

ハードディスクドライブの耐環境性の評価 Feasibility Study of the Environmental Tolerance of Hard Disk Drives

Institute of Space Technology and Aeronautics
Spacecraft Electrical Engineering Group
Takeshi Sasada, Masanobu Yajima, Eiji Ohashi and Noboru Takata

Abstract

Several kinds of environmental tolerance tests were carried out as the primary evaluation for examining space applications using magnetic record type hard disk drives (HDDs.) This paper presents the results of vibration, thermal tolerance, environment of low pressure, and radiation tolerance test for four commercial HDDs. The disk size of 1, 1.8, and 2.5 inch HDDs were passed in each test. However, the 3.5 inch HDD was broken in the vibration test of acceptance test level. Based on these results, the paper then describes the feasibility of space-use HDDs.

1. はじめに

磁気記録方式であるハードディスクドライブ (HDD) は、高密度化・高速化により性能向上が進み、多くの宇宙ミッションへの適用が考えられる。しかし JAXA の衛星では搭載実績が無い。主な理由として、HDD は機構系部品があること、ヘッドの動作には気体が必要なこと、部品の放射線耐性が考慮されていないこと等が挙げられる。HDD の宇宙機搭載可能性を検証するため、プラッタの直径が異なる4種類の民生用 HDD にて振動・衝撃、熱、気圧、放射線の耐環境試験を実施した。

本研究は15年度より2年間に渡り実施しており、1次評価として HDD の特性上クリティカルな項目である振動(受入試験レベル)、温度性能(低温側のみ: -20°C)、気圧変動(減圧側のみ: 300hPa)、放射線照射(プロトン: 30MeV)の各試験を行った。その結果、3.5インチ型 HDD は振動試験で故障したが、1、1.8、2.5インチ型 HDD は実施した全ての試験に耐え搭載化の第一段階をクリアした。

2. 研究の概要

平成15年度は以下の項目について研究を行った。

- (1) HDD の調査
- (2) HDD の改造及び耐環境性試験・評価

平成16年度は以下の項目について研究を行った。

- (3) 放射線試験の実施と評価
- (4) 気密ケースの設計及び試作評価

3. 成果の概要

耐環境性の試験としては、振動、温度、気圧、放射線照射の順で実施した。途中、故障が発生した HDD は次の試験から除外した。以降、HDD の選定、各試験の条件、評価内容、結果等について述べる。

3.1 HDD の選定

耐環境性の試験では以下の方針に基づき供試

体を選定した。①搭載化が実現した場合の開発の容易さを考慮して国産の HDD とする、②機器調達時に必要な仕様(技術情報)を公開していること。その上で下記(1)~(3)の条件に合致するものを調達した。表1に選定した4種類の供試体概略を示す。

(1) HDD のサイズ

HDD は内蔵するプラッタ径にて分類できる。

本評価では、民生分野で一般的な 1、1.8、2.5、3.5 インチ型の 4 種類の HDD を選定した。入手性、インタフェースの容易さから 1 インチ型は Microdrive™ を、1.8 インチ型は PC カード型とした。なお、本調達時には 0.85 インチ型が入手できなかったため評価対象外とした。

(2) プラッタ枚数

プラッタ枚数が増加すると、プラッタと磁気

ヘッドの干渉、機構系部品の増加によって耐振動性能が低下する。従って各サイズとも単板 (1 枚) タイプの HDD とした。

(3) その他

4 種類の HDD は共に民生品であり、特にスクリーニングは実施していない。台数は破壊試験を想定し、また予算なども考慮し各サイズ 3 台とした。

Table 1 Overview of sample HDDs

種類	1 インチ型	1.8 インチ型	2.5 インチ型	3.5 インチ型
インタフェース	CompactFlash Type II	PC Card Type II	ATA/ATAPI-6	ATA/ATAPI-6
記憶容量/バッファ容量	1GB / 128kB	5GB / 256kB	40GB / 2MB	60GB / 2MB
プラッタ数/ヘッド数	1 / 2	1 / 2	1 / 2	1 / 2
回転数/平均シーク時間	3,600rpm / 12ms	3,990rpm / 15ms	4,200rpm / 12ms	7,200rpm / 8.8ms
I/F 転送速度	13.3MB/s (ATA-2, ATA-3)	100MB/s (UltraDMA/100)	100MB/s (UltraDMA/100)	100MB/s (UltraDMA/100)
消費電力 (最大)	1.3W@+5V	1.4W@+3.3V	4.7W@+3.3V	10.3W@+5V/+12V
質量	16g	55g	95g	640g
寸法 (高×幅×奥)	5×43×36mm	5×54×79mm	10×70×100mm	25×102×146mm

