA 制御方式

「NA 制御方式」という言葉は現在定着していないのが現状である。

㈱日立製作所と旭ペンタックス㈱は、両面記録容量 100Gb t の次世代 DVD 用光ヘッド技術を共同で開発している。日立が開発した自己補正型光ヘッド制御方式は、高密度 DVD の厚みむら、傾き、光学部品のわずかな調整ずれ、温度や湿度の変化で生じる経時的なずれによって生じる光スポットのゆがみを補正する技術を開発した。一方、旭ペンタックスにおいては、ガラスモールドによる高分解能対物レンズを開発し、両技術を融合したものである。

(iv) 1 レンズ方式

コニカ・ミノルタにおいて 1 レンズ方式に関する報告がある。HD DVD/DVD/CD 互換ピックアップ装置として、1 レンズ方式および先述した 2 レンズ方式が考えられている。1 レンズ方式では、3 つの波長の光が同じ互換対物レンズを通して光ディスク上に集光する。このため、対物レンズの設計によりピックアップ光学系構成が決定され、対物レンズがピックアップ光学系の鍵となる。対物レンズや対物レンズに入射する光の角度を変換するカップリングレンズ等の開発には困難を伴うことが予想された。しかしながら、2 レンズ方式に比べて、部品は作製しやすく、コンパクトかつ低コストピックアップ装置として期待できる 1 レンズ方式を目指して互換対物レンズを開発している

(http://konicaminolta.jp/about/research/technology_report/2005/pdf/treatise_006.pdf 参照)。

() 3 波長レーザ

いまだ「3 波長レーザ」に成功している報告はない。2 波長レーザは、国内では、松下電器産業株式会社が DVD-ROM・プレーヤー装置の光ピックアップ用として、DVD/CD 各種光ディスクの再生を可能にする 3 ビーム方式を採用し、半導体レーザおよび受光素子、信号処理回路を一体集積した 2 波長レーザ搭載ホログラムユニットを業界で初めて開発に成功したと報告している

(<http://panasonic.co.jp/corp/news/official.data/data.dir/jn020912-2/jn020912-2.html> 参照)。

(vi) NA 可変レンズ

長岡技術科学大学などにおいて、液晶光熱レンズによる全光焦点可変レンズの解析に

取り組んでいる研究例が見受けられるが、現在、「NA 可変レンズ」という言葉はあまり定着しておらず、ほとんど情報が存在しないのが現状である。

(vii)液体レンズ

液体レンズとは、光学レンズの物理的な位置を動かさずに倍率と焦点を変えられるレンズのことである。これは透明な円柱形の容器に電解水と油を入れ、電導性のある電解水に電圧をかけることで電解水の形状を凸型や凹型に変えることができる。ここに光を入れてレンズとする。原理は表面張力をうまく利用し、電圧によって電解水の中のイオンが反対の極性の電極に寄ってくることで電解液の形状が凸や凹に変わる。電解水としては食塩水が用いられている。電極にはITOなどの透明電極を用い、電氣的にレンズの形を変えるため、繰り返し寿命は無限に近く、100万回の繰り返しテストにもびくともしないといわれている。駆動電力は10mW以下で、印加電圧は0Vから4Vの範囲。レンズの焦点距離は5cmから無限大の範囲で変えられる

(http://www.designnewsjapan.com/news/200411/16part_samsung041112.html 参照)。

上述した技術は、韓国サムスン社が開発したものであり、同様な液体レンズを蘭フィリップス社も開発していたが、サムスンは独自開発で、特許には抵触しないと言っている。さらに、仏Variopticも液体レンズを開発しており、主にカメラ付き携帯電話向けに開発した技術で、2006年末の市販化を目指している。Varioptic社の液体レンズは、円筒(レンズホルダー)内に電導性の水溶液と非電導の油を封止し、水に電圧を加えることで水と油の境界面を変化させるものである。境界面が膨張すると曲率が大きくなり焦点が移動、フォーカスとして使用するというものである。同社では「Electrowetting」とよんでいる。必要電圧は40V程度で、研究開始の当初は250Vを必要としたが、現在は40V以下の目処も立っているという。同社は、従来のAF付き携帯電話向けカメラモジュールに比べて、ステッピングモーターなどの可動部品がないため堅牢性に優れることを強調している。また、小型化できることや高速なAF動作、従来比50%程度のコスト安、低消費電力を特徴として挙げている(<http://www.varioptic.com/en/>参照)。

