

不揮発性メモリーの最適評価 ～SSD向けJESD219A規格のSDカード最適 評価への適用～

長野 真人 小関 健哲 出口 泰
加藤 且宏 今井 康雄

近年、産業機器・車載向けなど、高い信頼性が要求される機器でも不揮発性メモリーの主力である NAND Flashを使用したメモリーモジュール(SSD、eMMC、SDカードなど)の採用が拡大している。メモリーモジュールは大容量化に伴い、内部で複雑な書き込み制御しているため、生涯書き込み可能なデータ総量の推定が重要になっている。また、メモリーモジュールを使用する産業機器の電源のオン/オフや電気ノイズによる影響の評価も重要であり、実使用を考慮した高い負荷を与える効果的な採用前評価が求められている。

本稿では、SDカードへ高い負荷(書き込みストレス)を効果的に与え、短時間で性能の優劣を把握できる、常温エンデュランス(読み出し/書き換え耐性)評価を紹介する。また、産業機器向けと民生向けのSDカードを比較した事例及びエンデュランス加速試験としての有効性を述べる。

メモリーモジュールの信頼性の課題と評価

メモリーモジュールには、NAND Flashとコントローラーという複数の要素で構成されていることによる信頼性上の課題が存在する。図1にメモリーモジュールの模式図を示す。NAND Flash・コントローラー・電源関連回路で構成され、モジュールとして一体化しているため、従来から広く用いられてきたハードディスクドライブよりも大容量・高速・振動に強いなどの特長がある。その反面、NAND Flashを制御するコントローラーには、エラー訂正・ウェアレベリング・バッドブロック管理などの高度な制御が必須となっている。特に、メモリーモジュールの大容量化は、内部でコントローラーによる制御の複雑化を加速させ、このことが信頼性に大きく影響すると考えられる。この信頼性に影響を及ぼすのが、「生涯書き込み寿命」と「電源遮断耐性」である。

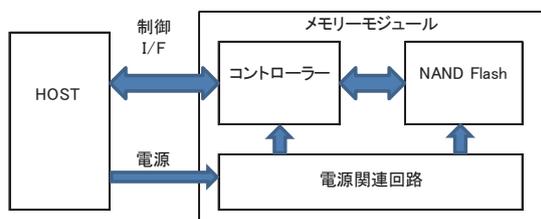


図1 メモリーモジュール模式図

(1) 生涯書き込み寿命評価

メモリーモジュールへの書き込みは、HOSTからの書き込み条件によってコントローラーにかかる負荷が大きく変わり、NAND Flashへの書き込み寿命にも大きく影響する。結果として、HOSTからメモリーモジュールへ生涯書き込み可能な総量が大きく変化するため、エンデュランス評価によって実力を把握することが重要になる。

(2) 電源遮断耐性評価

突然の電源異常による想定外の誤動作を防ぐため、信頼性が要求される装置には、電源遮断耐性評価も必須要件となっている。メモリーモジュールの電源遮断耐性は、電源遮断時のメモリーモジュールの動作状態や、動作タイミングによって結果が大きく変わるため、想定可能な全てのタイミングで評価することが重要になる。

メモリーモジュール評価試験の特徴

適用した評価手法の特徴を以下に示す。

(1) 常温エンデュランス評価

SDカードのNAND Flashには書き換え回数に上限があり、その実力(読み出し/書き換え耐性)を確認する「常温エンデュランス評価」に、SSDの規格であるJESD219Aの書き込み手法を適用する。

JESD219AはJEDECで定められた規格で、元々はSSDのエンデュランス評価試験用の書き込み負荷条件を規定している。

図2にSSDのアドレス空間と書き込み発生頻度のイメージを示す。全アドレス空間をLBA-A・LBA-B・LBA-Cの3つの空間に分け、SSDへのアクセスを以下のように割り当てる。LBA-A空間に全アクセスの50%を割り当て、LBA-B空間に全アクセスの30%を割り当て、LBA-C空間に全アクセスの20%を割り当てる。このようにアクセスを割り当てることによって、僅か5%のアドレス空間に全アクセスの50%を集中させ、NAND Flashの生涯書き込み寿命の劣化を加速させる。

