

《新メモリ登場の秘訣》

新メモリはいつ登場するのか？ 代替ではなく新市場創出が鍵



微細加工研究所 所長 湯之上 隆

現在量産されている主要メモリのSRAM、DRAM、NAND型フラッシュメモリ、NOR型フラッシュメモリには長所・短所があり、それぞれの特徴を生かした分野に棲み分けている。すべてに適應できるユニバーサルメモリは存在しない。また、PRAM、ReRAM、MRAM、SpinRAMなどの新メモリが主要メモリを代替する計画が発表されているが、筆者は懐疑的である。その理由は、新メモリが新材料を必要とすること、既存メモリの低価格化が劇的に進んでいることにある。新メモリ登場のヒントはNAND型フラッシュの歴史にある。NAND型フラッシュの成功要因は、書き換え回数や信頼性があまり問題にならず、小型・軽量という最大の特徴が生かせる「iPod」という新市場を創出したことにある。この結果、タブレット端末やモバイルPC用SSDへの道が開かれHDDを代替し始めた。つまり、新メモリ登場の秘訣は、破壊的イノベーションを起こす新市場を創出することにあると考える。

主要半導体メモリの長所と短所

現在、主要な半導体メモリには、キャッシュメモリとしてSRAM、メインメモリとしてDRAM、ストレージメモリとしてNAND型フラッシュメモリおよびNOR型フラッシュメモリなどがある（表1）。

フリップフロップによりメモリ動作を行うSRAMは、高速動作とランダムアクセスが可能で、書き換え回数は無限に近く、消費電力が低い。しかし、揮発性で、セルサイズが大きい。従って、PC用の

メインメモリには不向きで、CPUに内蔵されたキャッシュメモリなどに使われる。

キャパシタ絶縁膜に電荷を蓄積させるメモリであるDRAMは、（SRAMほどではないが）高速動作とランダムアクセスが可能で、書き換え回数は無限に近く、セルサイズは小さい。従って、低コスト化が可能であり、PCやタブレット端末など多くのPCに使用されている。しかし、リフレッシュ動作が必要、揮発性、やや消費電力が大きいという欠

表1 各種メモリの比較

（出所：角南英夫著「半導体メモリ」を参考に筆者作成）

	量産されている主要メモリ				新メモリ				
	SRAM	DRAM	NAND	NOR	PRAM	ReRAM	MRAM	SpinRAM	FeRAM
記憶動作 物理現象	フリップ フロップ	キャパシタ 充電放電	電荷捕獲	電荷捕獲	カルコゲナイド 相転移	電界誘起巨大 抵抗変化	磁気変化	スピントルク 転移	強誘電体 分極反転
セルサイズ	大 50~130F ²	小 4~8F ²	小 1~4F ²	中 10~20F ²	中 6~20F ²	小 4~6F ²	中 16~40F ²	小 4~6F ²	中 12~25F ²
動作速度	高速	中速	低速	低速	中速	中速	中速	中速	中速
ランダムアクセス			×						
不揮発性	揮発	揮発	不揮発	不揮発	不揮発	不揮発	不揮発	不揮発	不揮発
書き換え回数			少	少	少	少	多	多	多
消費電力	高	中	低	低	中	中	高	低	低
新材料	なし	高誘電体 キャパシタ	なし	なし	カルコゲナイド膜	強相関電子系膜	トンネル磁気膜	トンネル磁気膜	強誘電体膜
主な用途	キャッシュ メモリ	メイン メモリ	SSDなど ストレージ	携帯など ストレージ	?	?	?	?	ICカード

点がある。また、キャパシタがスケールリング則には従わないため、微細化に伴ってキャパシタ用に高アスペクト比のシリンドラを形成したり、高誘電率膜を開発したりしなくてはならない。その結果、最近では微細化の限界が近いと言われている。

量子トンネル効果により浮遊ゲートに電荷を蓄積させるNAND型フラッシュは、SRAMやDRAMと違って不揮発であり、消費電力もセルサイズも小さい。DRAMのようなキャパシタは不要なため、DRAMより微細化が進むと考えられている。大容量化と低コスト化が可能で、USBメモリや「iPod」などのオーディオ用メモリ、最近ではタブレット端末やモバイルPCのストレージメモリSSDとして使用されている。しかし、ランダムアクセスはできず、動作速度が遅く、書き換え回数には制限がある。