超並列ヘッド

東海大学において、近接場光を利用した高密度光記録ヘッドの研究が行われている。垂直共振器表面発光半導体レーザー(VCSEL)の二次元アレイを用いて超並列ヘッドによるデータ転送レートの超高速化(10Gbps)を狙っているものである。しかしながらVCSELは各レーザ出力が1mWと低いため、近接場光であるエバネッセント波への変換効率をきわめて高く(10%程度)しなければならない。そのため、直径10 μ mのマイクロレンズアレイ、レンズの焦点位置に近接場光開口位置を合わせるセルフ・アライメント技術を開発した。その結果、1%の変換効率を達成した。しかしながら、この値を増大させるために、金属薄膜に幅10nmで深さ30nmのグレーティング溝を形成することにより、さらに12~20倍のエバネッセント波増強効果が得られることを時間領域差分(FDTD)法によっ

て確かめられている (http://goto.fc.u-tokai.ac.jp/data/vol12_05.pdf 参照)。

波長可変光源 (増強波プラズモン・ポラリトン技術、超微細記録ビット)

NEC は 2004 年 9 月 9 日に以下の波長可変光源を開発したことを報告している。IP 基幹網に用いられる波長多重(WDM)通信システムのキーデバイスである、光ファイバアンプの波長帯域をカバーする波長可変光源を開発した。従来の波長可変光源は構造が複雑なため小型化・量産化が困難でした。当社は独自の平面光回路(PLC)技術を用いて、小型で量産性に優れた波長可変光源を実現することに成功した。

これまで波長多重通信システムには、波長毎に用意された光源、あるいは 4-8 波長をカバーする 3nm 程度以下の狭い範囲の波長可変光源が使用されていた。しかし通常、波長多重通信システムは光ファイバアンプの 32nm 程度の帯域内に 40-80 波もの波長信号を束ねるため、多くの波長の光源が必要となり、また、ネットワーク障害時の予備用光源も数多く用意せねばならない問題があった。また、近年ネットワークの柔軟性を高めるために、遠隔操作により各波長信号のルートを変える機能の要求が高まってきており、この点からも光ファイバアンプの帯域をカバーする広範囲の波長可変光源が望まれていた。これを実現するものとして、これまでにいくつかの波長可変光源が実現されているが、いずれも構造が複雑であり量産化が難しく、価格も高く普及に向けては量産化に適したデバイスの実現が切望されていた。

今回 NEC が開発した波長可変光源は、リング共振器を 2 つ設けた石英ベースの平面光回路と半導体光増幅器で構成されている。リング共振器は周期的なフィルタ特性を有し、2 つのリング共振器はわずかに異なった周期を持ち、一方のリング共振器にはヒーターが設けられている。この平面光回路と半導体光増幅器を組み合わせると 2 つのリング共振器の周期が一致した波長でレーザ発振が起こるが、ヒーターを用いて光導波路に熱を加えることで熱光学効果により一方のリング共振器の周期を変えることができ、これによりレーザ発振波長を変えることが可能となった。この構成により、光ファイバアンプの帯域幅を大きく上回る波長可変範囲 45.2nm、ファイバ光出力+4.7dBm と実用レベルの特性を実現している (<http://www.nec.co.jp/press/ja/0410/0405.html> 参照)。