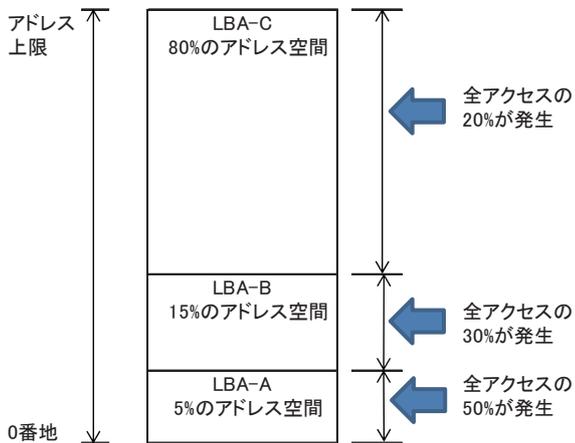


図2 SSD アドレス空間と書き込み発生頻度の関係

図3に、図2のアドレス空間に1回のアクセスで書き込まれる12種類のランダムデータのデータサイズと発生頻度を示す。さまざまなデータサイズのデータがランダムな空間に書き込まれる設定となっている。これは、1回のアクセスでSSDに書き込まれるデータサイズの67%が4Kbyteに集中している実際の使われ方を模擬したものである。

このJESD219Aで規定されているアクセス条件は、コンピューターのOS(オペレーティングシステム)の挙動を模擬している。本条件をメモリーモジュールへ適用し、モジュール内コントローラー(図1)に高い負荷をかけることにより、コントローラーとNAND Flash間のデータ送受信密度が高められる。結果としてNAND Flashへも大きな書き込みストレスを発生させることができ、生涯書き込み寿命を効率良く検証するための加速試験としての効果が期待できる。

1)	512 bytes (0.5K)	-----	4%
2)	1,024 bytes (1K)	-----	1%
3)	1,536 bytes (1.5K)	-----	1%
4)	2,048 bytes (2K)	-----	1%
5)	2,560 bytes (2.5K)	-----	1%
6)	3,072 bytes (3K)	-----	1%
7)	3,584 bytes (3.5K)	-----	1%
8)	4,096 bytes (4K)	-----	67%
9)	8,192 bytes (8K)	-----	10%
10)	16,384 bytes (16K)	-----	7%
11)	32,768 bytes (32K)	-----	3%
12)	65,536 bytes (64K)	-----	3%

図3 12種類のデータサイズと発生頻度

(2) 電源遮断耐性評価

メモリーモジュールの動作に同期してメモリーモジュールの電源に電源遮断パルスを印加し、誤動作が発生する電源電圧レベルを評価する。併せて、電源遮断パルス印加によって、電源遮断耐性、電源遮断パルス印加時の書き込みエラー、書き込み対象アドレス以外のビット化けなどの挙動を確認し、

メモリーモジュールを使用する産業機器の電源のオンオフや電気ノイズによる誤動作への影響の評価が可能となる。

SD カード評価事例

表1に評価項目と使用した試料の一覧を示す。

表1 評価サンプルと評価項目

製造元	グレード	常温エンデュランス評価	電源遮断耐性評価
A社	産業機器向け	・シーケンシャル書き込み(3個)	・データ転送時(3個)
B社			
C社	民生機器向け	・シーケンシャル書き込み + JESD219A書き込み(3個)	・busyタイミング時(3個)
D社			

(1) 常温エンデュランス評価

図4に評価方法を示す。(条件1)と(条件2)の結果を比較することでJESD219Aの加速試験としての有効性を確認する。ここでシーケンシャル書き込み回数3000回は一般的なメモリーモジュールの書き込み保証回数である。