同じフラッシュメモリでもNOR型フラッシュは、NAND型フラッシュに比べて、高速、かつランダムアクセスが可能でデータの信頼性が高いが、微細化しにくい、集積度が劣る、書き込みが遅いなどの欠点が挙げられる。マイコン、ルータ、プリンタ、デジタルカメラ、GPS、車載機器、携帯電話やPDAなど、どれもHDDが使用できない環境でファームウェアの格納などに使われる。

ユニバーサルメモリは可能か？

このように、現在量産されている主要メモリには、長所と短所がある。そのため、それぞれの長所を生かし短所を無視できる分野に、棲み分けている。すべての分野に適応できるユニバーサルメモリは、残念ながら存在しない。

高速動作でランダムアクセスが可能、消費電力もセルサイズも小さく、従って安価で、書き込み回数も無限に近い上に、不揮発なメモリ。このようなユニバーサルメモリの実現は不可能なのだろうか？

例えば、1990年代中旬、筆者は日立製作所で強誘電体メモリFeRAMの開発にかかわった。FeRAMは、不揮発で高速動作が可能、消費電力も低い。従って、メモリサイズの微細化と書き換え回数が保証できればユニバーサルメモリになると、筆者などは夢見た。ところが、強誘電体PZTの挙動は厄介で、電極として用いるPtやIrは微細加工が極めて難しかった。その結果、書き換え回数や微細化でDRAMにはるかに及ばず、RFタグやICカードなどの限られた分野でのみの実用化に留まっている。

Teを含むカルコゲナイド材料の相変化をメモリ動作に利用するPRAMも、ユニバーサルメモリの候補に挙がった。2007年に米Intel CTO Ed Doller氏は、「まず、NOR型フラッシュを代替し、その後NAND型フラッシュを代替し、最終的にユニバーサルメモリを視野に入れる」と語っている¹⁾。そして、当時の発表では、Intelや韓国Samsung Electronicsなどが、2010年から300mmラインで大量生産を開始する計画になっている。しかし現状では、スイスNumonyx（現在は米Micron Technology）とSamsungがNOR型フラッシュを一部代替しているに過ぎない（ブレイクしているとは言い難い）。少なくともNAND型フラッシュの代替が実現したという話は聞かない。やはり、ユニバーサルメモリの実現は、非常に困難なのだ。

2007年当時の新メモリの計画

ユニバーサルメモリは無理としても、SRAM、DRAM、NAND型フラッシュ、NOR型フラッシュのいずれかを代替するメモリは、実現可能なのだろうか？ ちょっと意地悪だが、前掲の文献¹⁾で2007年当時の状況を振り返ってみよう。

磁気抵抗の変化を利用したMRAMの開発を行っている企業は、米Freescale Semiconductor、ルネサスエレクトロニクス、東芝、ソニー、NEC、米IBMなど多数あり、その中で、東芝が携帯電話用でNOR型フラッシュを代替し、ルネサスとFreescaleがデジタル家電や車載用でNOR型フラッシュを代替し、大規模生産する計画を発表している。

また、Intelは、携帯電話や家電のNOR型フラッシュをPRAMに、PCのNAND型フラッシュやDRAMをPRAMに代替する計画を発表している。同様に、Samsungも携帯電話のNOR型フラッシュを代替する計画だった。さらに、富士通は2006年に1億個/年だったFeRAMの生産量を、2010年にはデジタル家電向けに適用し、10億個/年に量産規模を拡大すると計画している。

しかし、これらはほとんど実現していない（と思われる）。つまり、主要メモリの代替もなかなか難しいということである。

現在の新メモリの開発状況

上記2007年の計画は、現在では、次のように修正されている（図1）²⁾。

まず、PRAM。2015年までにNOR型フラッシュを代替し、それ以降、NAND型フラッシュを代替するという。しかし、NAND型フラッシュの代替を具体的に計画している企業は書かれていない。

次にReRAM。2012年以降、マイコンとの混載によりNOR型を代替するとパナソニックが計画している。また、2013年以降に、エルピーダメモリがDRAMの代替として量産を計画しているとある。業界全体としては、2015年からNAND型フラッシュを代替すると予測されている。

さらに、SpinRAM。またの名をSTT-MRAM (スピントルクトランスファーマRAM)。東北大学の遠藤教授によれば、縦型構造MOSFETを有するSpinRAMは、SRAM、DRAM、NOR型フラッシュを代替する最も有望な候補であるという³⁾。

