

書き込み性能とコストを考慮した 次世代不揮発性メモリを用いた SSD の設計指針

小名木 貴裕¹ 孫 超¹ 竹内 健¹

NAND フラッシュと SCM をストレージとして用いたハイブリッド SSD と、SCM のみで構成される All S-SCM SSD の性能とコストについて評価を行った。ハイブリッド SSD は使用頻度が高く、断片化しているデータを SCM に書き込むことで、NAND フラッシュのみの SSD よりも高速に動作する。All S-SCM SSD はコスト面で課題が残るが、書き込み性能はハイブリッド SSD の 11.7 倍高速である。また、TSV を用いた三次元 SSD の消費電力削減効果についても評価し、All S-SCM SSD では TSV を用いることで消費電力を 74 %削減することが可能である。

1. 研究の目的, 背景

ストレージ・クラス・メモリ (SCM) と呼ばれる次世代不揮発性メモリは DRAM と NAND フラッシュ間のアクセス速度のギャップを埋める存在として期待されている。SCM には種類によって高速・小容量なもの(M-SCM)や低速で大容量なもの(S-SCM)がある。そこで、高速な M-SCM と NAND フラッシュを組み合わせたハイブリッド SSD が提案された。それに対し、低速だが低コストな S-SCM のみをストレージとして用いる All S-SCM SSD[1] が提案され、それぞれについて SCM を有効に使用するためのアルゴリズムを導入し、SSD の性能とコストについて評価した。

2. 三次元ハイブリッド SSD と All S-SCM SSD

ハイブリッド SSD はコストの高い M-SCM と NAND フラッシュを組み合わせた SSD である。ストレージとして用いる NAND フラッシュは書き込み単位(ページ)がホストからのリクエストの単位であるセクタサイズより大きく、かつページに上書きができない特性をもつため、データの断片化が生じる。SCM はビット単位でのアクセス並びに上書きが可能のため断片化による性能低下が起こらない。そこで NAND フラッシュの断片化を軽減し、限られた容量の M-SCM を有効に活用するために専用のアルゴリズムが必要となる。All S-SCM SSD は低速な S-SCM をストレージとして使用する SSD であり、データの断片化を考慮せずに済むため、書き込みデータパターンによる性能低下が起こりづらいといえ、安定した性能が発揮できる。

また、SSD コントローラと不揮発性メモリを Through-silicon via(TSV)技術を用いて接続した

三次元 SSD では、従来の TSV を用いない SSD に比べて消費電力の削減が期待できる。

3. 書き込みアルゴリズム

ハイブリッド SSD では書き込み頻度の高いデータや、NAND フラッシュでは断片化の原因となるデータを SCM に書き込むようにデータを解析する(図 1(a))。書き込み頻度の判断には LRU テーブルを用いる。LRU テーブルへは基本的にアクセスが FIFO で書き込まれていき、もしテーブル内に残っているアドレスに書き込みが発生すると、そのアドレスを先頭に並び替える。この LRU テーブルを書き込みの際に参照し、書き込むアドレスが LRU テーブルに存在する場合は書き込み頻度が高いものと判断し、SCM へ書き込む。また、データの断片化の有無については、実際に書き込まれるデータのサイズがページサイズに対してどのくらいの割合かを調べることで判断している。ハイブリッド SSD に用いる M-SCM の容量は SSD 全体のコストと関係しているため、できるだけ少ない容量で、効果的に使用する事が望ましい。そこで、SCM の空き容量が残り少なくなると SCM 内のデータから断片化していないかつ LRU テーブルに無いアドレスのデータを NAND フラッシュへ書き込み、SCM の空き容量を確保する。

SCM は書換え可能回数に制限がある($\sim 10^9$)ため、書換え回数平準化手法(ウェアレベリング)が必要である。本論文内の SSD では、NAND フラッシュはラウンドロビン方式を、SCM には図 2(b)のような上書き回数に応じたダイナミックウェアレベリングを用いる。

1 中央大学理工学部

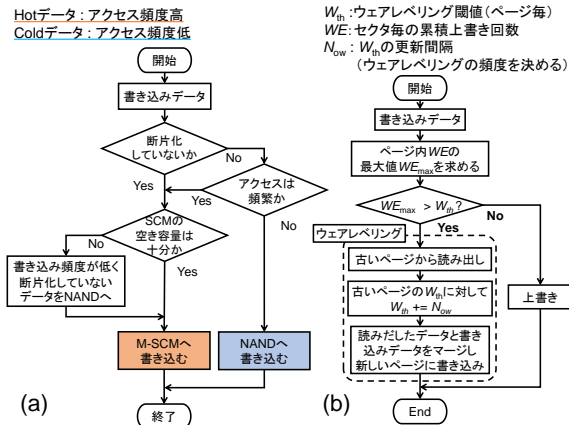


図 1 (a)ハイブリッド SSD のアルゴリズム (b)SCM のウェアレベリング[1]

