

半導体不揮発性メモリの技術動向と展望

Trends in Semiconductor Nonvolatile Memories and Toshiba's Approach

大島 成夫

■ OHSHIMA Shigeo

NANDフラッシュメモリに代表される大容量不揮発性メモリは、携帯機器の外部記憶装置として市場を広げ、今や生活のあらゆる領域で活用されていると言っても過言ではない。

東芝のメモリ事業は、NANDフラッシュメモリを大きな柱として成長し、フラッシュメモリの発明者として常に最先端の技術をリードしてきた。今後、微細化の限界への挑戦は困難を極めるが、技術の蓄積と新たなイノベーションによりこれを克服していく。同時に、きたるべきNANDフラッシュメモリの物理的限界に備え、新規の3次元不揮発性ストレージメモリの技術開発も急務である。また、不揮発性を生かした高速ランダムアクセスメモリとして、MRAM (Magnetoresistive RAM：磁気抵抗メモリ) の開発にも注力している。これらの新規メモリを含め、3年後、5年後を見据えた将来技術の研究開発も怠ることなく、微細化や大容量化とともに世界のストレージ市場をけん引していく。

Large-capacity nonvolatile memories, as typified by NAND flash memories, have been expanding the market for external storage devices for mobile products, and are utilized in all areas of people's daily lives.

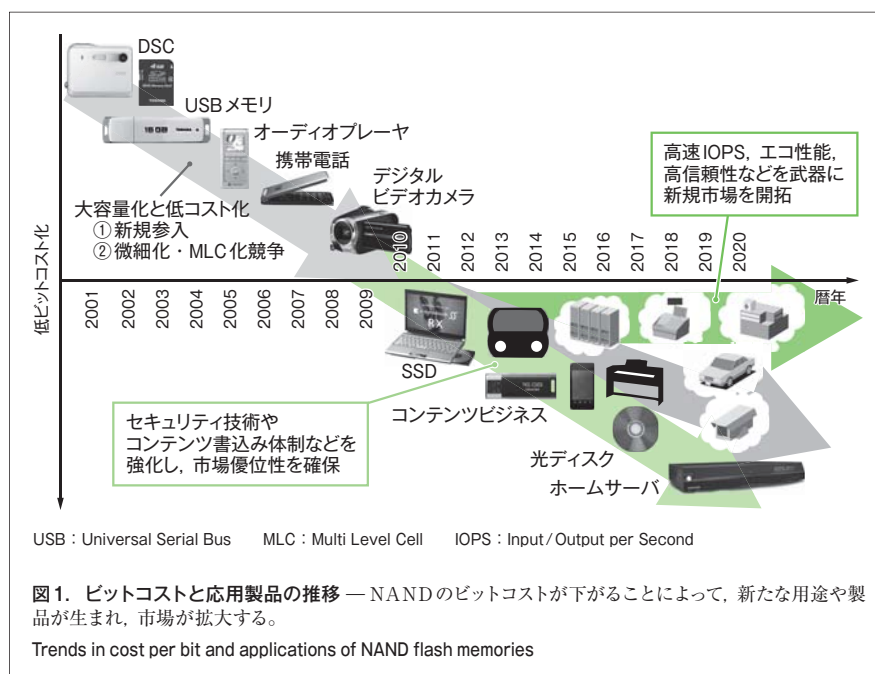
Toshiba's memory business has been achieving successful growth, and we have consistently realized innovations in various leading-edge technologies as the inventor of flash memory. Although the challenges over the physical scaling limit will become steep, we are aiming to overcome such issues by making use of our long-accumulated experience and record of innovations. We are also engaged in research and development for future technology breakthroughs, including innovative post-NAND nonvolatile memories, thereby maintaining our technical leadership in the world storage market.