その言葉に裏づけられるように、SoCに混載するメモリの代替として、米QualcommとTaiwan Semiconductor Manufacturing (TSMC) が共同開発を進めており、2012~2013年の量産を目指しているという。

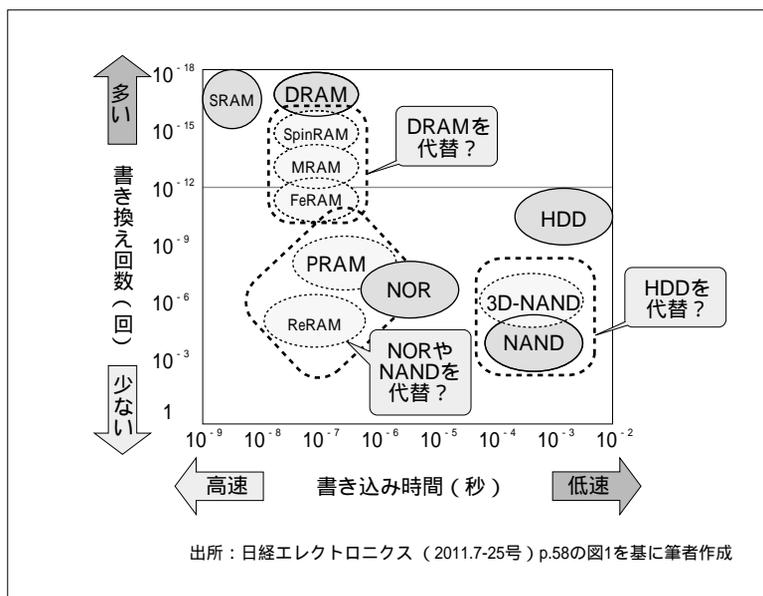
また、SRAMやDRAMの代替として、東芝と韓国Hynix Semiconductorが共同開発を進めており、2011年中にサンプル出荷、2014年にGビット品を量産する計画としている。

新メモリによる代替が進まない理由

筆者は、新メモリがSRAM、DRAM、NAND型フラッシュなどの主要メモリを代替することについて、非常に懐疑的である。少なくとも、上記のような計画通りにはいかないだろうと思っている。

その理由の1つは、ほとんどの新メモリが新材料を必要としていることだ^{4) 5)}。新材料をラインに導入し使いこなすには、多大な時間を必要とするのである。まず、開発ラインであっても、新材料を導入するには、毒性はないか、トランジスタに悪影響が出ないか、発塵の影響はないかなど、事前の準備とデリケートな運用が必要になる。

例えば、日立の開発ラインにDRAMの次世代キャパシタ電極候補としてRuを導入する際、毒性の



出所：日経エレクトロニクス (2011.7-25号) p.58の図1を基に筆者作成

図1 メモリの書き込み時間と書き換え回数

心配があったため、医大に委託してマウスの実験から開始した。その後、Ru専用の検知器を開発した。その上で、Ru専用の成膜装置、加工装置、洗浄装置などを開発し、開発ラインに取扱いのルールを定め、装置を導入し、やっと試作に漕ぎ着けた。

試作を開始しても困難は続いた。Ruは、酸化してRuO₂となっても導電性があり、電極として使えることは分かっていた。ところが、Ru電極を形成し、キャパシタを形成していく過程で、いつの間にか酸化すると膨張してしまい不具合を起こす。それならばと、最初からRuO₂を使うと、試作過程の還元雰囲気酸素を放出し、スカスカになってしまうのである。つまり、Ruは周辺に酸素があれば吸い、なければ吐き出す。呼吸をしているようなのである。この事実は、マウスの実験から都合2年が経過し、キャパシタの試作をしてみて初めて発覚した。そして泣く泣く、Ruの使用を断念した。

ルネサスは、車載マイコン混載用ReRAMのキャパシタ電極にRuを使うとしている。しかし、“Ruが呼吸する”経験をした筆者としては、特に信頼性がシビアな車載用にRuを使うなどと言われると、絶望的な気分になる。