表 1 不揮発性メモリのパラメータ設定

	MLC NAND flash	M-SCM	S-SCM
読み出し速度	85 μ s/ページ	100 ns /セクタ	0.1~10 μ s /セクタ
書き込み速度	Lower page : 400 μ s/ページ	100 ns /セクタ	1 μ s /セクタ
	Upper page : 2800 μ s/ページ		
消去速度	8500 μ s/ブロック		N/A
V_{DD} (メモリ)	3.3 V	3.3 V	1.8 V
Access unit	ページ (16 Kbyte)	セクタ (512 byte)	
V_{DD} (I/O)	1.8 V		1.2 V
I/Oピン容量 (TSV無し/TSV使用)	8 pF/0.3 pF		5 pF/0.3 pF

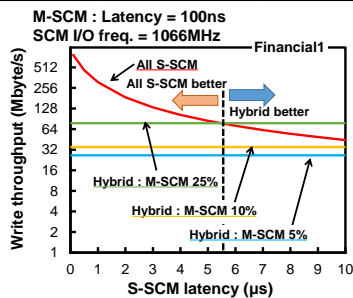


図 2 All S-SCM SSD の書き込み性能評価[1]

4. 評価

SSD エミュレータを用いてハイブリッド SSD, All S-SCM SSD の書き込み性能を評価した. 評価には金融サーバのアクセスパターン[3]を用いた. 表 1 にストレージとして用いる不揮発性メモリのパラメータを示す. 図 2 より, ハイブリッド SSD は M-SCM の容量により性能が変化し, NAND フラッシュの容量の 25%M-SCM をもつハイブリッド SSD は, レイテンシが 6 μ s より遅い S-SCM を用いた All S-SCM SSD より高速である. また, All S-SCM SSD は高速であるため, 図 3 のようにコントローラとメモリをつなぐインターフェースの速度の影響を大きく受ける. そこで TSV を用いた三次元 SSD とした時, 消費電力は 74%削減できる. SSD に用いるメモリのビットコストを評価すると, M-SCM のコストを NAND フラッシュの 12 倍とし

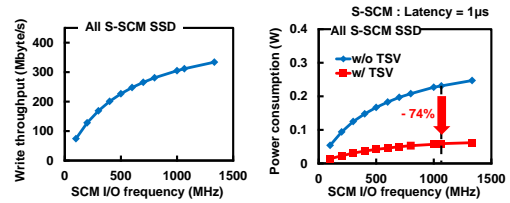


図 3 書き込み性能・消費電力の I/O トグル周波数依存性[2]

$$\text{Hybrid SSD のコスト} = S_{M-SCM} \times C_{M-SCM} + S_{NAND} \times C_{NAND}$$

$$\text{All S-SCM SSD のコスト} = S_{S-SCM} \times C_{S-SCM}$$

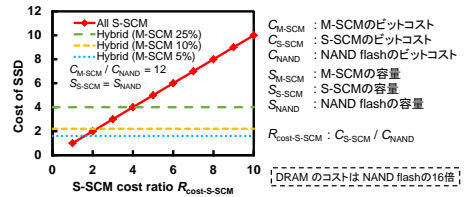


図 4 SSD のメモリビットコスト評価[1]

表 2 書き込みスループットと消費電力

	M-SCM/NAND Hybrid SSD	All S-SCM SSD
書き込みスループット (Mbyte/s)	26.5	311
消費電力 (W)	w/o TSV	0.361
	w/ TSV	0.277

S-SCM : Latency = 1 μ s SCM I/O freq. = 1066MHz

たとき, All S-SCM SSD がハイブリッド SSD よりもコスト面で優位であるためには, S-SCM のコストが NAND フラッシュの 4 倍以下でなければならない(図 4).

5. 結論

All S-SCM SSD を提案し, ハイブリッド SSD と比較, 評価した. NAND フラッシュの容量の 25% 分 M-SCM を追加したハイブリッド SSD と比較すると, All S-SCM SSD は S-SCM のレイテンシが 5 μ s 以下かつコストが NAND フラッシュの 4 倍以下である時に優位であるといえる. また, TSV を用いて三次元 SSD とすることで, All S-SCM SSD の消費電力を 74%削減することができる(表 2).

謝辞

本研究の一部は NEDO の助成によって行われた.

参考文献

- [1] T. Onagi et al., "Design Guidelines of All Storage Class Memory (SCM) SSD and Hybrid SCM/NAND Flash SSD to Balance Performance, Power, Endurance and Cost", Ext. Abstr. Solid State Devices and Materials, pp. 106-107, September, 2014.
- [2] T. Onagi et al., "Impact of Through-Silicon Via Technology on Energy Consumption of 3D-Integrated Solid-State Drive Systems", International Conference on Electronics Packaging and iMAPS All Asia Conference, pp. 215-218, April, 2015.
- [3] <http://traces.cs.umass.edu/index.php/Storage/Storage>.