フラッシュメモリの市場動向

半導体不揮発性メモリを代表するNANDフラッシュメモリ（以下、NANDと略記）について、その市場動向を述べる。

1990年代前半に現在の仕様のNANDが登場し、同年代半ばからDSC（デジタルスチルカメラ）が急速に普及したことで、最初の大市場となった。それから15年以上が経過し、フラッシュメモリを応用したストレージ市場はますます多様化と拡大が進行している。応用分野の拡大がNANDの低コスト化を後押しし、また、NANDの低コスト化が新たな市場創造に貢献する、まさに“正のスパイラル”が生じている。

パソコン（PC）をターゲットとしたワーキングメモリであるDRAMと異なり、容量、価格、及び性能が合えば、引き続き多様な応用市場を生むことができる。



東芝は、製品ポートフォリオの拡大と、きめ細かい対応により、市場でのリーダーシップを維持し強化している。

図1は、NANDの低ビットコスト化の流れと、それに伴い開拓し拡大してきた新市場や新製品との関係を示してい

NANDフラッシュメモリのソリューション

本文では全てを紹介できなかったが、当社は、NANDフラッシュメモリ単体を用いて各種のソリューションを提供している。以下に、それらの代表例について述べる。

■ SLC NAND

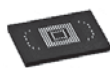
- 豊富なラインアップ
- 高性能及び高信頼性



- 中容量(512 Mビット~4 Gビット) 充実したパッケージラインアップと長期サポートで産業機器分野にも対応
- 大容量(8 Gビット~) 最先端のNANDプロセス技術の採用で大容量化を実現

■ コントローラ搭載 MLC NANDソリューション

- 大容量ストレージ
- ECCとデバイス制御を内蔵コントローラがサポート



- e-MMC™(注1) 東芝製の最新コントローラ技術を採用。JEDEC/MMCA規格に準拠したインタフェース
- SmartNAND™ 標準NANDインタフェースに対応。最先端プロセスによるMLC NANDを搭載

■ SDメモ리카ード

- 広範囲な用途のメモ리카ード



- SD/SDHC/SDXCメモ리카ード DSCでの撮影や動画の撮影に適したスタンダードタイプから、高速データ転送を実現した超高速タイプまで幅広いラインアップ
- 新世代の高速SDバスインタフェース UHS-Iに対応した製品を量産中

■ SSD

- 高速性と耐振動性を生かした、HDDに代わるストレージデバイス



- 最先端プロセスのMLC NANDと最新コントローラ技術を駆使。HDDではカバーできない性能、機能を備えたストレージデバイス

■ MCP

- 最新のMCP実装技術を駆使



- 限られたスペースに実装する必要がある携帯電話など、モバイル機器のニーズに対応

SLC : Single Level Cell
ECC : Error Check and Correct
JEDEC : Joint Electron Devices Engineering Council (電子デバイスの標準化団体)

MMCA : MultiMediaCard Association (メモリアカードの標準化団体)
UHS : Ultra High Speed
MCP : Multi Chip Package

エコロジー、高速化、そしてクラウド化へのNANDの対応

前述のとおり、2010年以降、エコロジーや高速化といった社会インフラのニーズに誘発された、新しいフラッシュメモリの市場が拡大している。これに最適なストレージの形態がSSD（ソリッドステートドライブ）である。

SSDの外形（フォームファクタ）や電気的インタフェースは既存のHDDと同じであるが、データストレージ部が磁気ディスクの代わりにNANDで構成されている。

SSDの高速性、低消費電力、及び高信頼性は、今後市場規模の急拡大が予測されるクラウドコンピューティングに不可欠であり、SSD搭載ノートPC、HDDとSSDのハイブリッド化、及びサーバ向けSSDなど様々な用途が考えられ、トータル容量は年率100%で伸張していくことが期待されている（図3）。

SSDは、クラウドコンピューティングを可能にする技術要素を全て兼ね備えている。すなわち、サーバストレージ側で

る。新たな応用を生むうえでビットコストの追求は必須である。一方で、エコロジーやデータアクセスの高速性といった社会インフラのニーズにより、2010年頃から従来にない新規のストレージ市場を開拓する機会が現れ、フラッシュメモリは今以上に重要なデバイスとなっていくことが期待される（囲み記事参照）。過去10年間でNANDの年間のビット伸長率（CAGR）は150%以上を記録し、DRAMやHDD（ハードディスクドライブ）の40~50%をはるかに上回っている。

