

大容量化と高速なデータアクセス性能を両立させるハイブリッドドライブ

Hybrid Drive with Large Capacity and High-Speed Performance

ミネ ブディマン

エリック ダン

リック エーリック

■ Mine BUDIMAN

■ Eric DUNN

■ Rick EHRlich

近年、ビットコスト（1ビット当たりの価格）の低い大容量のHDD（ハードディスクドライブ）に高速動作のNAND型フラッシュメモリ（以下、NANDメモリと略記）を搭載したハイブリッドドライブが注目されている。大容量HDDと小容量NANDメモリを組み合わせ、キャッシュアルゴリズムを工夫することで、ハイブリッドドライブはSSD（ソリッドステートドライブ）並みのユーザー体感を提供することが可能になる。

今回東芝は、キャッシュアルゴリズムを新たに開発し、使用頻度の高いデータをNANDメモリ上に置くことによって、SSDに匹敵する高いパフォーマンスを実現したハイブリッドドライブを開発した。キャッシュアルゴリズムがOS（基本ソフトウェア）に依存しないことから、このハイブリッドドライブは、ノートPC（パソコン）への新規搭載だけでなく既存のHDDやSSDを置き換えることも可能であり、ノートPCの高性能化に貢献できる。

The hybrid drive, which combines the bit cost advantage of rotating media with the high performance of NAND flash memory, has recently been attracting attention as a new storage device. The combination of a hard disk drive (HDD) and NAND flash memory makes it possible to deliver a solid-state drive (SSD)-like user experience with high-speed performance and ample storage capacity through improvement of the cache algorithm.

Toshiba has developed a new cache algorithm that places frequently used data into the NAND flash memory, resulting in a hybrid drive with SSD-like performance. As the newly developed cache algorithm is independent of the operating system, high-performance notebook PCs can be realized by replacing the HDD of existing notebook PCs with a hybrid drive as well as installing hybrid drives in new products.

1 まえがき

インターネットの普及に伴って大容量の動画あるいは情報を扱う機会が増え、PCに搭載されるHDDなどのストレージ装置では、単に大容量データを記録できるというだけでなく、PCを速やかに立ち上げるためのOSデータ読出しや、PC動作時のデータ読出し・書込みなどデータアクセス性能が重要になる。ストレージ装置の主役は依然としてHDDであり幅広い分野で使用されているが、データアクセス性能の高速化には限界がある。そこで高速なデータアクセス性能を備えたSSDが認知され市場が拡大しているが、ビットコストではHDDが依然として優位にある。このような背景の下、大容量化とデータアクセス性能の両方のニーズに応えるストレージ装置として、HDDにNANDメモリを搭載したハイブリッドドライブが注目されている。

東芝は、ストレージ装置を必要とする様々な用途に、エンタープライズ向け及びクライアント向けの最適なHDDやSSDを1社で提供できる。今回当社は、HDDのキャッシュメモリに、NANDメモリを2次キャッシュとして追加するキャッシュアルゴリズムを採用し、SSDに匹敵する高性能のハイブリッドドライブを開発した。ここでは、ハイブリッドドライブのアーキテ