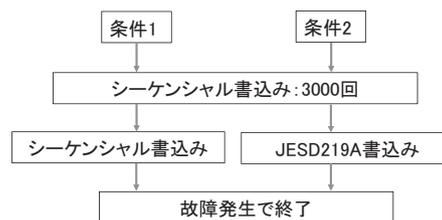


図4 JESD219Aの書き込みのストレス比較方法

① 書き込み回数による比較

図5に結果を示す。A社、B社、C社のメモリーモジュールは、シーケンシャル書き込みを続ける(条件1)に比べて3001回目以降をJESD219A書き込みに変更した(条件2)の方が少ない書き込み回数で書き込み寿命に到達した。(条件1)と(条件2)の両方で不良が発生しているB社とC社で3001回以降の書き込み回数を比較するとシーケンシャル書き込みに対するJESD219A書き込みの厳しさの度合いが分かる。

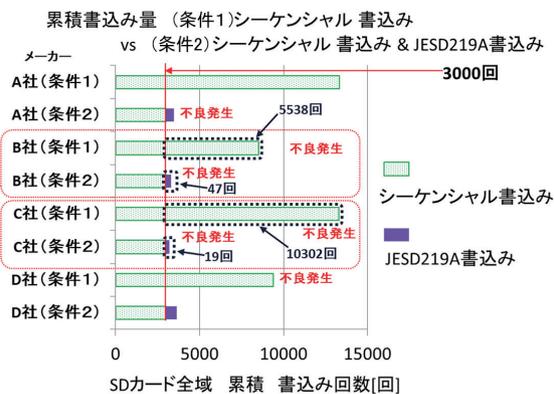


図5 (条件1) と (条件2) による書き込み回数比較結果

今回の評価では、3,001回目以降の(条件1)と(条件2)で不良が発生するまでの書き込み回数の比は、B社品では約118倍(5538回/47回)C社品では約542倍(10302回/19回)となった。JESD219Aで少ない書き込み回数で不良が発生する理由は、SDカード内のコントローラーに高い負荷がかかり、書き込み効率WAF、ウェアレベリングなどの効率が低下したことなどいくつかの理由が考えられる。この結果から、JESD219Aで規定されているアクセス条件は、コントローラーに高い負荷を与える加速試験として有効であることが確認された。

② 総書き込みデータ量による比較

図6に結果を示す。書き込み条件が変わると耐久性の強弱が入れ替わる結果となった。

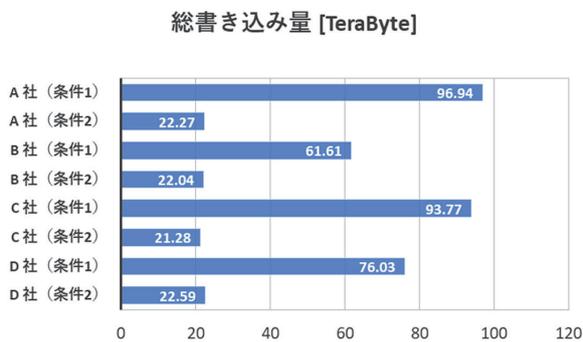


図6 (条件1)と(条件2)による総書き込み量比較結果

(条件1)シーケンシャル書き込み

[耐久性高い] A > C > D > B [耐久性低い]

(条件2)シーケンシャル書き込み後にJESD219A書き込み

[耐久性高い] D > A > B > C [耐久性低い]

シーケンシャル書き込みでは比較的良好な耐久性を示したC社品であるがJESD219A書き込みでは最も少ない書き込みで故障が発生している。一方で、シーケンシャル書き込みでは2番目に早く故障が発生したD社品は、JESD219A書き込みでは4社中最も高い耐久性を示した。また、(条件1)では総書き込み量に30TByte以上の大きな差がついたのに対し、(条件2)では総書き込み量に大きな差が発生していない。この結果から、必ずしも高価な産業機器向けSDカードが民生向けカードに比べて大きく優れている訳ではないと判断できる。

③ 書き込み性能による比較

メモリーモジュールの評価尺度には、前述の書き込み回数や書き込みデータ量の他に、書き込み速度がある。単に書き込み速度が速いだけではメモリーモジュールの信頼性評価尺度としては不十分なため、書き込み速度×累積書き込み量の性能に着目する。