デジタル化とネットワーク化の進展に伴い、人類が生成し蓄積する情報量は加速度的に増加していく。人口の増加、センサやネットワークの増加、セキュリティ・信頼性・プライバシーの確保、クラウド化、及びスマートグリッド化が全て加速要因となり、これを支えるストレージデバイスの容量は追いつくことができないと予測されている。図2は、今後人類が生成し蓄積する情報量と、ストレージ市場全体を予測したものであ

り、情報の生成量は2011年時点で既に1,800 E（エクサ：10¹⁸）バイトに達したと言われている。

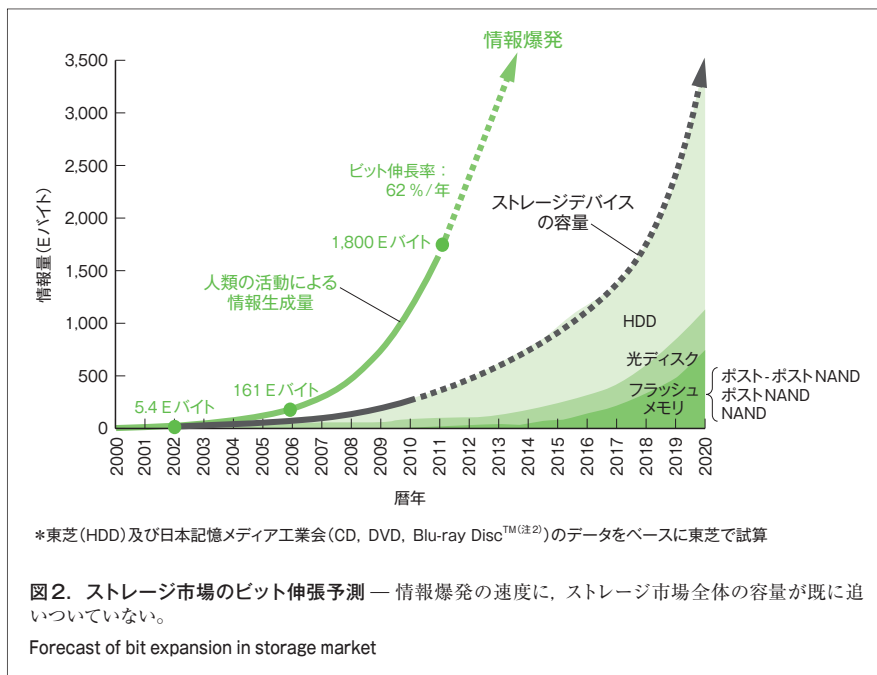
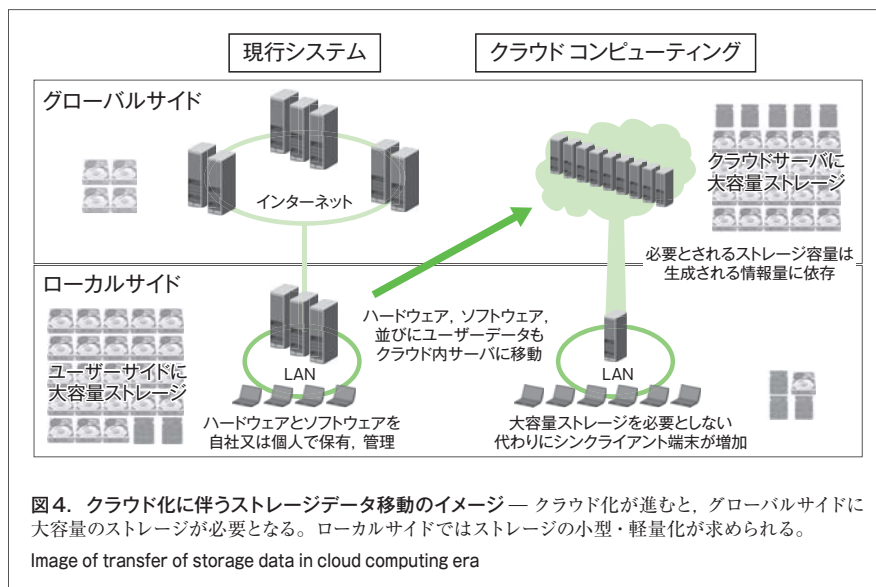
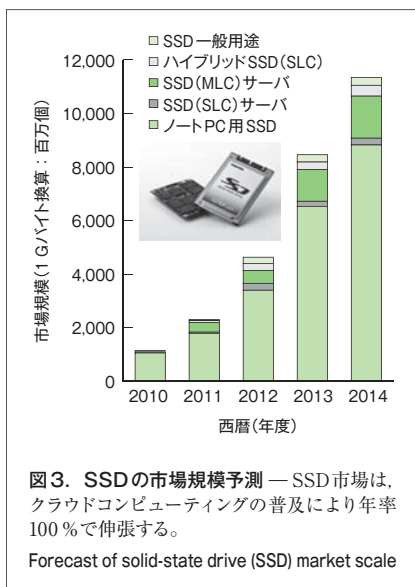