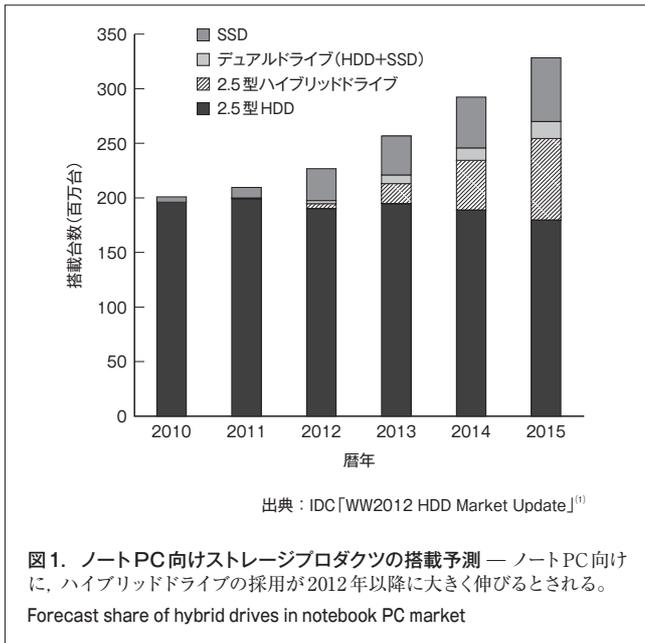
クチャ、及びハードウェア・ソフトウェア開発に適用した技術の概要について述べる。

2 東芝のハイブリッドドライブへの取組み

当社は、NANDメモリの最先端技術開発を常にリードするとともに、HDDやSSDなど全ての主要なストレージ装置を効果的に組み合わせ、今後ますます発展するICT（情報通信技術）社会における“トータル ストレージイノベーション”を推進している。NANDメモリやSSD技術と3.5型を含む全カテゴリーのHDD技術とのシナジー効果を促進することで、トータル ストレージイノベーションの柱となるストレージ装置の、クライアント市場及びエンタープライズ市場へ向けたグローバルな展開を図っている。

インターネットやクラウドコンピューティングの普及によるデータ量の増大に伴い、PCに搭載されるHDDなどストレージ装置の容量も増加の一途をたどっている。一方、SSDはデータアクセスの高速化や、PC立ち上げ時間の短縮、小型・低消費電力化などのメリットからノートPCへの導入が進んでいる。

ノートPC向けストレージ装置の搭載予測を図1に示す。ビットコストを抑えたままで大容量化と高速なデータアクセス

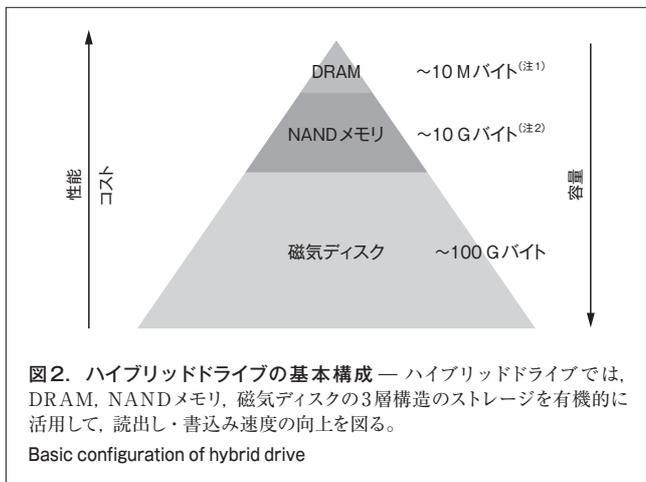


性能を同時に実現するハイブリッドドライブは、本格的な搭載が2012年に始まり、2015年には市場全体の約25%を占めるまでの成長が見込まれている。

このような市場ニーズを背景に、今回開発したハイブリッドドライブは、これまで当社が培ってきたNANDメモリの技術、SSDでキーとなるNANDメモリの使いこなし技術、及びHDDの製品開発技術が一体となって、大容量と高いパフォーマンスを実現している。

3 アーキテクチャ

ハイブリッドドライブの基本構成を図2に示す。



(注1)、(注2)、(注3) Mバイトは 10^6 バイト、Gバイトは 10^9 バイト、Tバイトは 10^{12} バイトで計算。

HDDには、キャッシュメモリとしての小容量で高速なDRAM(揮発性メモリ)と、大容量の磁気ディスク(不揮発性メモリ)が搭載されている。ここに、読出し・書込み速度、ビットコスト、及び記憶容量がそれらの中間に位置するNANDメモリ(不揮発性メモリ)を、2次キャッシュとして追加する。

新たに開発したキャッシュアルゴリズムは、データのアクセスパターンを動的に学習し、頻繁にアクセスされるデータを不揮発性メモリであるNANDメモリ上に格納するため、PCの起動時などでDRAMがキャッシュヒットできない場合でもアクセス性能の向上が可能になり、SSDに近いパフォーマンスが得られる。

また、ハイブリッドドライブは、PCなどの搭載システム側からは、従来のHDDやSSDと同様に一つのドライブとして認識される。そのため、特別なソフトウェアの追加は必要とせず、既存のHDDやSSDを直接置き換えることができる。