図7にシーケンシャル書き込み(条件1)、図8にシーケンシャル

ル3000回書き込み後にJESD219A書き込みを実施(条件2)の結果を示す。書き込み条件が異なると、書き込み速度×累積書き込み量の性能が大きく変わり、図7に示したように、D社は、他社と比較して、(条件1)シーケンシャルでは書き込み速度×累積書き込み量の性能が最も低いが、図8の(条件2)JESD219Aでは、一見すると書き込み速度のバラツキが大きいように見えるが、最も遅い状態で比較しても他社よりも良好な結果となった。

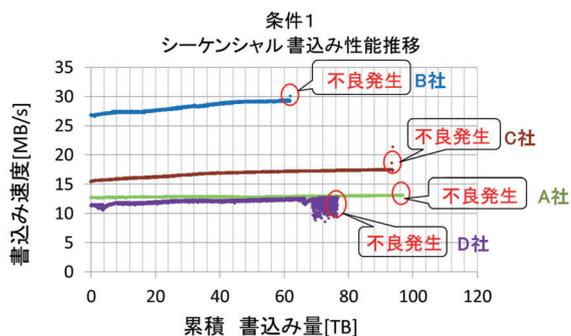


図7 (条件1)シーケンシャル書き込み性能推移

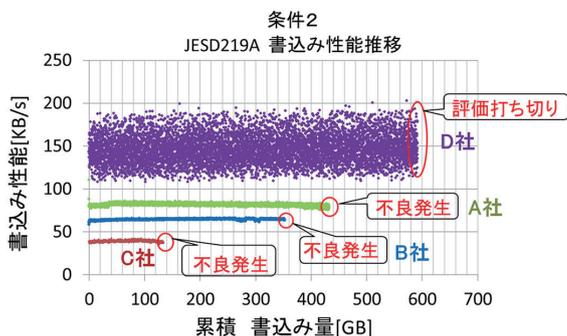


図8 (条件2)JESD219A書き込み性能推移

(2) 電源遮断耐性評価

SDカードへの書き込み動作中に発生する突然の電源遮断や電源ノイズによるSDカードの誤動作を想定した評価として電源遮断耐性も重要である。評価時のタイミングチャートを図9に示す。SDカードへ4KB(512 byte×8ブロック)のデータ書き込みタイミングに同期させてSDカードの電源に5ms幅の電源遮断パルスを重畳し、電源遮断パルス下限レベルを徐々に下げ、誤動作する下限電圧と挙動を確認する。

図10に結果を示す。4社とも動作保障電圧(2.7V~3.3V)では、正常動作している。また、A社とD社は、B社とC社に比べて明らかに下限電圧レベルが低く、電源遮断対策機能(電源電圧レベルを監視し、電源遮断時SDカードへの書き込みを保留させ電源電圧レベルが通常レベルに復帰した後、SDカードへの書き込みを再開させる動作)の搭載を示唆する挙動が確認された。この電源対策機能をもっているD社のSDカード電源遮断耐性が最も良好な結果となった。