3.2 振動試験

本試験では、フライト品に相当する要求が規定される AT レベルにて、HDD の耐振動性能を確認する。

(1) 供試体

表 1 に掲げた 4 種類の HDD を 1 グループ (A ~C まで全 3 グループ) とし、1 回の試験で 4 台同時に実施した。

(2) 試験データ

試験設備：加振機

試験項目：衝撃試験 (表 2)、振動試験 (表 3、4)

試験条件：試験中は非通電。加振軸は直交 3 軸

(3) 評価項目

外観検査：目視にて破損の有無を確認

起動確認：起動時の異音チェック、起動時間の確認

動作確認：システム領域の標準/クラスタチェック

内部目視：HDD を開封し目視検査 (異常発生時)

(4) 試験結果

1 インチ型、1.8 インチ型

外観検査：異常なし

起動確認：異常なし

動作確認：異常なし

2.5 インチ型

外観検査：異常なし

起動確認：異常なし。但し A は電源 ON から Drive Ready までの時間が他 2 個より約 7 秒長かった

動作検査：A のみ書き込み速度が遅い (表 5)

3.5 インチ型

外観検査：異常なし

起動確認：A、C はディスクが回転するが正常なシーク動作が出来ない。また HDD 起動時の自己診断が完了せず Drive Ready 状態にならない

動作確認：B のみ正常動作

内部目視：A、C 共に 2 本のヘッドの下側のスライダがヘッド・サスペンションから脱落 (図 1、2)

Table 2 Conditions of impulse test

周波数範囲 [Hz]	加速度レベル [G]	備考
100~800	+7.07dB/oct	
800	29.3	
800~4k	-0.93dB/oct	2kHz まで 適用

1G = 9.80665 m/s²

Table 3 Conditions of vibration test (sine wave)

周波数範囲 [Hz]	加速度レベル [G]
5~15	10
15~100	25
100~2k	5

Table 4 Conditions of vibration test (random)

周波数範囲 [Hz]	加速度密度 [G ² /Hz]	実効値 [Grms]
20~70	+6dB/oct	22.8
70~260H	0.71	
260~400	-6dB/oct	
400~1,000	0.3	
1~2k	-8dB/oct	

加振時間：120 秒

Table 5 Comparison of access speed of 2.5 inch HDDs after vibration test

供試体	書き込み時間 [s]	読み出し時間 [s]
A	70.9	56.0
B	54.3	55.0
C	56.8	56.8

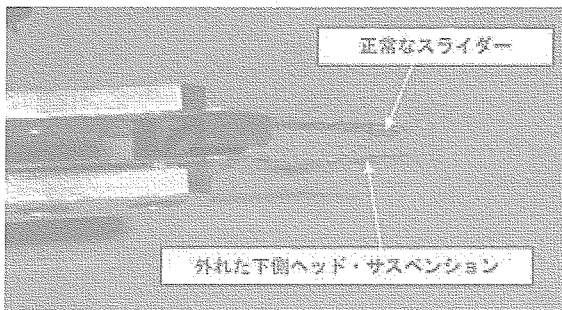


Fig.1 Head suspension (A) after vibration test

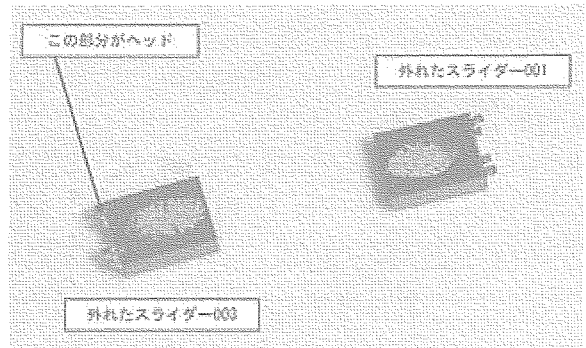


Fig.2 Dropped head slider (A: 001 and C: 003)