2 1 Tbpsiを実現する技術スペック

前項において、1 Tbpsi実現のための現要素開発技術のトピックスを述べた。本項ではそのまとめとして、キーテクノロジーの現状と課題を述べる。

ストレージ構造	評価軸	1 Tbpsi実現に必要なブレイクスルー	技術スペック	技術課題
光系ストレージ技術	記録容量 転送速度 超寿命記録	光回折限界 容量、転送速度限界	<p>【近接場光】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・媒体技術 (ナノバターンメディア) 単一記録セルサイズ (~20nm) 実現 ・記録(書込み)技術 (プレーナ・プラズモンヘッド) スポット径微小化 (<20nm) ・評価(再生)技術 (偏光制御ヘッドシステム) 微小開口 (~20nm) ・ナノ加工精度 ・媒体加熱技術 <p>【多層記録】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・超多層化(数十層、一層あたり数百nm) <p>【ホログラム】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・多重記録(大容量化)、ページ読み出し(高転送レート) <p>【多値記録】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・十数レベルの多値化、読み取り信号処理 	<ul style="list-style-type: none"> ・低ノイズ、高熱安定性、サーボ信号制御 ・高効率、高分解能、高生産性 ・高C/N比、小型薄型化 ・ナノ加工技術、EBマスタリング、ナノインプリント ・Tbpsi級熱アシスト磁気記録方式への適用 ・2光子記録光源 ・電場印加 ・記録材料(波長特性最適化、高感度化) ・多層構造(アドレスフォーマット、プロセッシング方法) ・サーボ技術(多層アドレッシング) ・体積ホログラム記録(体積記録媒体、多重記録) ・薄膜光ホログラム(ROM型メモリの大容量化、書込み可能媒体材料の開発) ・多元系結晶化多値化技術、記録径差方式、マーク変調方式、相変化ディスク

				<p>【Super-RENS】 →</p> <p>・記録スポット径微小化、高開口数 (NA)</p>	<p>・短波長レーザ技術、駆動パワー低減、RAM, ROMへの適用</p>
磁性系ストレージ技術	記録	高記録密度 高熱安定性	熱ゆらぎ限界 記録磁界強度 限界	<p>【垂直磁気記録方式】 →</p> <p>~0.5Tbpsi ・2.4テスラ以上BS</p> <p>【パターン媒体記録】 →</p> <p>~1Tbpsi ・単一磁区微粒子</p> <p>【熱アシスト記録方式】 →</p> <p><2Tbpsi ・加熱方式</p>	<p>・高磁界強度材料、人工原子格子</p> <p>・記録膜結晶粒の微細化 (nm以下)、信号雑音比の確保、ディスクリット媒体記録方式</p> <p>・SIL、近接場光、光導波路融合化、過熱方式、共用ヘッドスライダ</p>
	再生	狭トラック幅 高出力 高記録能力	再生感度限界	<p>【CPP-GMRヘッド】 →</p> <p>~0.6Tbpsi ・狭トラック化</p> <p>【スピントロニクスヘッド】 →</p> <p><2Tbpsi ・高MR (1000%超)</p>	<p>・高出力化 (MR比、R・A向上)、磁性金属材料によるスピン依存散乱増大、スピンバルブ構造、熱的・電氣的信頼性、Spin Transfer Induced Noiseの制御、NOL内部のメタルパス形状・個数の制御</p> <p>・スピン注入素子、スピントロニクス素子、パリスティックMR, スピンホールMR, スピントランジスタ技術、ヘッド構造</p>

あとがき

本報告書は、1998年の光テクノロジーロードマップ（情報記録分野）報告書に引き続き光情報記録テクノロジー策定に的を絞って審議を進めてきた内容について報告書としてまとめたものである。

委員会では2010年代から2020年代に来る超大容量ストレージ時代の情報環境とIT世界像を描き出し、その上でテラからペタ級ストレージ実現までの光テクノロジーロードマップを提言した。現在ペタバイト級ストレージ実現に向けた現実的な取り組みは無く、8つの新たなメモリ方式を提案したが、実現に当たってはサイエンスに立ち戻っての研究開発が不可避と思われる。

今後、内外の有識者や関係研究・技術者の方々からのご意見を拝聴し、さらに内容の充実を図っていきたい。

（大津 元一）

————— 禁 無 断 掲 載 —————

情報記録テクノロジーロードマップ
報告書

発 行 2006 (平成18) 年 3 月
編集・発行 財団法人 光産業技術振興協会
〒112-0014 東京都文京区関口一丁目20番地10号
住友江戸川橋駅前ビル7階
電話 (03) 5225-6431