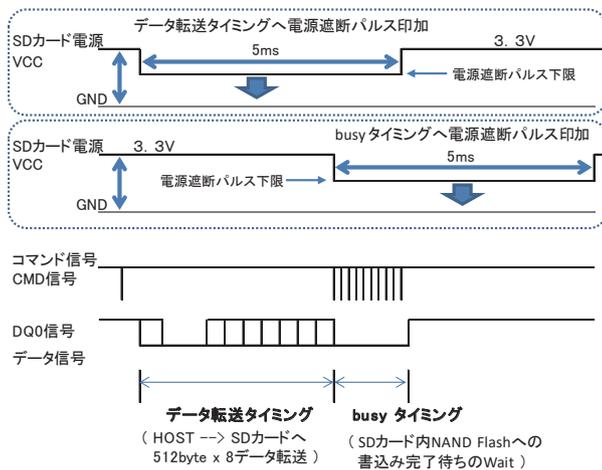


図9 SDカード書込みに同期させた電源遮断パルス印加のタイミングチャート

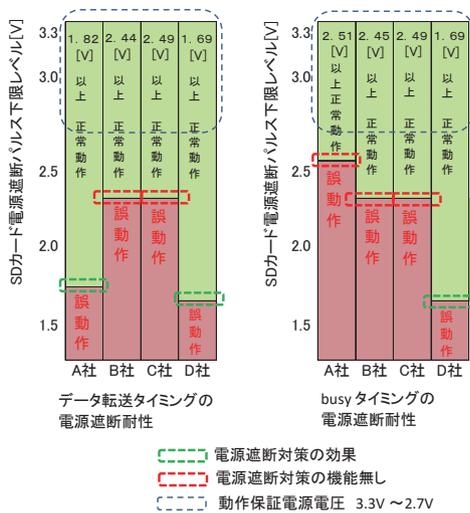


図10 SDカード電源遮断耐性評価結果

(3) SDカード評価結果結論

表2に各評価の結果を示す。産業機器向けA社はエンデュランス(条件1)に優れているが、その他の項目では、民生機器向けD社に劣るといったように、評価項目ごとに優劣が異なることが分かる。評価結果を精査し装置の要求に応じた最適なSDカードを選択することが重要となってくる。

表2 SDカード評価結果まとめ

	エンデュランス		電源遮断	
	条件 1	条件 2	Data 転送 タイミング	Busy タイミング
A 社	13312 回	3000 回+58 回	1.82V 以上	2.51V 以上
B 社	8538 回	3000 回+47 回	2.44V 以上	2.45V 以上
C 社	13302 回	3000 回+19 回	2.49V 以上	2.49V 以上
D 社	9300 回	3000 回+79 回	1.69V 以上	1.69V 以上

まとめ

- 最適評価として、常温エンデュランス評価へJESD219Aを

適用した事例を紹介した。本手法がSDカードへも有効であることを確認した。

- ESD219Aによる評価は、メモリーモジュールのコントローラーに高い負荷(書込みストレス)を与えるエンデュランスの加速評価として有効である。
- 電源遮断保護機能の挙動・動作限界を理解して、システム設計に反映させることは信頼性の確保に重要である。
- 民生向けD社SDカードは、JESD219Aの書込み耐久性・書込み性能・電源遮断で、産業機器向けA社、B社よりも良好な結果が得られた。
- 使用される装置の信頼性要求レベルに応じた最適なSDカードを適切な評価で選択することで低コストかつ信頼性の高い運用が可能となる。

参考文献

- 長野 真人, 出口 泰, 小 関 健哲, 岩 井 泰之, 今井 康雄: SSD (Solid State Drives) の信頼性評価事例, 日本信頼性学会信頼性シンポジウム発表報文集2015_秋季
- JEDEC STANDARD Solid-State Drive (SSD) Endurance Workloads JESD219A(Revision of JESD219, September 2010)

筆者紹介

長野真人: Makoto Nagano. 沖エンジニアリング株式会社 信頼性ソリューション事業部 評価第1グループ
 小関健哲: Takenori Kozeki. 沖エンジニアリング株式会社 システム評価事業部 西東京試験センター
 出口泰: Yasushi Deguchi. 沖エンジニアリング株式会社 信頼性ソリューション事業部 評価第1グループ
 加藤且宏: Katsuhiko Kato. 沖エンジニアリング株式会社 信頼性ソリューション事業部
 今井康雄: Yasuo Imai. 沖エンジニアリング株式会社

TIPS 【基本用語解説】

ウェアレベリング

NAND Flashの書き換え回数には上限があるため、一部のブロックに書き換え回数が集中しないように分散化を図ること。

バッドブロック管理

エラー発生時、ライト/リード不可のブロックを記録し、使わないようにする機能。

WAF (Write Amplification Factor)

HOSTからの書込み量に対してSDカード内NAND Flashへの書込み量が何倍かで表現される。