(5) 考察

ヘッド・スライダが脱落した 3.5 インチ型 HDD は主にデスクトップ PC 向けのため大容量、高速アクセスだが、耐振動・衝撃性能はヘッド質量が重いため低いと考えられる。2.5 インチ型は 1 台の供試体に性能劣化が認められた。起動および書き込み時間が長い理由は、振動によるスライダ位置ずれによりヘッド位置決めのカリブレーションを実行していると予測できる。1、1.8 インチ型は損傷・性能劣化なかった。カタログ仕様の通り、小型の HDD ほど振動環境では有利な傾向が見られた。

3.3 温度性能試験

本試験では、HDD の低温側の耐温度性能を確認する。高温側については PC や車載用 HDD で実績があるため今回は省略した。

(1) 供試体

振動試験にて 2 台の 3.5 インチ型が破損したため、当該 HDD は温度性能試験から除外した。以降は 1、1.8、2.5 インチ型の 3 種類で試験を実施。

(2) 試験データ

試験設備：恒温槽（図 3 に試験ブロック図を示す）

試験温度：-20℃~30℃（公差±1.5℃）

試験条件：温度到達後 30 分以上かけ平衡状態。

温度移行中は非通電

(3) 評価項目

動作確認：システム領域の標準/クラスタチェック、ファイル読み書き、ダミーデータ書き込み時間計測

(4) 試験結果

試験結果を表 6 に掲げる。恒温槽の温度を 30℃から-20℃まで下げ、その後 30℃まで戻す工程を時系列で実施した(表中、左→右)。表内の 3 文字は、左から右へ試験グループ A、B、C の順番で並んでおり、“o” は正常動作、“x” は異常動作、“-” は試験時間の都合もしくは供試体

温存のため試験を省略したことを意味する。例えば“ox-”は同型 HDD で A が正常、B が異常、C が試験省略となる。“*”は温度を常温まで戻しても復帰しなかった HDD である。

ダミーデータの書き込み時間については、HDD の個体差による違いはあるものの、温度変化による差異はあまり見られなかった。

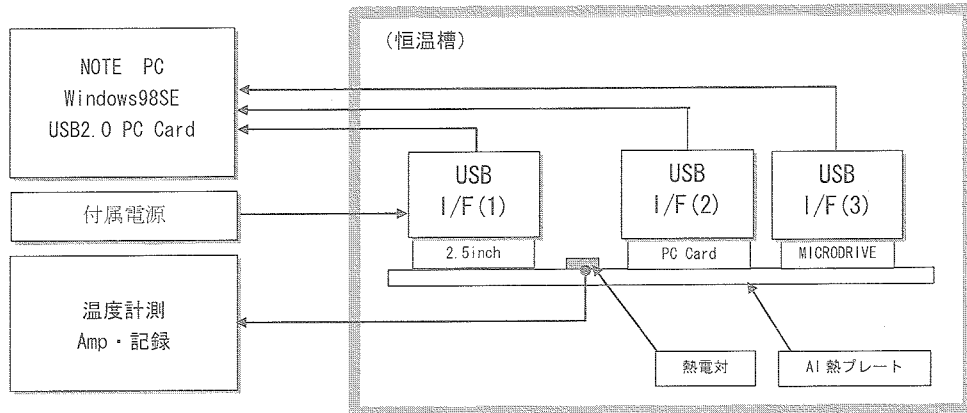


Fig.3 Block diagram of temperature test

Table 6 Results of cold temperature test

		℃	30	0	-10	-20	-5	5	30
1 型	R		ooo	ooo	ooo	xxx	-o-	o--	ooo
	W		ooo	ooo	ooo	xxx	-o-	o--	ooo
1.8 型	R		ooo	ooo	xxx	xxx	-x-	o--	ooo
	W		ooo	ooo	xxx	xxx	-x-	o--	ooo
2.5 型	R		ooo	oo*	oxx	xxx	-x-	o-x	oox
	W		ooo	xo*	xxx	xxx	-x-	o-x	oox