図2. ストレージ市場のビット伸張予測 — 情報爆発の速度に、ストレージ市場全体の容量が既に追いついていない。

Forecast of bit expansion in storage market

(注1) e-MMCは、JEDEC Solid State Technology Associationの商標。
(注2), (注4) Blu-ray Disc™ (ブルーレイディスク), Blu-ray™ (ブルーレイ)は、ブルーレイディスクアソシエーションの商標。



は、不特定多数のユーザーのリクエストを処理するための高速IO (入出力) 性能が求められ、HDDを性能で圧倒するSSDが必要不可欠になる。Gバイト当たりのコストではHDDが圧倒的に優れているが、サーバストレージに重要な、性能当たりのコスト (\$/IOPS (Input/Output per Second) のように表現) では、SSDがHDDを圧倒する。また既存のHDDのサーバストレージシステムでも、SSDをキャッシュ化したハイブリッドシステムであれば、SSDをアクセス頻度の高い最上位層 (Tier0) として用いることで、必要なパフォーマンスを維持しながら、導入コストやランニングコストを大幅に削減することが可能である。

クラウド化が進むと、クライアントユーザー側がローカルに保有管理していたソフトウェア及びユーザーデータが、グローバルネットワーク上のエンタープライズサーバに移動する。このため、ローカルストレージの大容量化は鈍化する可能性もあるが、当社は、アプリケーションソフトウェアの汎用化により需要は更に増加すると逆の予測をしている。かりにローカルストレージの大容量化が鈍化するとしても、容量以外の仕様、すなわちHDDが実現できない高性能化、小型・軽量化が重要な要素となる。昨今爆発的に市場に出回っているタブレットPC

は、その典型例と言える。図4は、クラウド環境によるストレージデータの移動をイメージで示したものである。

最先端のNAND技術とポストNANDの開発

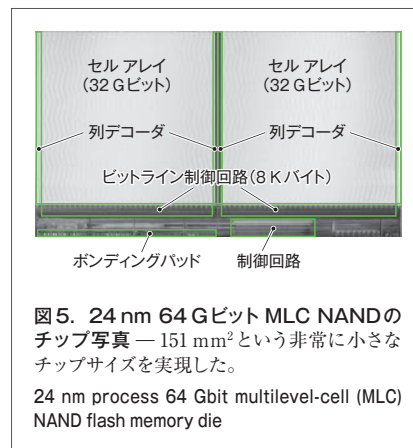
フラッシュメモリの微細化の限界が叫ばれて久しい。0.16 μm世代で他社に先駆けて2000年に開発したMLC (Multi Level Cell: 多値2ビットセル) により、NANDの容量は飛躍的に増加し、市場を広げていった。同時に、微細化に伴う様々な問題を、様々なデバイス開発のイノベーションで解決してきた。更に、高速プログラミングなどの回路技術と、ウェアレベリング (ブロックごとの書換え回数の平滑化) やECC (Error Check and Correct) といったコントローラ技術が、NANDの性能と信頼性を支えてきた。加えて、省スペースと大容量の両立に不可欠な、パッケージング技術の貢献もある。

これらの技術の集中により、NANDは40 nm世代で最初に限界説がささやかれたが、32 nm, 24 nmと微細化の限界を克服し、更に、20 nm以下の世代で再びささやかれる限界を打ち破るべく、絶え間ない技術開発を続けている。