4 ハードウェアの開発

ハイブリッドドライブの開発では、装置のコストを抑えつつ市場への導入をできるだけ早めるため、既存のHDDで使用している部品を可能な限り転用することとした。

これを実現するため、NANDメモリへのデータ読出し・書込みを制御するNANDコントローラは、SoC(System on a Chip)とNANDメモリの中間に位置するブリッジチップとして開発した。SoCのDDR2(Double Data Rate 2)インタフェースにNANDコントローラとSDRAM(Synchronous DRAM)を並列に接続し、NANDコントローラとSDRAMに異なるアドレス空間を割り振る構成とすることによって、ハイブリッドドライブでも既存のHDDと共通のSoCを使用できるようにした。

一方、ハイブリッドドライブでは、既存のHDD用基板に前述のNANDコントローラと、NANDメモリを追加実装する必要があるため、基板の実装面積が不足するおそれがあった。基板の面積や形状を変更することは、基板とHDD筐体(きょうたい)の形状が干渉するおそれがあり、場合によってはHDD筐体の再設計が必要になる。これを防ぐため、SDRAMにはDDR1ではなく省スペースのDDR2サイズを採用することで必要な実装スペースを縮小した。更に、プリント基板を既存の4層から6層に変更することで配線面積を確保した。その結果、図3に示すように通常のHDDと同じサイズの基板への部品実装が可能になり、既存のHDD筐体との共通化を実現できた。

しかし、NANDメモリ1個を実装するのが限界であり、1個で要求性能が満足できるNANDメモリを選択する必要があった。候補となるNANDメモリの種別とシーケンシャルライト時の性能比較を表1に示す。NANDメモリでは、SLC(Single Level Cell)はMLC(Multi Level Cell)に比べて容量単価が

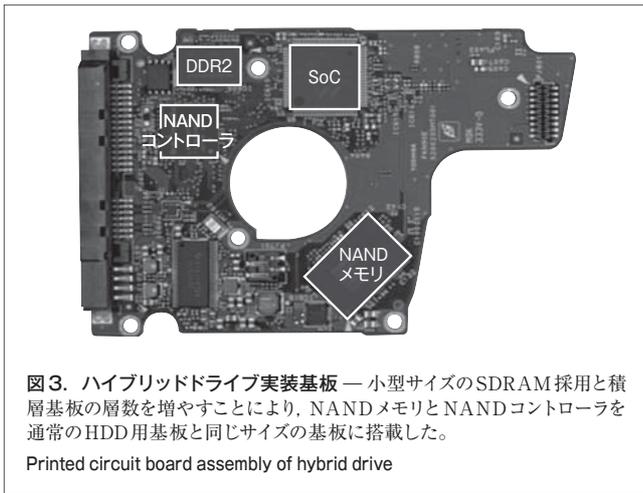


図3. ハイブリッドドライブ実装基板 — 小型サイズのSDRAM採用と積層基板の層数を増やすことにより、NANDメモリとNANDコントローラを通常のHDD用基板と同じサイズの基板に搭載した。

Printed circuit board assembly of hybrid drive

表1. NANDメモリのシーケンシャルライト性能比較
Comparison of sequential write performance of NAND flash memories

メモリ種別	シーケンシャルライト性能* (Mバイト/s)		
	2ダイの場合	4ダイの場合	8ダイの場合
32 nm SLC (2 Gバイト/ダイ)	—	137	237
24 nm MLC (8 Gバイト/ダイ)	44	88	176
24 nm SLC (4 Gバイト/ダイ)	160	248	248
24 nm eMLC (8 Gバイト/ダイ)	44	88	176

コスト増

eMLC: Enterprise MLC

*プログラム処理前のイレース処理を含み、カバレッジコレクションや、ウェアレベリング、WA (Write Amplification) 処理は含まない。

全構成は、マルチページキャッシュリード/プログラムを仮定

高いが、はるかに高性能である。また、ダイ (NANDチップ) の個数を増加させると、並列処理が可能になって性能が大幅に向上する。今回のハイブリッドドライブでは、NANDメモリを1個しか搭載できないことから、コストと性能をトレードオフにして検討した結果、8 GバイトSLC (2 Gバイトのダイを4個使用) を選定した。