R : Read、W : Write

(5) 考察

1 インチ型が低温に対するマージンが大きい。2.5 インチ型は温度を戻しても回復しない供試体があった。動作異常の原因としては FDB のオイル粘性低下が原因と想定される。しかし、いずれの HDD も動作温度範囲のカatalog仕様を満たしており、搭載化の見込みはある。サンプル数は少ないが、本 HDD では温度性能の個体差が少ない傾向も確認できた。

3.4 気圧変動試験

気密容器内の気体がリークした場合に、気圧低下への閾値を確認するため減圧試験を実施した。気密容器内の温度上昇による僅かな内圧増加を除き加圧側へ移行する可能性はないため、HDD の加圧試験は省略した。

(1) 供試体

温度性能試験と同型の 3 種類の HDD で実施。試験の都合上、供試体の数は 1、1.8、2.5 インチ型で各々 2 (A/B)、2 (A/B)、1 台 (A) とした。

(2) 試験データ

試験設備：減圧槽

試験気圧：1013.25hPa (標準大気圧) から 300hPa (高度 7km 相当) まで減圧 (公差±10%)

試験条件：温度 25℃。気圧設定後 5 分以上かけて平衡状態。気圧移行中は非通電

試験手順：減圧槽のコネクタ数の都合上、供試体 1 台毎に実施。気圧安定後 HDD を動作 (PC で遠隔操作)。動作が不安定または不能になった時点で試験中止

(3) 評価項目

温度性能試験と同項目を評価

(4) 試験結果

試験結果を表 7 に掲げる。表中の数字は減圧槽の気圧設定時の値 (hPa)、“-” は試験省略、枠囲みはその気圧で HDD が動作しなかったことを示す。参考までに当該気圧を ICAO 国際標準大気 (ISA) にて高度換算した値を付記する³⁾。

各 HDD は概ね高度 3,000m を上限とするカタログ仕様 (動作時) であるが、試験結果から高度にして 1~2km のマージンがあることが分かる。1.8 インチ型は 2 台とも 1 気圧に戻した後も動作しなかった。

Table 7 Results of low air pressure test

HDD		1 インチ型		1.8 インチ型		2.5 インチ型
動作範囲 (仕様)		-300~ 3,048m		-300~ 3,000m		-300~ 3,048m
		A	B	A	B	A
換 算 高 度 k m	0	1024	1025	1016	1020	1021
	1	-	-	-	-	-
	2	849	792	804	800	798
	3	681	698	693	700	698
	4	581	600	595	597	600
	5	493	500	493	497	499
	6	-	397	400	399	400
	7	293	299	-	-	-

Unit: hPa

(5) 考察

気圧変動はいずれの型の HDD もカタログ仕様を満足した。動作不良の発生は 400hPa 程度で、供試体によっては気圧が戻ると回復するものとしなかったものがあった。故障した 1.8 インチ型については、分解検査を実施していないが何らかの HDD 内部の損傷が考えられる。

HDD は原理上、空気等の気体が不可欠のため気密容器で 1 気圧程度を確保する必要がある。実験結果から、気密容器内の気圧低下はマージンを含め 0.5 気圧まで許容できることが分かった。

3.5 放射線照射試験

軌道上での宇宙放射線によるシングルイベントアップセット (SEU) への耐性をプロトン照射にて試験する。また、シングルイベントラッチアップ (SEL) 耐性も確認する。

(1) 供試体

照射設備の借用時間の都合で 2.5 インチ型 1 台のみ試験を実施

(2) 試験データ

試験設備：サイクロトロン (放射線医学総合研究所)

照射粒子：プロトン (30MeV、照射時間 364s)

照射 Flux： 6.12×10^4 [1/cm²/s]