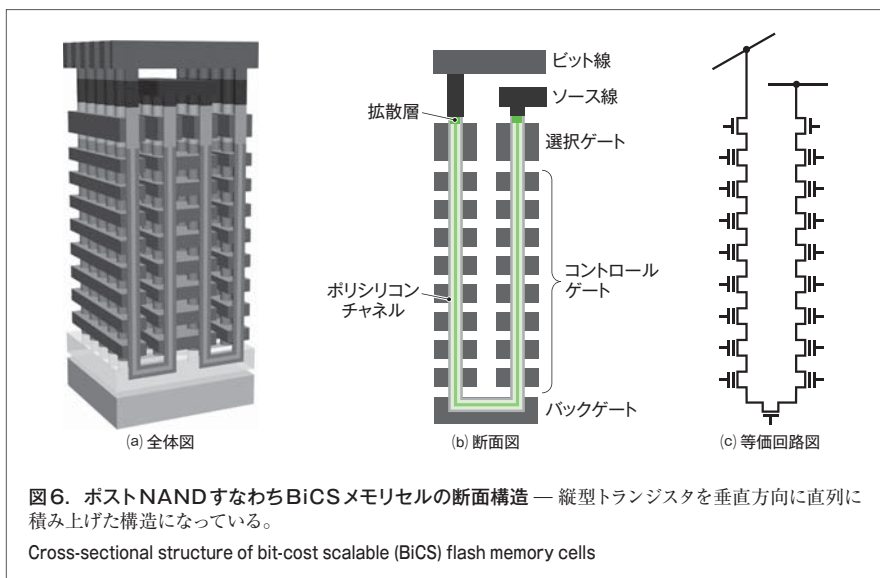
当社は2010年に、20 nm世代では世

界最小^(注3)となる64 Gビット NANDの量産化に成功した(図5)。当社は、デバイス、プロセス、及び回路にわたる技術の総合力により、前世代と同等の性能と信頼性を維持しながら2倍の容量を実現し、新たな市場開拓を始めている。

また、NANDの更なる微細化への挑戦が続けられている。コストを優先として基本的なフローティングゲート (FG) 構造を踏襲し、トンネル薄膜化限界を目指すとともに、新たな高誘電率材料の導入やセル間干渉効果の抑制など、NANDのテクノロジーリーダーとして更なる研究開発を進めている。回路技術でも、新たな高速書込み・読出し方法を導入し、更に、ECC能力を強化したコン



(注3) 2010年8月現在、当社調べ。



トローラ技術がこれを支える。当社は既に、次世代19 nmのNANDの開発に成功し、2011年第3四半期からの量産を目指している。

一方これに並行して、きたるべきFG構造セルの微細化限界に備え、NANDの次の不揮発性メモリ、すなわちポストNANDの研究開発も加速中である。当然ながらポストNANDも、大容量で低ビットコストの実現が最優先課題である。

現在、半導体メモリ各社が新構造の不揮発性メモリの研究開発競争を繰り広げているが、基本的なコンセプトは、2次元(2D)方向のリソグラフィの限界を緩和するための、3D立体構造のマルチレイヤ化、すなわち3Dメモリと称するアーキテクチャである。

当社は、3D不揮発性メモリの独自の構造を考案して他社をリードし、早期製品化を目指している。

当社の3D不揮発性メモリ BiCS (Bit Cost Scalable) フラッシュメモリ (以下、BiCSと略記) の基本構造を図6に示す。従来のNANDにおける平面上の微細化から、縦方向に集積することで、ビットコストの低減を目指す。

メモリの特性向上に加え、大容量化のキーとなるのが積層化技術の向上である。当社は、多くの技術的課題の克服による2年後の製品化を一大目

標に掲げ、開発を加速している。

MRAM：究極の不揮発性RAM

最後に、当社が開発している新たな不揮発性メモリ MRAM (Magnetoresistive RAM: 磁気抵抗メモリ) について述べる。

NANDは、SSD市場の拡大によりメモリ階層の最下層のHDDの一部を置き換えようとしているが、上層に位置するDRAMやSRAM (Static RAM) の置換えは性能面において困難である。一方、DRAMでも微細化の限界は例外ではな