一方ランダム性能は、通常のHDDではシーク時間と磁気ディスクの回転待ち時間によって制限される。多くの場合、シーク時間と回転待ち時間を最小化するためコマンドリオーダリング (コマンド順序変更) 技術が使用されるが、通常は200 ~ 300 IOPS (I/O (Input/Output) per Second: 1秒当たりのI/O処理回数) が限界となる。NANDメモリの性能は、NANDメモリへのアクセス速度によって制限されるが、チャンネル数とダイの個数を増やして並列動作させることによって改善できる。この技術を使用すれば、NANDメモリのランダムリード/ライト性能を通常のHDDに比べて1桁優れた値である数千IOPSに向上させることが可能である。

5 ソフトウェアの開発

ハイブリッドドライブに搭載するNANDメモリのサイズは、

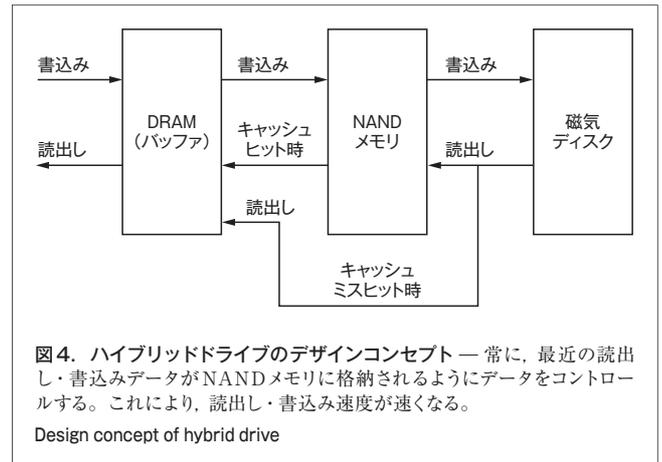


図4. ハイブリッドドライブのデザインコンセプト — 常に、最近の読出し・書込みデータがNANDメモリに格納されるようにデータをコントロールする。これにより、読出し・書込み速度が速くなる。

Design concept of hybrid drive

1 Tバイト^(注3)のHDD容量の約1%に相当する8 Gバイトである。容量に制約があることから、NANDメモリをキャッシュとして効果的に利用するためには、これに記憶するデータを注意深く選択する必要はある。

ハイブリッドドライブのデザインコンセプトを図4に示す。

ハイブリッドドライブは、読出し・書込み速度が異なるSDRAM、NANDメモリ、及び磁気ディスクの3層構造となっている。システム側から書込み指示があった場合、ハイブリッドドライブは磁気ディスクに書き込む前にデータをNANDメモリに書き込む (磁気ディスクには後で書込みを行う)。システムから特定アドレスのデータ読出し要求があると、まず、そのアドレスのデータがNANDメモリ内に格納されているかどうかを確認する。NANDメモリ内に要求されたアドレスのデータがあれば、直ちにシステムに送信する。データが存在しない場合には、磁気ディスクからデータを読み出してシステムに送信し、そのデータをNANDメモリにも格納する。このアルゴリズムによって、最近ハイブリッドドライブに書き込まれたデータやハイブリッドドライブから読み出されたデータが、常にNANDメモリに格納されていることになる。システム側から再び同じアドレスのデータ読出し要求があった場合、全てのデータがNANDメモリ内に存在しているので、システム側へのデータ送信が非常に高速にできる。

16 GバイトのNANDメモリを搭載したハイブリッドドライブ試作機を用いて、性能ベンチマークツールのPCMark^{®(注4)} Vantage HDD Suiteを6回実行した。その結果として、ベンチマークスコアと磁気ディスクからの読出し回数を図5に示す。ハイブリッドドライブは、NANDメモリ内にデータが存在しなければ磁気ディスクから読出しを行わなければならない。2回目以降は、磁気ディスクからの読出しが劇的に減少していることがわかるが、これはほとんどのデータがNANDメモリから読み出されたためである。また、ベンチマークテストのス