試験条件：常温。大気中照射

試験手順：HDD を動作させた状態でプロトン照射。供試体は制御用 PC と USB 接続。制御用 PC は照射室外の監視用 PC から LAN 経由で遠隔操作

(3) 評価項目

SEU 確認：照射中に制御用 PC から HDD ヘデータを 2 種類 (オール 0、1 のバイナリファイル各々 157.4MB) 書き込み、その直後再読み出しをして両データを照合 (プログラムにて自動実行)

SEL 確認：試験中は消費電流をモニタ

(4) 試験結果

SEU 発生：なし (両ファイル共)

SEL 発生：なし (電流値 450mA で正常、図 4 参照)

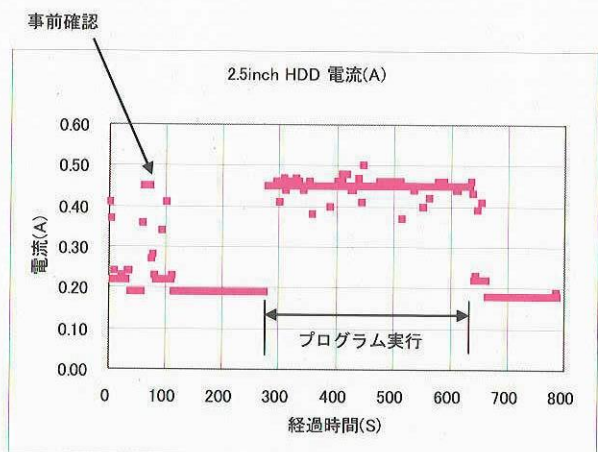


Fig.4 Current of 2.5 inch HDD in radiation test

(5) 考察

2.5 インチ型 1 台のみだが SEU、SEL への耐性を、HDD の制御回路も含めて確認した。実運用ではビット記録をした状態で一定期間データ保持をするが、今回は照射時間が短くこの検証は出来ていない。

ハードウェア損傷を引き起こすトータルドーズ

(TID) の耐性としては、日本原子力研究所 (高崎) にて Co-60 による γ 線照射を 1、1.8、2.5 インチ型 HDD に実施済みである。本試験時は HDD が非通電状態なので実際の動作状態とは異なるが、1.8、2.5 インチ型の 2 台は 900Gy 照射後も正常動作した (1 インチ型は動作せず)。

4. まとめ

本研究では、HDD の宇宙機搭載可能性を検証するため、プラッタの直径が異なる 4 種類の民生用 HDD にて振動・衝撃、熱、気圧、放射線の耐環境試験を実施した。搭載化には宇宙機関や衛星・コンポーネント製造メーカ等で定めた各種標準・規格をクリアする必要があるが、本研究では 1 次評価として HDD の特性上クリティカルな項目である振動 (受入試験レベル)、温度性能 (低温側のみ: -20°C)、気圧変動 (減圧側のみ: 300hPa)、放射線照射 (プロトン: 30MeV) の各試験を行った。その結果、3.5 インチ型 HDD は振動試験で故障したが、1、1.8、2.5 インチ型 HDD は実施した全ての試験に耐え搭載化の第一段階をクリアした。

本評価とは別に HDD の気圧を保つための気密容器も製作した。動作する HDD を気密容器に格納し、真空槽に約 1 ヶ月間放置した。気圧センサにて漏洩をモニタしたが気圧は減少しなかった。気密容器は肉厚のアルミ製のためトータルドーズに対しても十分な遮蔽効果が見積もれる。

今後はミッション要求や性能等を考慮した HDD の選定、RAID 構成などのシステムレベルでの冗長構成の検討、気密容器のリークや寿命評価などの長期動作が必要な項目の確認、コンポーネント認定試験と同等なレベルの試験等を行う予定である。

[参考文献]

- [1] Sasada, T., Ichikawa, S. and Shirakura, M.: High-Speed 200Gbytes Data Recorder Utilizing the 512Mbits SDRAM and CompactPCI Bus, 22nd AIAA Intl. Communications Satellite System Conference, Monterey, CA, May 2004
- [2] 岡村博司: ハード・ディスク装置の構造と応用, CQ 出版社, 2003
- [3] Manual of the ICAO Standard Atmosphere (extended to 80 kilometres (262,500 feet)), Doc 7488 / Third Edition, 1993