“代替”という発想が問題なのでは？

しかし、新材料の問題以上に、「既存の主要メモリを代替する」という発想自体が問題なのではないかと、筆者は考える。

冒頭に書いた通り、SRAM、DRAM、NAND型フラッシュ、NOR型フラッシュは、それぞれの長所を生かした分野の棲み分けに成功している。特にDRAMやNAND型フラッシュは、大規模量産と激しい低価格化が進行し、ちょっとやそっとの理由では、新メモリが代替することはあり得ないように思われる。

例えば、DRAMは、揮発性、リフレッシュ動作が必要、30nm以降の微細化が極めて困難であるが、1GビットDDR3のスポット価格は、現在、何と0.6ドルである。たった50円なのである。

不揮発性のPRAM、ReRAM、SpinRAMが、どれだけ優れた特性を示そうとも、1個50円のDRAMを代替する可能性は極めて小さいだろう。

では、新メモリを開発する意味はないのだろうか？いくら開発しても徒労に終わるといふことなのだろうか？この問いに対しては、2000年以降にブレイクしたNAND型フラッシュの歴史に答えがある。

何故NAND型フラッシュはブレイクできたのか？

NAND型フラッシュは、87年に東芝に在籍していた舩岡富士雄氏が発明した。東芝関係者の話では、NAND型フラッシュの目標は、最初からHDDの代替、つまりSSDの実現であった。ところが、DRAMに注力していた東芝は、NAND型フラッシュに消極的であった。また、当初のNAND型フラッシュの書き換え回数では、SSDなど夢物語に過ぎない状態だった。従って、いつ開発が中止になってもおかしくなかったという。

ところが、2000年前後から状況が一変する。Samsungなど韓国勢の台頭により、日本はDRAMから撤退した。東芝も2002年に撤退し、DRAM以外へ目を向けざるを得なくなった。そして、それと同じ時期に、NAND型フラッシュはデジタルスチルカメラ、USBメモリ、オーディオ用ストレージへの道が開けていった。

筆者は、特に、米AppleのiPodへの搭載がブレイクへのキーポイントだったと考える。 $10^3 \sim 10^5$ 程度の書き換え回数では、いきなり、PC用のSSDに使用することには無理がある。しかし、オーディオ用途ならば、この程度の書き換え回数でも商品化が可能である。

つまり、NAND型フラッシュは、書き換え回数や信頼性ではHDDより劣るが、小型化や軽量化が

可能であり、この特徴を生かしたiPodという新市場を創生するのである。これはまさに、クリステンセンが言うところの破壊的イノベーションである。

その後、NAND型フラッシュは、超低価格PCのネットブックにSSDとして搭載された。これで、PC用のSSDとしての足掛かりができた。そして、スマートフォンなどのタブレット端末や、モバイルPC用SSDに、用途を拡大していくのである。この過程で、技術革新が進み、書き換え回数や信頼性も向上していったと思われる。

新市場を創出することが重要

以上、NAND型フラッシュの歴史を概観した。ここからどんな教訓を学び取ることができるか。

多くのラッキーが重なったことは疑いのない事実であろう。しかし、ラッキーだけで片付けては、将来の糧は何も得られない。

筆者は、「書き換え回数や信頼性があまり問題にならず、NAND型フラッシュの小型・軽量という最大の特徴が生かせるiPodという新市場を創出したこと」が、成功要因であったと考える。この成功があって初めて、ネットブック、タブレット端末、モバイルPC用SSDへの道が開けた。そして、HDDを代替し始めたのである。

つまり、HDD代替は結果論である。最初から、HDD代替をゴリゴリ推し進めていても成功したとは思えない。何よりも、より多くの人に使ってもらえるオーディオ用途という新市場を見つけたことが、キーポイントだった。

従って、PRAM、ReRAM、SpinRAMなどの新メモリがブレイクするためには、多少の難点には目をつぶり、そのメモリの最大の特徴を生かせる新市場を創出することが最も重要である。つまり、新メモリによって破壊的イノベーションを起こすこと、これが成功の秘訣である。

参考文献

- 1) 日経マイクロデバイス (2007.4) pp.27-33
- 2) 日経エレクトロニクス (2011.7、25号) pp.55-68
- 3) 遠藤哲郎：メモリー階層構造の変化と不揮発性ロジックへの新展開、応用物理 第79巻 第12号、pp.1093-1097
- 4) 角南英夫、川人祥二：メモリデバイス・イメージセンサ、丸善 (2009)
- 5) 角南英夫：半導体メモリ、コロナ社 (2008)