く、また、リフレッシュ動作を含めスタンバイ時の電流は無視できない。

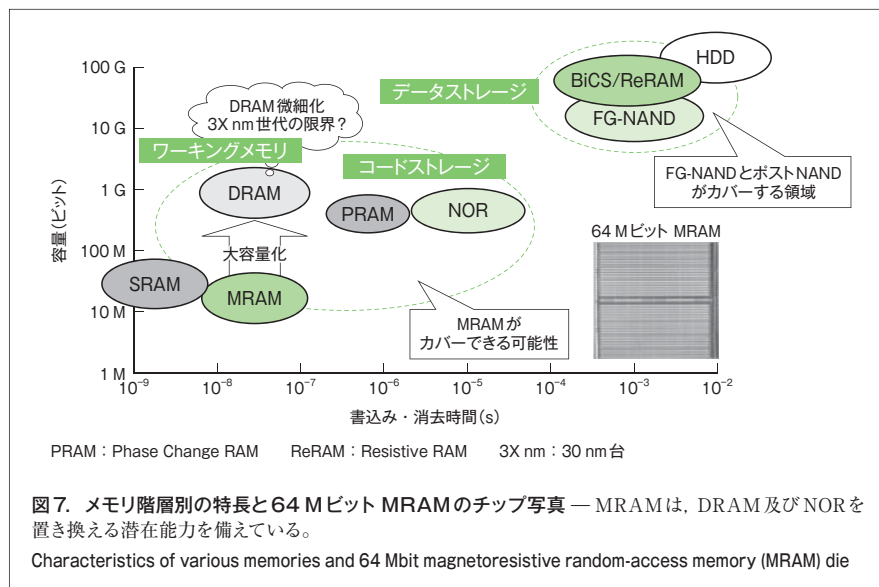
ストレージとしてのメモリの使い分けの主流は、DRAMをワーキングメモリ、NORフラッシュメモリ (以下、NORと略記) をコードストレージ、そしてNANDをデータストレージとする構成である。容量や性能など、ストレージとしてのそれぞれの長は大きく異なる。

MRAMの優位性は、不揮発性、低消費電力、高速ランダムアクセス動作、高書換え回数 (高信頼性)、更にスケールビリティである。

当社は、2007年に大容量化に適した“スピン注入書込み型 (STT-RAM)”のメモリセルに移行し、磁性体膜 (MTJ) 開発で先行している。DRAMの微細化が限界に到達した後、MRAMはその高速不揮発ランダムアクセス能力と低消費電力により、DRAMやNORを置き換えるポテンシャルが期待できる。これらのメモリの長である容量対書込み・消去時間をまとめたチャートと、2010年に発表した64 Mビット MRAMのチップ写真を図7に示す。

今後のメモリ開発への取組み

当社の半導体事業をけん引するNANDを中心に、ポストNANDやMRAMな



ど不揮発性メモリ技術の概要について述べた。また、ストレージデバイスの市場概況や今後の動向についても述べた。クラウド化により、情報量の伸張は更に進み、ストレージデバイスのビット伸張をはるかに上回ると予測され、NANDをはじめとするストレージデバイスの更なる需要を喚起することが期待できる。

これらを支える最先端の不揮発性メモリ技術の概要についても述べた。個々の詳細については、この特集の各個別論文を参照願いたい。

最初に、この論文でも述べたSSDの技術開発動向（この特集のp.7-11参照）についての論文を掲載した。当社の最先端のNAND技術をいち早く取り込んだSSDについて、高速化と高信頼性化を中心に、その技術の概要について述べている。

また、現在量産中の最先端24 nm技術を駆使した64 Gビット NANDの設計技術（同 p.12-15 参照）、ポストNANDの最有力候補として開発中のBiCS（同 p.16-19 参照）、及び当社が先行する大

容量化に有利な垂直磁化方式のMRAM（同 p.20-23 参照）の3件の論文を掲載した。

更に、これらの製品開発を支える共通技術についても論文を掲載した。NANDのメモリセルの信頼性でもっとも重要なパラメータであるデータ保持特性の評価技術（同 p.24-27 参照）、及びメモリ製品の後工程の主役であるパッケージング技術（同 p.28-31 参照）である。