(注4) PCMarkは、Futuremark Corporationの商標。

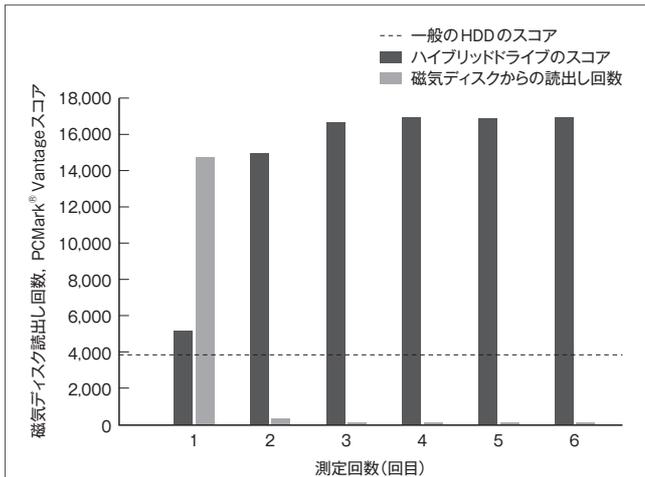


図5. ベンチマークスコアと磁気ディスク読出し回数 — 試験を繰り返すことにより、データの格納場所が最適化されて読出し・書込み速度が向上し、通常のHDDに比べて3倍程度のスコアになる。
Results of benchmark scores and disk-read count tests

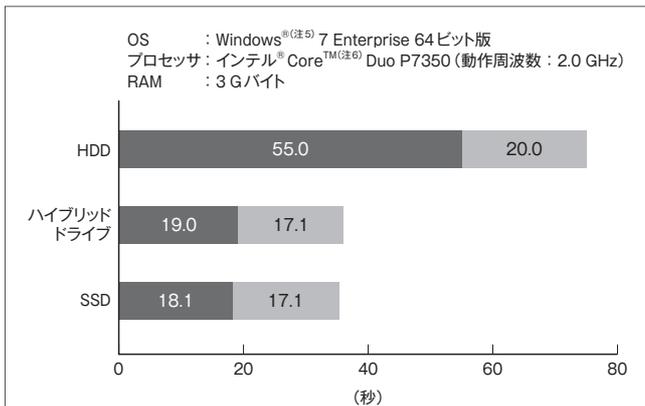


図6. アプリケーションのロード時間比較 — ハイブリッドドライブでは、通常のHDDよりはるかに速く、SSD並みの時間で立上げが完了した。
Comparison of application load times of HDD, hybrid drive, and SSD

コアも、1回目は従来のHDDの性能をわずかに上回る程度であるが、測定回数が増えるにつれて1回目の3倍以上高いスコアとなっている。これらは、システムからのデータアクセスパターンを学習することによって、要求されるデータをNANDメモリ上にキャッシュすることで達成している。

同一のPC上にHDD、ハイブリッドドライブ、及びSSDを搭載して、それぞれ同一のアプリケーションをロードしたときの時間を比較した例を図6に示す。ハイブリッドドライブで要するロード時間は従来のHDDよりも大幅に短くSSDとほぼ同水

(注5) Windowsは、Microsoft Corporationの米国及びその他の国における商標。
(注6) インテル、インテルCOREは、米国及びその他の国における米国Intel Corporation又は子会社の登録商標又は商標。

準となっている。

これらの評価結果から、ハイブリッドドライブの有効性を確認することができた。

6 あとがき

現在、ハイブリッドドライブの更なる性能改善を図るため、NANDメモリに保持すべきデータを選択する根拠となる情報をPC側から提供する仕様であるhintsの標準化が、SATA (Serial Advanced Technology Attachment) の標準化団体であるSATA-IO (SATA-International Organization) で議論されている。また、NANDメモリの分野では、部品の集積化及びプロセスの微細化によるコスト削減が進められている。

当社は今後も、SDRAM、NANDメモリ、及び磁気ディスクの3層構造を有機的に活用できるキャッシュアルゴリズムのブラッシュアップにいつそう注力し、より高いパフォーマンスを実現することを目標として第2世代ハイブリッドドライブの開発を進めていく。

文献

- (1) IDC. WW2012 HDD Market Update. IDC. 2012.



ミネ ブディマン Mine BUDIMAN

東芝アメリカ電子部品社 ストレージプロダクツビジネスユニット ディレクター。ハイブリッドドライブの開発に従事。
Toshiba America Electronic Components, Inc.



エリック ダン Eric DUNN

東芝アメリカ電子部品社 ストレージプロダクツビジネスユニット エンジニアリングフェロー。ハイブリッドドライブの開発に従事。
Toshiba America Electronic Components, Inc.



リック エーリック Rick EHRlich, D.Sc.

東芝アメリカ電子部品社 ストレージプロダクツビジネスユニット エンジニアリングフェロー、理博。ハイブリッドドライブの開発に従事。
Toshiba America Electronic Components, Inc.