メモリ事業の戦略は、全てにおいて、極めてシンプルで明確でなければならない。その第一は、言うまでもなく技術面での先行である。当社は、微細化の推進による技術の優位性を維持し、次世代の不揮発性メモリ開発でも他社に先駆けて技術をリードしていく。

一方、市場をリードしていくためには、生産能力の向上は欠かせない。積極的な投資によるコスト競争力の維持が、安定したシェアにつながる。

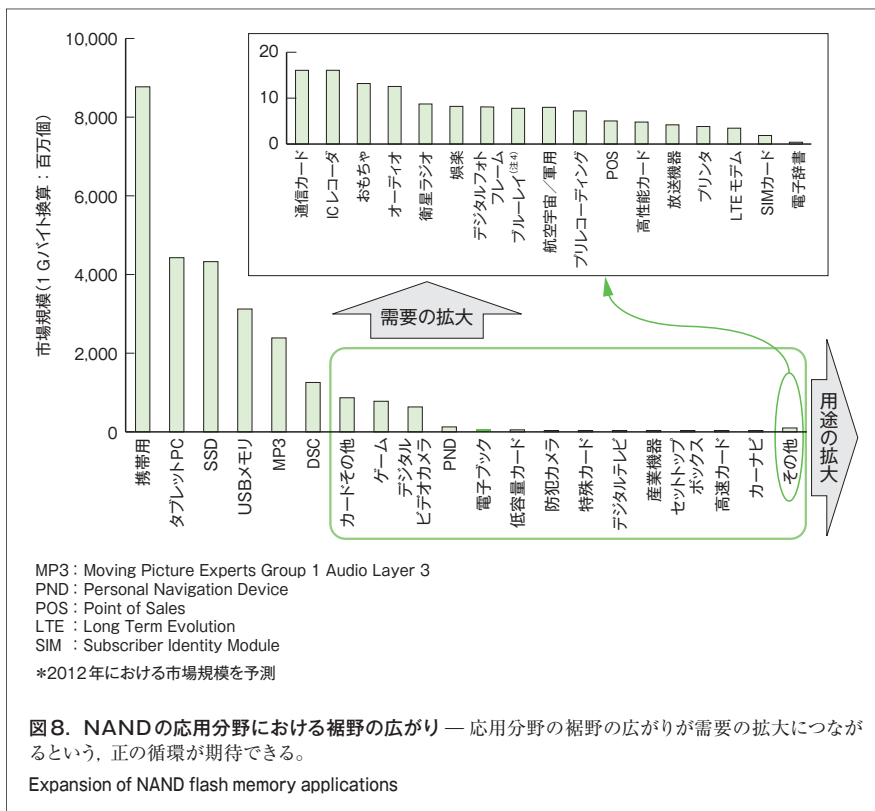
タイムリーな新製品の投入も必須の事業戦略である。フォームファクタやインタフェースなど、常に最新の仕様を取

込み、顧客に提供することが重要である。前者は各種のメディアカードやPoP (Package on Package)、後者は標準化への取組みやコントローラIP (Intellectual Property) の提供、更にソフトウェア開発などが当てはまる。

そして、重要顧客との緊密な協力関係の構築と継続が、最大のKey to successとなる。開発時点からの協業と最適なソリューションの提示により顧客の用途創出をサポートし、いわゆる“I Win-You Win”の良好な関係を確立することで、更なるビジネスの拡大が期待できる。

図8は、2012年におけるNANDの市場規模を予測したものである。従来からのアプリケーションの伸張とともに、アプリケーションの裾野の広がりが顕著になると予測されている。この裾野の広がりが新たな需要の拡大を生み、また新たなアプリケーションの拡大を生む。

当社は今後も、生産能力の拡大とたゆまぬ技術革新によりNANDの開発を推進し、SSDをはじめとするストレージソリューションの提供に貢献していく。更に、NANDの微細化の限界に備え、ポストNANDの不揮発性メモリの研究開発にも注力し、技術面で他社を一歩も二歩もリードすることで、市場における圧倒的な優位性を確立していく。



大島 成夫
OHSHIMA Shigeo

セミコンダクター & ストレージ社 メモリ応用技術師長。IEEE会員。
Semiconductor & Storage Products Co.